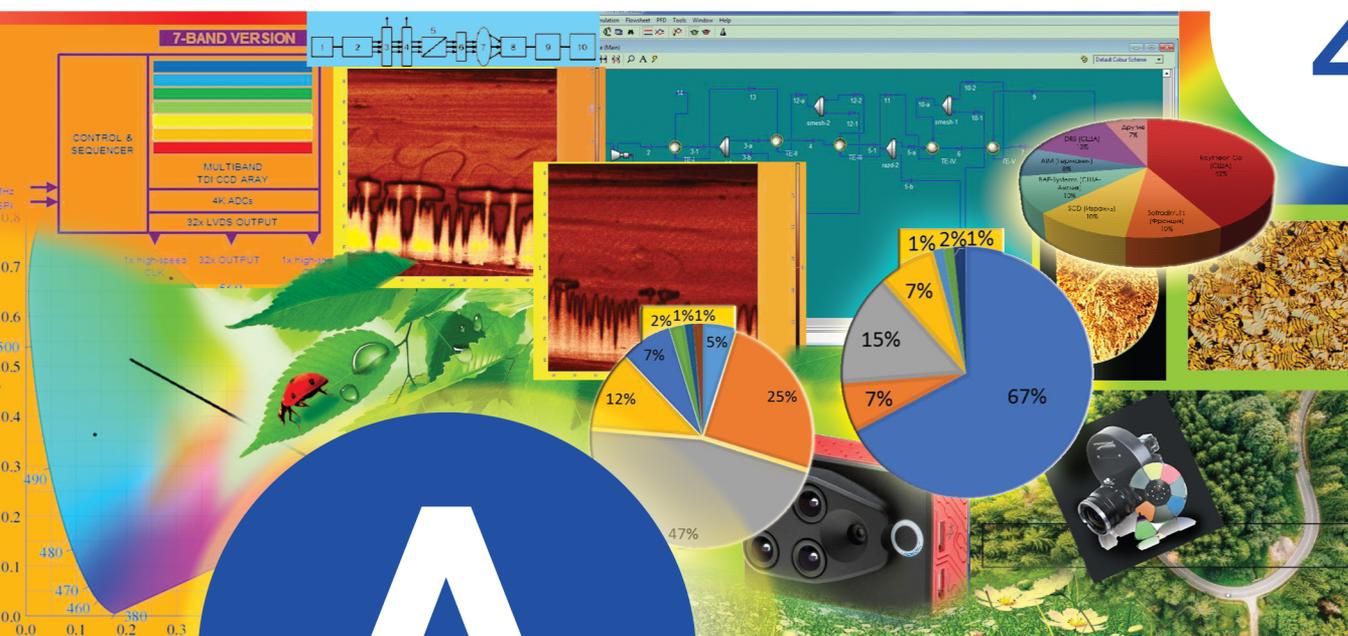




УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

4



АЛЬМАНАХ

НАУЧНЫХ РАБОТ
МОЛОДЫХ
УЧЕНЫХ

2021

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
(Университет ИТМО)**

**АЛЬМАНАХ
НАУЧНЫХ РАБОТ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
Университета ИТМО**

Том 4



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Санкт-Петербург
2021**

УДК_082.2
ББК_94.3

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 4. СПб.:
Университет ИТМО. 2021. 116 с.

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Пятидесятой научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематикам: фотоника.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редколлегии:

Бугров Владислав Евгеньевич

доктор физико-математических наук, профессор,
директор института перспективных систем передачи данных.

Члены редколлегии:

Бахолдин Алексей Валентинович

кандидат технических наук, доцент, профессор инженерно-исследовательского факультета

Вейко Вадим Павлович

доктор технических наук, профессор, профессор факультета наноэлектроники

Вознесенская Анна Олеговна

кандидат технических наук, заместитель директора института "Высшая инженерная школа"

Коротаев Валерий Викторович

доктор технических наук, профессор, руководитель научно-исследовательского центра оптико-электронного приборостроения

Успенская Майя Валерьевна

доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского центра биоинженерии

ISBN 978-5-7577-0648-1

ISBN 978-5-7577-0653-5 (Том 4)



Университет ИТМО (Санкт-Петербург) – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию: ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5-100.

© Университет ИТМО, 2021

© Авторы, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные 1 – 4 февраля 2021 года на Пятидесятой научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематике: фотоника.

Конференция проводится в целях ознакомления общественности с результатами научных исследований, выполненных в рамках: государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, стратегии развития Университета ИТМО до 2027 года, грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых, грантов РФФИ, РНФ, по постановлению Правительства РФ N 218 от 9 апреля 2010 года " Об утверждении Правил предоставления субсидий на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств", по постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные организации высшего образования, научные учреждения и государственные научные центры Российской Федерации», государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций, федерального проекта "Цифровые технологии", национальной программы «Цифровая экономика в Российской Федерации» и по инициативным научно-исследовательским проектам, выполняемыми преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами, магистрантами и студентами Университета, в том числе в содружестве с предприятиями, организациями Российской Федерации, а также международными сообществами для увеличения эффективности научно-исследовательской деятельности и подготовки кадров и специалистов высшей квалификации.

**НАПРАВЛЕНИЕ
«ФОТОНИКА»**



Алавяли Артур Тойвович
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №В42016с,
направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,
e-mail: artur.alavali@gmail.com



Романова Галина Эдуардовна
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н., доцент,
e-mail: romanova_g_e@mail.ru

УДК 543.4, 528.8, 681.785.554

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А.Т. Алавяли

Научный руководитель – к.т.н., доцент Г.Э. Романова

Работа выполнена в рамках темы НИР №620170 «Разработка методов и средств для решения прикладных задач опотехники и биоинженерии».

Аннотация

В работе проведен расчет и моделирование гиперспектральной системы с ограниченными массогабаритными характеристиками с помощью ПО Zemax OS. Выполнена симуляция изображения, получаемого в такой системе, а также приведены результаты обработки полученных при моделировании снимков и построены срезы гиперкуба для некоторых длин волн.

Ключевые слова

Дистанционное зондирование, гиперспектральные системы, гиперкуб, Zemax OS, проектирование оптических систем.

В последнее тридцатилетие технологии гиперспектральной съемки стали широко использоваться в области геологических исследований, мониторинга окружающей среды, исследований состояния атмосферы, детектирования биологических и химических веществ, контроля качества пищевых продуктов и пр. Одним из основных преимуществ этого неразрушающего метода контроля является возможность получения полноценного двумерного изображения исследуемого объекта в узком спектральном диапазоне, что позволяет применять алгоритмы компьютерного зрения и автоматической обработки.

Высокое спектральное разрешение и возможность работы в широком спектральном диапазоне дает большие возможности использовать данную технологию в различных задачах. Однако в большинстве случаев гиперспектральная аппаратура является дорогостоящей и недоступна широкому кругу лиц. Цены на такие камеры

составляют от 50 тыс. долларов в низкоценовом сегменте (например, Specim FX17e), а в высокоценовом сегменте могут достигать и превышать 1 млн. долларов например, для уникальных систем, устанавливаемых на космических спутниках [1].

Поскольку на сегодняшний день является актуальной задача по уменьшению стоимости гиперспектральной аппаратуры и улучшения ее доступности для широких масс, разработка такой системы представляется целесообразным.

В данной работе предполагается, что к гиперспектральным системам относятся такие системы, которые позволяют получать снимки исследуемого объекта в узком спектральном диапазоне одного канала с большим количеством таких каналов. Численные значения спектральной ширины канала и количества канала для некоторых существующих аналогов приведены в таблице.

Таблица

Примеры гиперспектральных систем и их характеристики

Название	Производитель	Спектральный диапазон, мкм	Кол-во каналов	Ширина канала, нм	2ω (°)
AISA-FENIX 1K	Specim, Финляндия	0.38–0.97, 0.97–2.5	348, 246	$\leq 4.5, \leq 12$	40
APEX	ESA (Швейцария, Бельгия)	0.372–1.015, 0.94–2.54	114, 198	0.45–0.75, 5–10	28.1
AVIRIS-NG	NASA/JPL (США)	0.38–2.52	430	5	34
CASI-1500/ SASI-1000A/ TASI-600	Itres (Канада)	0.38–1.05, 0.95–2.45, 8–11.5	288, 100, 32	2.3, 15, 110	40
FAHI	Китай	0.4–0.95, 0.95–2.5, 8–12.5	256, 512, 128	2.34, 3, 32	40
SYSIPHE	Франция, Норвегия	0.4–1, 0.95–2.5, 3–5.4, 8.1–11.8	560	5, 6.1, 11, 5 (cm ⁻¹)	15

Таким образом, к гиперспектральной можно отнести такую систему, которая имеет больше 100 каналов в рабочем спектральном диапазоне, причем ширина каждого канала не менее 10 нм. Также к требованиям к гиперспектральным системам отнесем непрерывность получаемого набора каналов по спектру. Основная идея гиперспектральных систем – одновременная реализация функции цифрового фотоаппарата и спектрометра.

Себестоимость каждого гиперспектрального снимка определяется как стоимостью комплектующих самой камеры, так и выбором носителя. Носителем для гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования земли могут быть космические спутники и летательные аппараты. Наименьшей себестоимостью полета обладают беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Поэтому в проектируемой системе в качестве носителя выбран БПЛА. Кроме того, для расширения возможностей эксплуатации системы необходимо предусмотреть возможность автономной работы гиперспектральной системы без носителя, для исследования объектов в лабораторных условиях.

Наиболее простым решением для получения гиперспектральных снимков является использование объектива, формирующего изображение исследуемого объекта на оптической щели, коллиматора, расположенного за щелью, дифракционного элемента и линзы, которая фокусирует спектральное изображение на фотоприемном устройстве. Оптическая схема без учета дифракции показана на рис. 1.

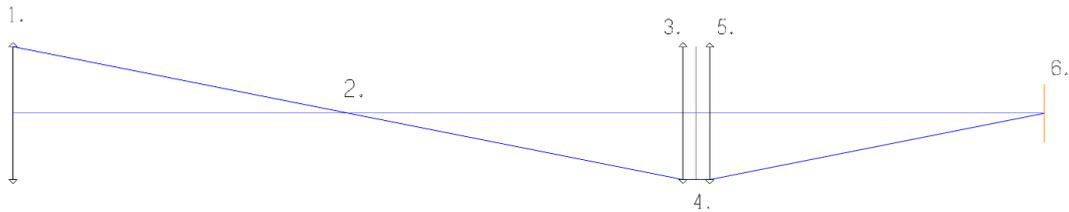


Рис. 1. Оптическая схема гиперспектральной системы,
 (1) – объектив, (2) – оптическая щель, (3) – коллимирующая линза,
 (4) – дифрагирующий элемент, (5) – камерная линза, (6) – фотоприемное устройство

С точки зрения получаемого качества изображения целесообразнее всего использовать зеркальный объектив [2]. У зеркальных объективов отсутствуют хроматические aberrации, что немаловажно при проектировании систем такого рода. Однако зеркальные системы более чувствительны к погрешностям изготовления, поэтому их применяют, как правило, при больших значениях требуемых диаметров и фокусных расстояниях. С учетом небольших габаритов проектируемого устройства была выбрана линзовая система.

В отличие от традиционных фотоприемных устройств, работающих, например, в трёх цветовых каналах RGB, системы гиперспектральной съемки более требовательны к энергетическим параметрам приемного модуля. Можно оценить поток, приходящийся на единичный пиксель в гиперспектральных системах следующим образом:

$$\Phi_{hyp} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E d\lambda}{A_{\text{пик}}}, \text{ Вт}$$

где $A_{\text{пик}}$ – площадь пикселя, λ_1 – нижняя граница спектрального коэффициента пропускания цветового канала, λ_2 – верхняя граница спектрального коэффициента пропускания цветового канала, λ_1 и λ_2 – интервал длин волн, попадающий на единичный пиксель при разложении изображения щели в спектр, E – освещенность пикселя.

Интервал $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ зависит от функции пропускания гиперспектрометра и определяется спектральной шириной щели. Данный интервал определяет разрешающую спектральную способность гиперспектрометра. В современных гиперспектральных системах $\Delta\lambda$, как было указано в табл. 1, составляет порядка $0.5 \div 5$ нм.

При одинаковом исследуемом объекте очевидно, что энергетический поток, попадающий на пиксель в классических трехканальных системах, много больше потока, попадающего на единичный пиксель матричного фотоприемного устройства гиперспектральной системы. Данное обстоятельство приводит к тому, что на конечном изображении в гиперспектральных системах зашумленность изображения будет выше при одинаковых условиях съемки.

Для расчета возможных размеров линз с учетом ограничений по массогабаритным характеристикам (не более 500 г) можно применить следующий подход. Примем за среднюю плотность оптического стекла плотность марки СТФ11 - 6.79 г/см^3 . Учитывая, что в системе присутствует три линзы и дифракционная решетка, и зная плотность стекла, допустимая масса на каждый элемент составит $500/4 = 125 \text{ г}$. С другой стороны, если использовать дифракционную решетку, изготовленную из пластмассы, то ее массой можно пренебречь. Поэтому с учетом массы оправ и корпуса (200 г.) и массы камеры (200 г) допустимая масса каждой из трех линз составляет $100/3 = 33.3 \text{ г}$. Тогда

максимальный объем одного элемента будет составлять $33.3/6.79 = 4.91 \text{ см}^3$. Исходя из предположения, что линзы имеют круглую апертуру, каждая имеет толщину 10 мм и пренебрегая радиусами кривизны, рассчитаем максимальный диаметр линз D:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}} = \sqrt{\frac{4 * 4,91}{3.14 * 1}} = 2,5 \text{ см} = 25 \text{ мм}.$$

Таким образом, при проектировании системы компактного спектрометра требуется учесть ограничения по диаметру линзы и принять во внимание энергетические характеристики. С учетом изложенных соображений в качестве компонентов системы выбирались линзы из каталога фирмы “Nanyang Jingliang Photoelectric Co., Ltd.” (Китай, <http://www.jinglianggd.com/>). Перечень линз указан на рис. 2.

achromatic cemented lens(unit:mm)						
item	diameter	focal length	center thickness	edge thickness	material	AR coated
98	7	-15.5	3.5	4.1	H-ZBAF16/H-ZF4A	400-700
99	9	-25.13	3.1	4.02	H-K9L/H-ZF2	400-700
100	9.5	30.69	4.8		H-K9L/F2	
101	13	23.79	4.8	2.2	H-LAF50A/H-ZF6	400-700
102	13.48	16.4	5.5	4.3	ZF1/BAK4	400-700
103	14	30.73	4.6		H-ZLAF50B/H-ZF11	400-700
104	15	32	9.2	6.1	ZF6/ZK6	400-700
105	16	34.47	6.23		H-K9L/H-ZF2	400-700
106	17	1830.57	5.1		H-K9L/H-ZF7LA	400-700
107	17	108	3.9	2.9	H-K9L/F4	400-700
108	18.5	65	6.35	5.1	H-K9L/F4	400-700
109	20	75	5	3.7		400-700
110	21.8	80	6.6	5	H-K9L/F7	400-700
111	22	66.5	7.57	5.9	H-LAF53/H-ZF7L	400-700
112	24.9	46	9.9	6.83	H-ZF6/H-ZK11	400-700
113	25	93.67	8.9	6.2	H-ZK10L/H-ZF52	400-700
114	25.3	103	6.9		H-K9L/F4	400-700
115	26.3	-55.6	7	7	H-ZF2/H-K10	400-700
116	28	100	8.4	6.2	H-K9L/F5	400-700
117	35	110	10	7.4		400-700
118	36	155.2	13.04	11.08	H-ZF6/H-QK3	400-700
119	42	110	12	8.2	H-K9L/F4	400-700
120	55	268.31	13.2		H-ZF5/H-K9L	400-700
121	57	500	10.3	8.2	H-K9L/ZF2	400-700
122	62	230	17	12	H-K9L/F4	400-700
123	74	3000	11	10.5	H-K9L/F4	400-700

Рис. 2. Перечень ахроматических склеенных блоков линз, предлагаемых “Nanyang Jingliang Photoelectric Co., Ltd.”

Позиции №112 и №113 имеют диаметр 24.9 и 25 мм соответственно и находятся близко к допустимой границе. Кроме того, можно отметить еще один возможный вариант: склейка из двух линз (№ 111), состоящая из стекол H-LAF53 и H-ZF7L и имеющая диаметр 22 мм. Поэтому в качестве объектива, коллиматора и линзы камеры была выбрана склейка линз под позицией №111 как наиболее подходящая по параметрам соотношения массы и энергетической эффективности.

В качестве щели на данном этапе работы используется стальной круг диаметром 15 мм с вытравленной посередине щелью шириной 5 мм и высотой 25 мкм. Геометрические параметры щели определяют поле зрения, спектральное разрешение и энергетические характеристики системы. К оптической щели предъявляются высокие требования к качеству обработки, поэтому изготовление щели требуемого качества составляет большую трудность. Наиболее адекватные результаты по качеству щели дают технологии электроэрозионной обработки и химического травления.

Моделирование системы проводилось в ПО Zemax OpticStudio (OS). Для моделирования характера получаемого системой изображения необходимо выбрать

объект. В качестве объекта выступает снимок, сделанный с БПЛА с высоты порядка 100 м, изображенный на рис. 3 (ист.: <https://www.pexels.com/ru-ru/photo/3107506/>).



Рис. 3. Фотография с БПЛА использованная при моделировании работы системы; черным прямоугольником указана область сканирования

Однако существуют некоторые трудности при моделировании объекта на далеком расстоянии от системы. В рассматриваемой системе проекция одного пикселя на поверхность земли (GIFOV) составляет [3]

$$GIFOV = H * \frac{w}{f'} = \frac{100 * 10^3 * 2 * 10^{-3}}{48} = 4 \text{ мм},$$

где H – высота полета, w – ширина пикселя, f' – фокусное расстояние объектива. Для того чтобы избежать потери информации об объекте, необходимо, чтобы один пиксель самого объекта был не больше, чем величина GIFOV, то есть не больше 4 мм. В таком случае, чтобы покрыть всё поле зрения системы ω , которое составляет

$$\omega = \text{atan}\left(\frac{b}{f'}\right) = \text{atan}\left(\frac{5}{48}\right) = 5,95^\circ,$$

необходимо иметь фотографию разрешением

$$N = \frac{100 * 10^3 * 5}{4 * 48} = 10416 \text{ pix.}$$

Фотографий с таким разрешением автору не удалось найти в сети Интернет в свободном доступе. К тому же использование таких фотографий серьезно нагружает центральный процессор и графическое ядро компьютера при трассировке лучей, и как следствие, процесс трассировки будет длиться нерационально долго. Для решения этой проблемы изображение объекта помещается в сопряженную с ним плоскость на поверхности щели.

Сканирование объекта обеспечивается путем смещения изображения объекта поперек оптической оси. Величина смещения изображения составляла 0.025 мм, что соответствовало смещению в пространстве предметов в плоскости объекта смещению 52 мм, что соответствует проекции ширины щели на плоскость объекта.

После серии трассировок было получено 22 кадра, что соответствовало сканированию участка земли длиной 1,1 м (рис. 4, а).

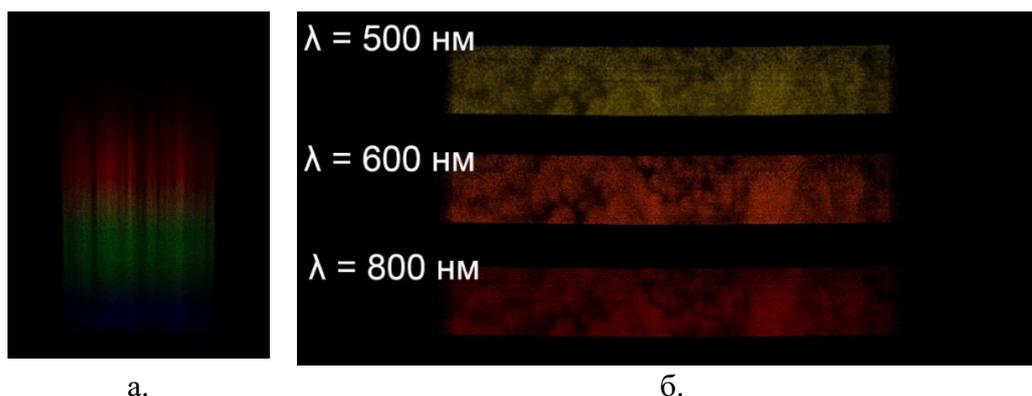


Рис. 4. Пример одного кадра при сканировании с шириной щели 25 мкм (а.) и результирующее восстановленное изображение для трех каналов (б.)

Данные снимки необходимо обработать для получения гиперкуба. Гиперкуб представляет собой трехмерный массив данных, в котором две координаты образуют двумерное изображение, а третья координата содержит в себе спектральную информацию об объекте в данной точке.

Обработка изображения осуществлялась с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV с открытым исходным кодом.

В ходе работы был написан программный код на языке C++ для обработки снимков. Использование данной программы для обработки полученных при моделировании изображений приводит к результату, изображенному на рис. 4, б.

По результатам обработки сложно судить о том, какого масштаба изображения можно различить с помощью разработанной системы. Сложность заключается в том, что использованное при моделировании изображение не соответствует по масштабу реальному изображению, получаемому данной камерой. Таким образом, смоделировать пространственное разрешение в такой системе при таком моделировании затруднительно, однако полученные в этом случае результаты могут быть полезными в комплексной оценке работы системы. Достижимое пространственное разрешение необходимо оценивать с помощью иных методов и средств.

В ходе работы было проведено комплексное моделирование гиперспектральной системы, получены снимки сканирования местности, опробован алгоритм обработки снимков для получения спектральных срезов и представлены срезы для трех длин волн. Представленные приемы, методы и подходы можно использовать для оценки работы подобных систем и на этапе принятия решений о компоновке схемы опико-электронного прибора.

В дальнейшей работе планируется рассмотреть возможность модернизации системы для улучшения качества изображения и рассмотреть алгоритмы сшивки изображений при наложении и сдвиге кадров относительно друг друга. Так же планируется определить наиболее оптимальный с точки зрения качества рабочей поверхности щели метод ее изготовления.

Литература

1. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2015/10/26/780079/0/en/Parc-Scientists-Develop-Tiny-Low-Cost-Hyperspectral-Imaging-Cameras.html#:~:text=Despite%20the%20compelling%20ability%20of,to%20well%20over%20%241M>. (дата обращения: 22.01.2021).

2. Fisher John & Baumbach, Mark & Bowles, Jeffrey & Grossmann, John & Antoniadis, John. (1998). Comparison of low-cost hyperspectral sensors. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 3438. doi:10.1117/12.328112/
3. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва. Техносфера. 2010. 506 с., 32 с. цв. вкл.



Арефина Ирина Александровна
Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
аспирант группы №7720,
направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия,
e-mail: irina-arefina97@mail.ru



Степаниденко Евгения Александровна
Год рождения: 1994
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
аспирант группы №7720,
направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия,
e-mail: stepanidenko.e@mail.ru



Куршанов Данил Александрович
Год рождения: 1993
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики
аспирант группы №7720,
направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия,
e-mail: kurshanov_danil@itmo.ru



Ушакова Елена Владимировна
Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
к.ф.-м.н., доцент,
e-mail: el.ushakova@gmail.com

УДК 535.34+535.37

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ
ОТКЛИКОВ КОЛЛОИДНЫХ УГЛЕРОДНЫХ
ТОЧЕК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА
И.А. Арефина, Е.А. Степаниденко, Д.А. Куршанов, Е.В. Ушакова
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Е.В. Ушакова**

Работа выполнена в рамках темы НИР №713561 «Оптические и электрические свойства гибридных наноматериалов на основе углеродных, полупроводниковых и металлических наноструктур», НИР №380130 «Светоизлучающие углеродные точки» и гранта РФФИ № 18-29-19122 «Наноструктурированные гибридные материалы на

основе углеродных точек и плазмонных наночастиц для высокоэффективных эмитеров оптического излучения".

Аннотация

В работе были применены несколько подходов к созданию гибридных материалов, состоящих из углеродных точек и золотых наночастиц, включая образование ковалентных связей и темплатные методы. Целью работы являлось получение оптимального протокола формирования гибридных структур со стабильными и улучшенными оптическими параметрами. Полученные результаты в дальнейшем помогут в решении проблем «зеленой» фотоники при создании экологически чистых материалов для оптоэлектронных устройств и их компонентов.

Ключевые слова

Углеродные точки, золотые наночастицы, локальный плазмонный резонанс, гибридные материалы, фотолюминесценция.

Развитие «зеленой» фотоники на сегодняшний день является важной глобальной задачей современной науки. С этой точки зрения углеродные точки (С-точки) обладают преимуществами перед классическими квантовыми точками (КТ), поскольку они обладают низкой цитотоксичностью и превосходными оптическими свойствами. Металлические наночастицы (МНЧ) также привлекают внимание ученых благодаря их возможности усиления локальным полем излучения люминофора. Формирование гибридных наноструктур на основе С-точек и МНЧ позволит комбинировать их свойства.

Наибольший интерес в таких композиционных материалах представляет явление влияния поля плазмонных частиц на оптические переходы излучающих наноструктур, например, усиление фотолюминесценции (ФЛ). Усиление сигнала ФЛ становится возможным благодаря экситон-плазмонному взаимодействию, проявляющемуся в эффекте Парселла [1]. Этот эффект заключается в увеличении вероятности спонтанной излучательной рекомбинации экситонов в ближнем поле металлических наноструктур. Практическая значимость этого эффекта заключается в возможности увеличения интенсивности излучения наноструктур вместе с уменьшением времен затухания ФЛ. Однако, чтобы наблюдать увеличение ФЛ, люминофор должен быть расположен на оптимальном расстоянии от МНЧ. Это обусловлено конкуренцией безызлучательного резонансного переноса энергии от люминофора к МНЧ, что приводит к тушению ФЛ, и ускорением излучательной релаксации за счет эффекта Парселла.

На первом этапе работы было проведено исследование влияния легирования атомами азота и серы на энергетическую структуру С-точек и кинетику релаксации носителей заряда, что в дальнейшем может быть использовано для контроля свойств С-точек при легировании гетероатомами. Для этого сольвотермальным методом [2] были синтезированы три образца С-точек с мочевиной, тиомочевиной и тиацетамидом в качестве источника гетероатомов, обозначенных далее как CD-u, CD-tu, and CD-ta, соответственно. Спектры поглощения и фотолюминесценции и кинетика затухания представлены на рис. 1. Видно, что присутствие гетероатомов в С-точках может приводить к изменению их оптических свойств, в частности, к появлению новых энергетических уровней.

Для того чтобы более детально исследовать процессы излучательной релаксации носителей заряда в синтезированных С-точках, мы провели спектрально разрешенные измерения кинетики затухания ФЛ (рис. 2а-в). Время затухания ФЛ, измеренное в узком спектральном диапазоне внутри полосы ФЛ, зависит от длины волны возбуждения. Этот факт подтверждает, что сигнал ФЛ исходит от С-точек, а не от молекул-красителей. В то же время кинетика затухания ФЛ является сложной и

меняется от образца к образцу. В случае CD-та время затухания ФЛ уменьшается с увеличением длины волны излучения, что может быть связано с влиянием ловушечных состояний на процессы релаксации фотовозбуждения. У CD-tu время затухания ФЛ повторяет форму полос поглощения и ФЛ. Похожие зависимости наблюдались у графеновых КТ [3]. Увеличение времени затухания ФЛ у CD-u с увеличением длины волны может быть связано с безызлучательным переносом энергии фотовозбуждения внутри С-точек.

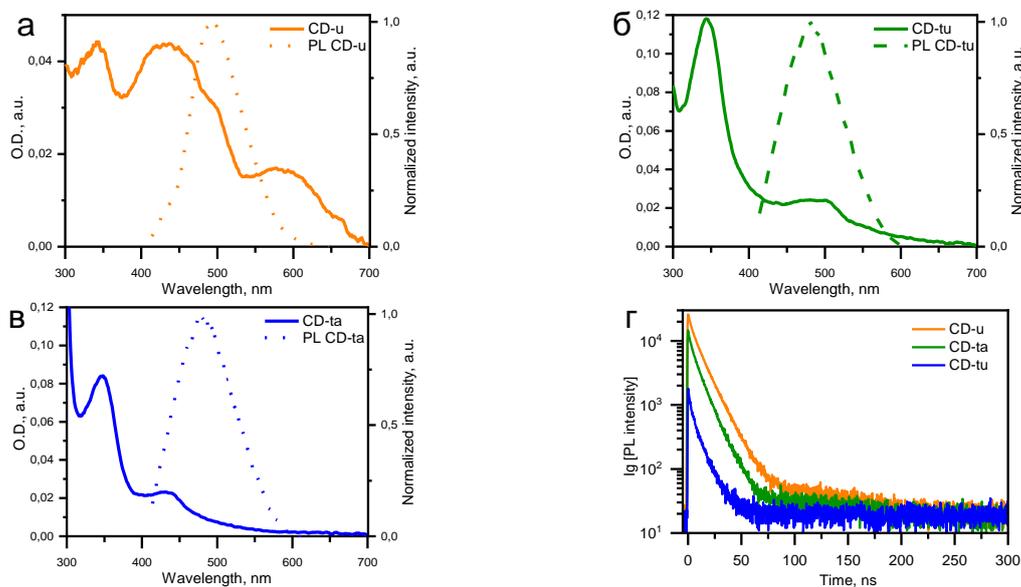


Рис. 1. Спектры поглощения и ФЛ (длина волны возбуждения 405 нм) углеродных точек CD-u (а), CD-tu (б) and CD-ta (в) и кривые затухания (г) всех образцов

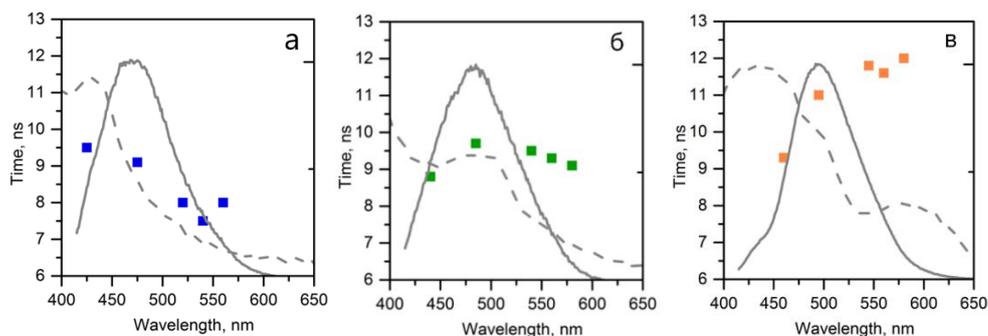


Рис. 2. Среднее время затухания ФЛ (квадраты), спектры поглощения (серая пунктирная) и ФЛ (серая сплошная) образцов CD-ta (а), CD-tu (б), and CD-u (в)

Таким образом, мы показали, что присутствие гетероатомов в С-точках приводит к изменению энергетической структуры вместе с изменением динамики носителей заряда. Однако физический механизм наблюдаемых оптических свойств требует дальнейших исследований.

До формирования комплексов, состоящих из С-точек и золотых НЧ, мы были заинтересованы в исследовании их взаимодействия в коллоидном растворе. Для достижения этой цели требовалось выбрать пару С-точек и золотых НЧ, которые соответствовали условиям резонанса: перекрытие полос ФЛ и плазмонного резонанса. Были выбраны два образца С-точек с разными спектральными характеристиками для того, чтобы выявить различия во взаимодействии с золотыми НЧ в растворе.

Интенсивность ФЛ обоих образцов С-точек CD-ca и CD-u уменьшилась с добавлением воды на большую величину, чем с добавлением золотых НЧ (рис. 3). Это может быть объяснено электростатическим взаимодействием между наночастицами в растворе, что привело к небольшому усилению ФЛ. Для дальнейших экспериментов были выбраны углеродные точки CD-u по причине большей области перекрытия спектров поглощения и ФЛ со спектром поглощения золотых НЧ.

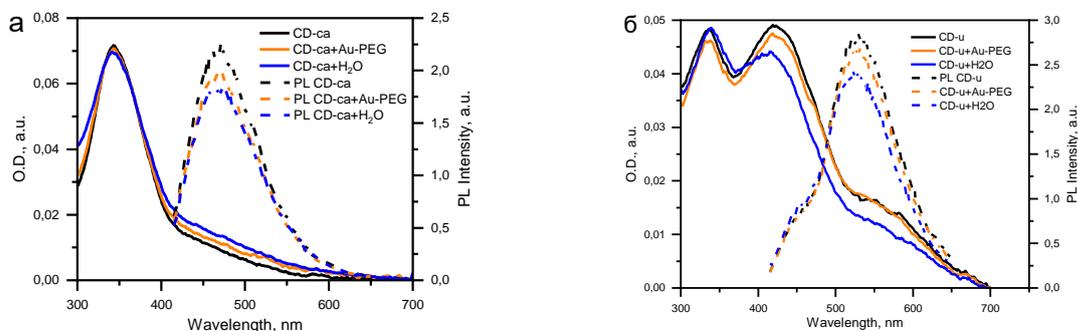


Рис. 3. Спектры поглощения и ФЛ CD-ca (а) и CD-u (б) с максимальными добавками воды и золотых НЧ

Далее мы выяснили условия усиления излучения люминесцентных наночастиц, ковалентно связанных с золотыми НЧ, на примере модельной системы на основе квантовых точек с люминесценцией в зеленой (QD1) и красной (QD2) областях спектра (рис. 4а,б). В качестве молекул лигандов были использованы три типа меркаптокарбоновых кислот различной длины (рис. 4в): 3-меркаптобензойная кислота (3-MBA), 6-меркаптогексановая кислота (6-MHA) и 11-меркаптоундекановая кислота (11-MUA). Комплексы были получены по процедуре, описанной в [4, 5], в результате чего было получено 6 образцов коллоидных растворов комплексов КТ-МНЧ и 2 образца чистых КТ для сравнения.

Для всех серий образцов большее усиление ФЛ наблюдалось для меньшей длины молекулы лиганда (рис. 4г). Для комплексов с зелеными КТ было достигнуто усиление ФЛ в 3 раза (рис. 4д) по причине того, что спектры поглощения и ФЛ были полностью в плазмонном резонансе золотых НЧ, в то время как у QD2 область перекрытия с плазмонным резонансом была только частичная. Средние времена затухания ФЛ практически не зависят от расстояния между наночастицами в комплексах. Это указывает на то, что взаимодействие между КТ и золотыми НЧ не влияет на скорость излучательной рекомбинации КТ. Следовательно, можно предположить, что усиление в основном вызвано эффектом локального поля, который влияет на поглощение КТ. Таким образом, нами было показано, что усиление ФЛ зависит от соблюдения резонансных условий и расстояния между металлической НЧ и люминофором.

В случае С-точек мы не можем использовать меркаптокарбоновые кислоты в качестве лигандов. Вместо этого мы можем связать частицы ковалентно с помощью реакции между 1-Этил-3-(3-диметиламинопропил)карбодиимидом (EDC) и N-гидроксисукцинимидом (NHS). Для этого мы выбрали золотые НЧ, стабилизированные цистеамином (Au-cys) и имеющие на свободном конце цепи аминогруппу. Наличие карбоксильных групп на поверхности С-точек было подтверждено по наличию характерных полос в ИК-спектре (рис. 5а). Формирование комплексов происходило в два этапа. Сначала раствор NHS в буфере смешивался с раствором Au-cys, а раствор EDC в буфере – с раствором С-точек CD-u. Затем оба раствора смешивались при температуре 37 °С. Из спектра поглощения, представленного на рис. 5б, можно заключить, что только малая часть всех золотых НЧ прореагировала с NHS и соединилась с CD-u, так как наблюдалось очень слабое увеличение оптической

плотности на длине волны 530 нм, соответствующей пику плазмонного резонанса. Интенсивность ФЛ, возбужденной на длине волны поглощения золотых НЧ, показывает такую же тенденцию, как и при возбуждении на других длинах волн (рис. 5в).

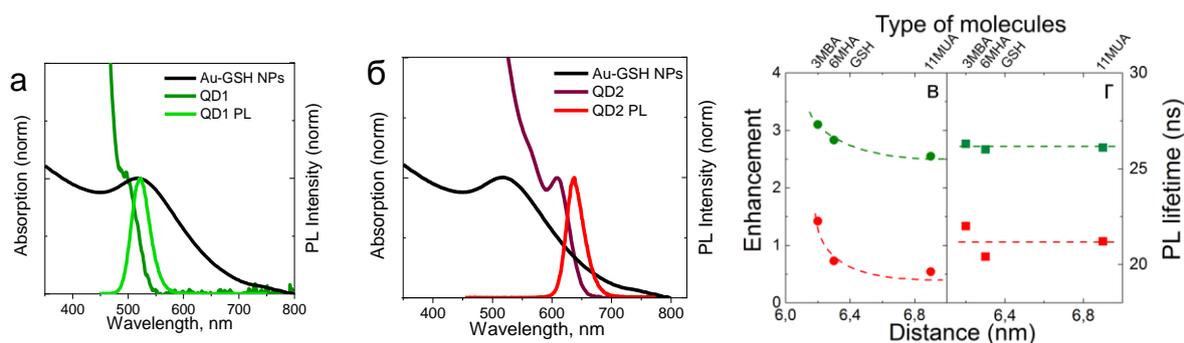


Рис. 4. Спектры поглощения и ФЛ QD1 (а), QD2 (б) и поглощения золотых НЧ; зависимость сигнала (в) и времени затухания ФЛ (г) от расстояния между центрами КТ и золотых НЧ

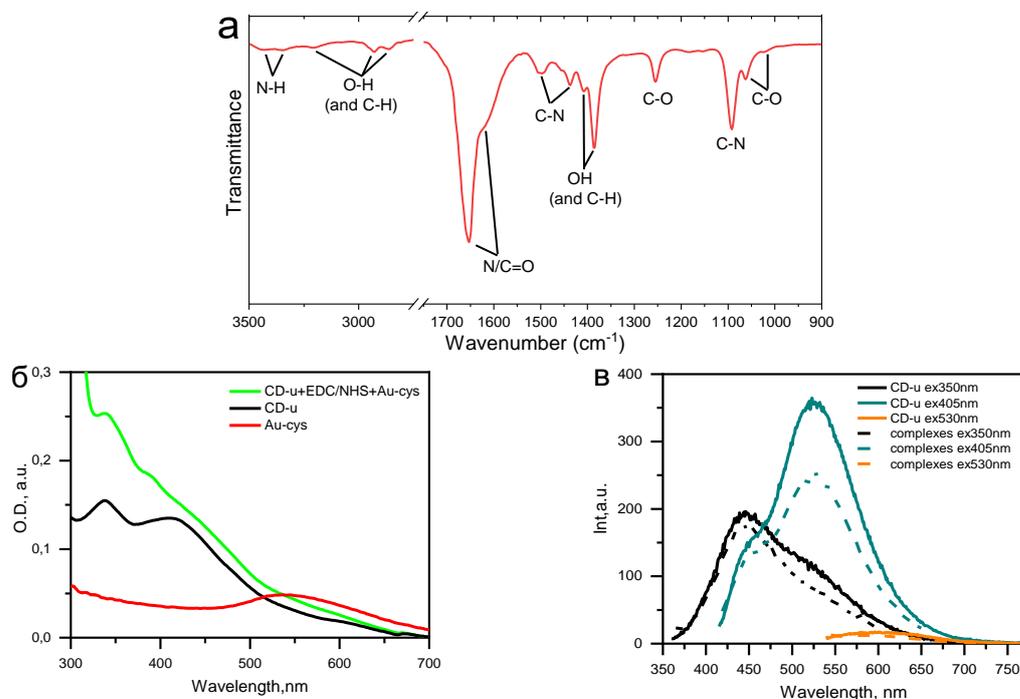


Рис. 5. FTIR спектр с химическими связями, соответствующими CD-u (а); спектры поглощения (б) и ФЛ (в) углеродных точек, золотых НЧ и комплексов

Другой подход к формированию комплексов основан на использовании матриц, в качестве которых могут выступать диэлектрические микросферы, при этом расстояние между частицами может меняться с помощью варьирования количества слоев полиэлектролитов.

Далее мы выбрали пористый диоксид кремния (SiO₂) в качестве матрицы для получения комплексов С-точек и золотых НЧ темплатным методом. Для этого были использованы микросферы SiO₂ с синтезированными внутри С-точками. Оптические свойства исходных компонентов комплекса представлены на рис. 6а. Измерения Z-потенциала показали, что С-точки в SiO₂ (CD@SiO₂) и золотые НЧ имеют сильный отрицательный заряд. Таким образом, компоненты гибридного материала должны быть

связаны посредством положительно заряженного полимера. Для достижения оптимальных оптических свойств концентрация золотых НЧ и расстояние до С-точек варьировались. Последнее контролировалось по количеству нанесенных слоев полиэлектролита. Было получено 12 образцов с 1, 3 и 5 слоями полиэлектролитов и концентрациями золотых НЧ в диапазоне от 0.1 до 1.0 от стокового раствора.

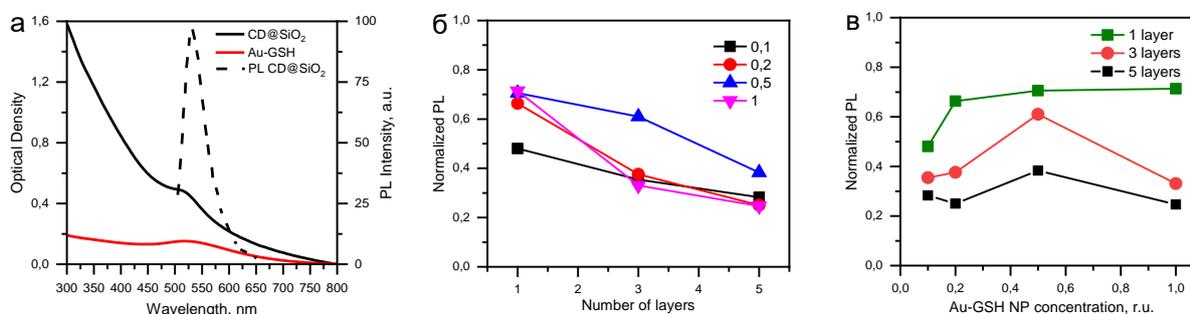


Рис. 6. Спектры поглощения и ФЛ CD@SiO₂ и поглощения золотых НЧ (а); зависимости интенсивности ФЛ от числа слоев полиэлектролитов (б) и концентрации золотых НЧ (в)

С увеличением расстояния между поверхностью CD@SiO₂ и золотых НЧ интенсивность ФЛ С-точек уменьшается. Наименьшая интенсивность ФЛ наблюдается в случае с наименьшей концентрацией золотых НЧ. Гибридные материалы с концентрацией золотых НЧ, равной 0.2 и 1.0, показывают схожие зависимости изменения интенсивности ФЛ от количества слоев. Наибольшая интенсивность ФЛ зафиксирована для 3 и 5 слоев полиэлектролитов с концентрацией золотых НЧ, составляющей 0.5 от стокового раствора. Мы показали, что темплатный метод является перспективным для формирования комплексов на основе С-точек и золотых НЧ с улучшенными оптическими параметрами, так как позволяет точно контролировать расстояние и концентрацию НЧ.

Таким образом, в работе были изготовлены новые гибридные материалы на основе С-точек/НЧ золота и детально исследованы их оптические свойства. Мы показали, что легирование гетероатомов влияет не только на оптические переходы, но и на динамику носителей заряда. Также в коллоидном растворе С-точки и НЧ золота могут взаимодействовать друг с другом, что приводит к более высоким значениям интенсивности ФЛ по сравнению с образцом С-точек в воде. На модельной системе на основе полупроводниковых КТ и НЧ золота было показано, что для получения улучшенных оптических свойств гибридных комплексов важны резонансные условия и контроль расстояния между компонентами. Подходы к образованию комплексов с использованием ковалентного связывания и с помощью мезопористых сфер SiO₂ в качестве матрицы являются многообещающими и требуют дальнейшего изучения.

Литература

1. Glazov M.M. et al. Purcell factor in small metallic cavities //Physics of the Solid State. 2011. Т. 53. №. 9. С. 1753.
2. Li D. et al. Near-infrared excitation/emission and multiphoton-induced fluorescence of carbon dots //Advanced materials. 2018. Т. 30. №. 13. С. 1705913.
3. Xiong Y. et al. Influence of molecular fluorophores on the research field of chemically synthesized carbon dots //Nano Today. 2018. Т. 23. С. 124-139.
4. Kormilina T.K. et al. Luminescence enhancement of alloyed quantum dots bound to gold nanoparticles by mercaptocarboxylic acids in colloidal complexes //Nanotechnology.

2019. Т. 30. №. 46. С. 465705.

5. Han B. et al. Polyethyleneimine modified fluorescent carbon dots and their application in cell labeling //Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2012. Т. 100. С. 209-214.



Ахмеров Артём Харисович

Год рождения: 1995
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
аспирант группы № 7764,
направление подготовки: 05.11.17– Оптические
и оптико-электронные приборы и комплексы,
e-mail: akakhmerov@itmo.ru



Васильев Александр Сергеевич

Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н. доцент,
e-mail: a_s_vasilev@itmo.ru

УДК 681.7; 004.932

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ
ЭРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН**

А.Х. Ахмеров

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.С. Васильев

Аннотация

Работа посвящена исследованию и разработке методики построения оптического тракта оптико-электронной системы эрозионного контроля лопаток паровых турбин. Выявлены и представлены основные геометрические соотношения. Разработана и представлена методика проектирования оптического тракта системы. На основе методики разработан экспериментальный стенд, подтверждающий ее работоспособность.

Ключевые слова

Видеоэндоскопирование, многоканальная видеосъемка, эрозионный контроль, дефектоскопия, комплексирование изображений, паровые турбины.

Паротурбинные установки нашли широкое применение в современной энергетике. Выход паровых турбин или их частей из строя может не только привести к поломкам и необходимости последующих трудоёмких ремонтных работ, но и угрожать жизни рабочего персонала, занимающегося обслуживанием установки. Лопатки являются одними из наиболее уязвимых и недоступных элементов турбины. В процессе эксплуатации они постоянно подвергаются тяжелым внешним воздействиям, связанным со столкновением поверхности лопаток с каплями крупнодисперсной влаги. В состав методов, которыми можно осуществлять контроль состояния лопаток, входят: визуальный осмотр при помощи технического видеоэндоскопа; вихретоковый метод; цветная дефектоскопия; магнитопорошковая дефектоскопия и другие. Недостатками визуального контроля являются отсутствие возможности идентификации конкретной лопатки в кадре, а также возможность человеческой ошибки при обнаружении и классификации дефектов. Основным недостатком остальных методов является

необходимость прямого контакта с поверхностью лопатки, которую невозможно удовлетворить, не прибегая к длительной остановке и демонтажу корпуса турбины [1, 2].

Для контроля состояния лопаток может быть использована опико-электронная система эрозионного контроля (ОЭСЭК). В основе принципа действия лежит введение устройства получения изображений (УПИ) в цилиндр турбины через специальные технологические отверстия. По мере того, как УПИ осуществляет многоканальную съёмку поверхностей лопаток, устройство синхронизации (УС) указывает порядковый номер лопатки, которая присутствует в кадре в конкретный момент времени. Синхронизация достигается за счёт последовательного измерения углового положения вала при помощи УС и соотнесения этой информации с позицией технологического отверстия в корпусе, через которое осуществляется ввод УПИ. Принцип действия ОЭСЭК изображён на рис. 1.

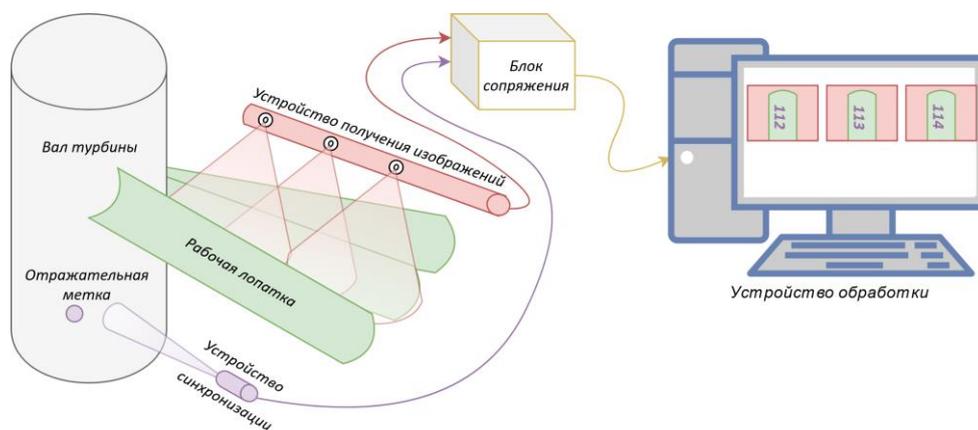


Рис. 1. Принцип действия опико-электронной системы эрозионного контроля

Многоканальное УПИ представляет собой несколько малогабаритных камер, заключенных в жесткую полую штангу, в которой проделаны отверстия для объективов. Съёмка ведётся одновременно для всех оптических каналов. Для каждой серии полученных изображений (под серией понимается совокупность кадров различных оптических каналов, сделанных в один момент времени) осуществляется привязка к порядковому номеру лопатки, находящейся в кадре. Из нескольких изображений в одной серии при помощи разноракурсного комплексирования формируются единые результирующие изображения, охватывающие большую часть поверхности лопатки [3, 4, 5].

При проектировании оптического тракта важно знать точное расположение технологического отверстия для ввода УПИ. Исходные геометрические параметры приведены на рис. 2.

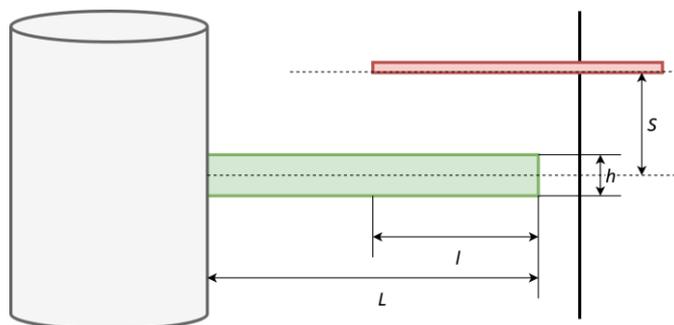


Рис. 2. Исходные геометрические параметры

Исходные геометрические параметры включают в себя: расстояние S от УПИ до плоскости, проходящей через центр глубины лопатки и перпендикулярной оптическим осям каналов УПИ; глубина лопатки h ; длина исследуемой части лопатки l ; длина лопатки L . Для текущего исследования предполагаем, что ось ввода УПИ лежит в плоскости, проведенной через центр вала, и параллельна плоскости его торцевой грани.

Видимый размер лопатки при этом будет отличаться для различных её поперечных сечений, в связи с изменением угла визирования по мере удаления от вала. Чтобы учесть это различие, введём поправочный коэффициент закручивания, связывающий максимальный видимый размер лопатки при перпендикулярности оптической оси канала УПИ к поверхности лопатки в обозреваемом сечении с текущим видимым размером при визировании под определенным углом. Скорректированный линейный видимый размер может быть найден следующим образом:

$$2y_k = 2y \cdot \tau,$$

где $2y_k$ – скорректированный линейный видимый размер хорды лопатки, $2y$ – видимый линейный размер хорды лопатки, τ – поправочный коэффициент закручивания. Поправочный коэффициент закручивания можно найти через отношение видимых угловых размеров:

$$\tau = \frac{2 \cdot \arctg\left(\frac{y}{S}\right)}{\arctg\left(\frac{y+S \cdot \sin \alpha}{S \cdot \cos \alpha}\right) + \arctg\left(\frac{y-S \cdot \sin \alpha}{S \cdot \cos \alpha}\right)},$$

где α – угол закручивания (угол между оптической осью канала УПИ и перпендикуляром к центру дуги лопатки в обозреваемом сечении).

Сформированы три основных требования к оптическим каналам, необходимые для функционирования всей системы и алгоритмов разноракурсного комплексирования изображений:

Требование 1: поле зрения оптического канала системы в плоскости, перпендикулярной оси ввода УПИ в турбину, должно полностью охватывать лопатку в поперечном сечении. Пояснительное изображение представлено на рис. 3.

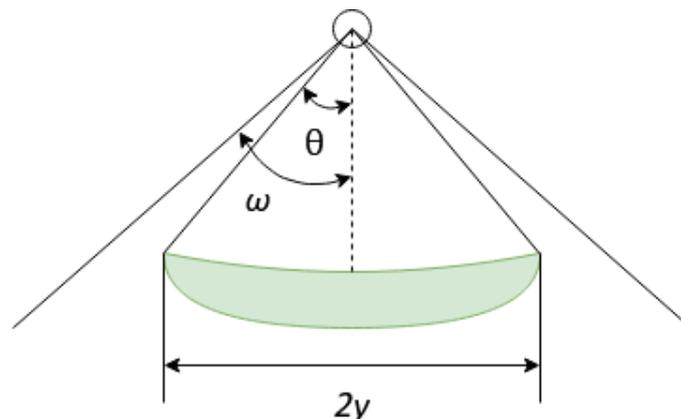


Рис. 3. Требование по полю зрения в поперечном сечении

На рис. 3 2ω – поле зрения оптического канала в поперечном сечении, $2y$ – линейный размер лопатки в поперечном сечении, 2θ – угловой размер лопатки в поперечном сечении, который можно вычислить следующим образом:

$$\theta = \arctg\left(\frac{2 \cdot R \cdot \sin \frac{\gamma}{2}}{S}\right),$$

где R – цилиндрический радиус лопатки в поперечном сечении, γ – угловой сектор лопатки в поперечном сечении. Требование 1 можно очень просто представить в математической форме: $2\omega \geq 2\theta$.

Требование 2: пересечение полей зрения соседних каналов должно составлять не менее 50%. Пороговая величина пересечения полей зрения была выявлена в рамках предшествующего исследования [6].

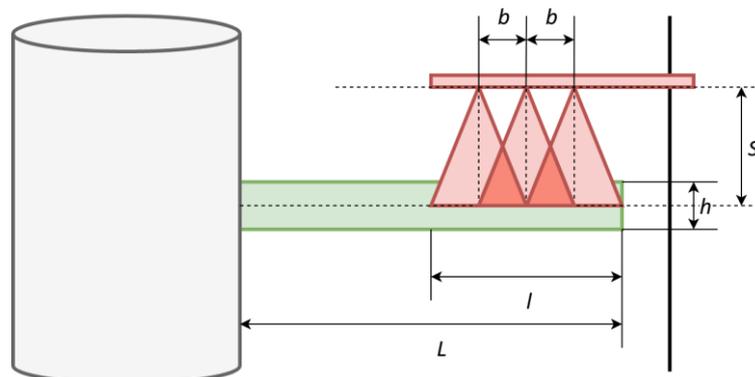


Рис. 4. Требование по пересечению полей зрения каналов в продольном сечении

Пересечение полей зрения может быть определено следующим образом:

$$\beta = 1 - \frac{b}{2 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \omega},$$

где β – пересечение полей зрения, b – расстояние между оптическими осями каналов УПИ. Математическое выражение требования 2: $\beta \geq 0,5$.

Требование 3: оптическая система канала должна обеспечивать резкое отображение всей поверхности лопатки. Другими словами, глубина всех точек поверхности лопатки должна находиться в пределах глубины резко изображаемого пространства (ГРИП). Требование 3 иллюстрировано на рис. 5.

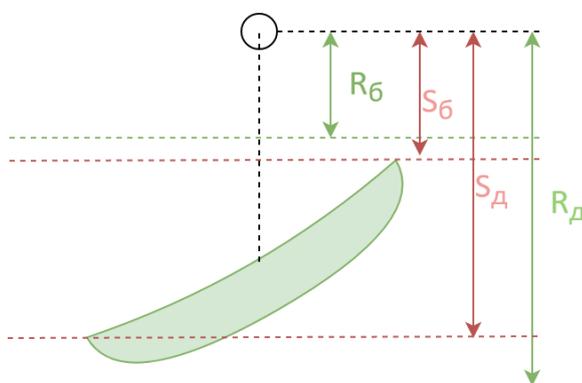


Рис. 5. Требование по глубине резко изображаемого пространства

Математическое выражение требования 3 выглядит следующим образом:

$$R_d \geq S_d; R_b \leq S_b,$$

где R_d , R_b – дальняя и ближняя границы ГРИП соответственно; S_d , S_b – дальняя и ближняя дистанции до лопатки.

На основе приведенных выше требований была сформирована методика проектирования оптического тракта ОЭСЭК.

1. Определить минимальное угловое поле зрения для захвата ширины лопатки:

$$\omega_{1min} = \frac{\arctg\left(\frac{R \cdot \sin\frac{\gamma}{2}}{S}\right)}{\tau}.$$

2. Выбрать объектив.
3. Рассчитать базовое расстояние между соседними каналами:

$$b = 2 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \omega_2 \cdot (1 - \beta).$$

4. Рассчитать необходимое количество оптических каналов (округлить в большую сторону):

$$K = \frac{l}{S \cdot \operatorname{tg} \omega_2} - 1,$$

где K – необходимое для покрытия всей контролируемой части лопатки количество оптических каналов.

5. Если необходимо, скорректировать выбор объектива и повторить.

Для проверки представленной методики был спроектирован экспериментальный стенд. Исходные параметры: $S = 115$ мм; $l = 300$ мм. Так как выбор видеоустройств сильно ограничен, проверка попадания лопатки в ГРИП не осуществлялась. Для стенда использованы два видеозондоскопа с полями зрения 76° в продольном сечении и 44° в поперечном сечении. В качестве устройства подсветки использована светодиодная лента. Фото стенда представлено на рис. 6.

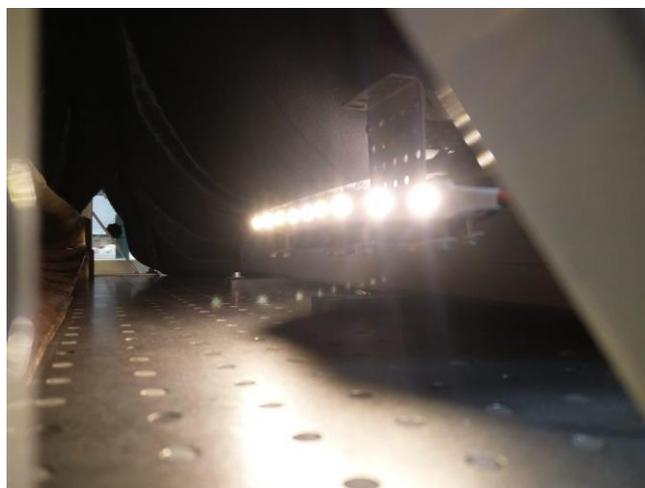


Рис. 6. Фотография экспериментального стенда

В соответствии с методикой рассчитаны следующие значения параметров экспериментального стенда: $\omega_{1\min} = 41,1^\circ$; $b_{расч.} = 84,2 \text{ мм}$; $b = 80 \text{ мм}$; $\beta = 55,5 \%$; $K = 2$. На рис. 7 представлены исходные изображения, полученные при помощи стенда, а также результат разноракурсного комплексирования.

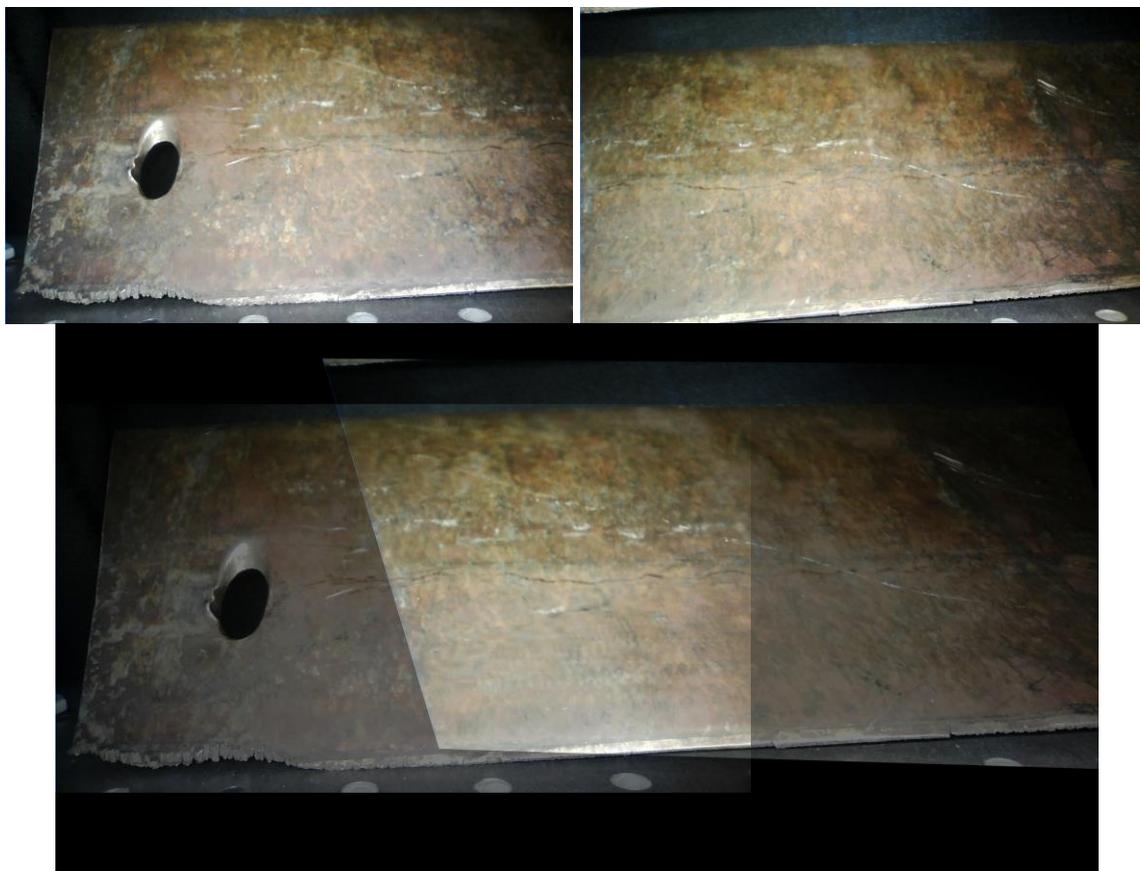


Рис. 7. Испытание стенда

Выводы

В рамках исследования определен перечень основных требований, предъявляемых к оптическому тракту ОЭСЭК. Сформирована основа методики проектирования оптического тракта ОЭСЭК. Методика испытана путём экспериментального исследования. Анализ результирующего изображения показал, что искажения формы кромок минимальны. Тем не менее, присутствует рассогласование (двоение) на изображениях участков пространства, расположенных дальше от УПИ. Эти искажения обусловлены параллаксом (при равном линейном смещении относительно оптической оси угловое смещение объектов, находящихся ближе к УПИ, будет больше, чем угловое смещение объектов, находящихся дальше). При проведении дальнейших исследований необходимо учесть наличие параллактических искажений либо продумать методы их минимизации и устранения.

Литература

1. РД 153-34.1-17.462-00 Методические указания о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта // РАО «ЕЭС России», введен 01.01.2001, дата актуализации 01.02.2020.

2. Данилин А.И., Чернявский А.Ж., Капустин А.С. Устройства диагностики и контроля деформационного состояния лопаток турбин в процессе их эксплуатации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. №3. с. 138-145.
3. Akhmerov A.K., Vasilev A.S., Vasileva A.V. Research of spatial alignment techniques for multimodal image fusion // Proceedings of SPIE – 2019. Vol. 11059, pp. 1105916. DOI: 10.1117/12.2526030.
4. Ахмеров А.Х. Возможности применения метода комплексирования изображений для измерения эрозионных дефектов лопаток паровых турбин // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2020. Т. 4. С. 18-24.
5. Mitchell N.B. Image Fusion: Theories, Techniques and Applications // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2010. ISBN 978-3-642-42503-5.
6. Ахмеров А.Х., Васильев А.С. Исследование критериев минимального перекрытия полей зрения оптических каналов для комплексирования изображений в составе оптико-электронного комплекса эрозионного контроля лопаток паровых турбин // XIV Международная конференция "Прикладная оптика-2020" (15-18 декабря 2020г.): сборник трудов конференции. 2020. С. 1. № 5.



Быков Дмитрий Иванович

Год рождения: 1998

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

студент группы № В41001с,

направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,

e-mail: dmitrii.bykov@itmo.ru

УДК 535-2

ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ СВЕТОФИЛЬТРОВ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АНОМАЛОСКОПА

Д.И. Быков

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Бахолдин

Работа выполнена в рамках темы НИР №620170 «Разработка методов и средств для решения прикладных задач опотехники и биоинженерии».

Аннотация

В данной работе исследуется оптический прибор аномалоскоп АН-59 (ГОИ). Излучение, проходящее через светофильтры, которые установлены в оптической системе данного прибора, должно иметь на хроматических диаграммах точки, расположенные на линиях цветонеразличения для различных аномалий цветового зрения.

Ключевые слова

Аномалоскоп, цветовое зрение, светофильтры, медицинские приборы, оптические материалы.

В настоящее время существуют два метода оценки качества цветового зрения. Первый метод именуется «пигментным», и его суть заключается в предъявлении пациенту объектов с заранее распечатанными карточками (буквы, фигуры, цифры), каждая из которых способна выявить различные отклонения цветового зрения и их степень тяжести. Второй метод – спектральный, с использованием специальных приборов, основным из которых является аномалоскоп. Данный прибор предназначен для быстрой и точной оценки цветового зрения. Он позволяет определить отклонения в работе всех трёх цветовых колбочек, а также выявить аномалии цветового зрения. В настоящее время аномалоскоп применяется при проведении медицинского освидетельствования для выполнения определённых типов работ, а также для определения стадии цветового расстройства у пациентов. Одной из существующих и уникальных моделей является аномалоскоп АН-59 (ГОИ), который рассматривается в данной работе. Конфигурация данного прибора имеет две ветви, именуемые «а» и «б» для удобства. Основным оптическим элементом в схеме, который непосредственно влияет на цвет излучения, является светофильтр. В ветви «а» установлено 4 светофильтра, в ветви «б» 4 систем светофильтров. Исследование проводится путём сравнения цветов полуполей. Спектральный состав ветви «б» изменяется пациентом посредством вращения барабанов, расположенных на приборе и имеющих 70 делений [1].

Целью данной работы является проведение подбора оптических материалов светофильтров, установленных в оптической системе аномалоскопа. Для этого

проводится экспериментальный анализ спектрального пропускания светофильтров, а также цветовые расчёты для определения точек на диаграммах цветности и непосредственный подбор современных оптических материалов, которые могут быть использованы в оптической системе прибора.

Экспериментальное исследование спектральной зависимости коэффициента пропускания проводится для всех четырнадцати светофильтров, которые установлены в АН-59. В качестве оборудования применяется спектрофотометр с монохроматором МДР-206. Результатом данного этапа работы являются численные и графические представления зависимости коэффициента пропускания светофильтров от длины волны. Получение таких зависимостей необходимо для дальнейшей идентификации материалов, из которых изготовлены элементы, а также для проведения цветовых расчётов, которые проводятся для каждого фильтра по отдельности и для системы фильтров в целом.

В ходе этапа проведения цветовых расчётов учитываются характеристики источника, которые берутся непосредственно из ГОСТ 7721-89 «Источники света для измерений цвета» [2]. В системе аномалоскопа используется источник типа «А». Для каждого из четырнадцати светофильтров находятся координаты цвета и цветности. Для системы фильтров же проводится аддитивное сложение цвета с введением понятия модуля цвета, который пропорционален площади светофильтров, вводимой в рабочую область прибора. Шаг дискретизации в данном случае будет равен делению на измерительном барабане прибора.

Графическое представление результатов расчёта важно при работе с цветовыми величинами, так как это помогает наглядно продемонстрировать то, как изменяется цвет, а также в какой области хроматической диаграммы располагается линия изменения цвета для каждого испытания. На рис. 1 представлена хроматическая диаграмма с изображённой на ней линией изменения цвета для испытания 1, которое направлено на выявление протанопии. Можно заметить, что для получения итогового цвета в сине-зелёной области требуется использование двух светофильтров с одинаковыми площадями, таким образом координаты цветности суммарного излучения располагаются посередине линии, соединяющей два исходных фильтра [3].

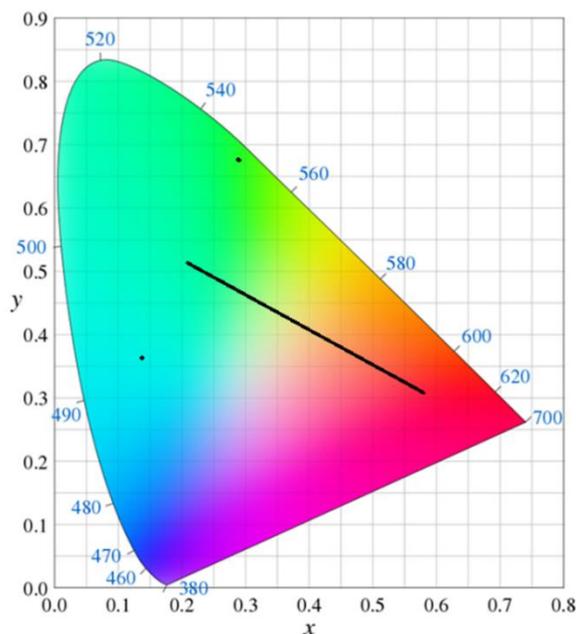


Рис. 1. Хроматическая диаграмма с визуальным представлением расчётов для испытания 1

Результаты расчётов позволяют провести подбор материалов, которые могут быть применены в современном аналоге прибора. Координаты цветности подходящих аналогов были взяты из каталога цветного стекла, изготавливаемого на сегодняшний день компанией ООО «Электростекло» [4]. В качестве критерия оценки возможности использования аналога было выбрано цветовое отличие, обозначаемое E [5]. Это математическое представление, которое позволяет численно выразить различие между двумя цветами. Для человеческого глаза цвета, согласно международному стандарту, разработанному совместно с международной комиссией по освещённости [6], ΔE которых меньше единицы, считаются неразличимыми, поэтому можно утверждать, что подобранные материалы могут быть использованы в качестве аналогов. В таблице представлены результаты подбора светофильтров.

Таблица

Результаты подбора материалов

Цвет фильтра	Координаты цветности фильтров в системе	Аналог из каталога ООО «Электростекло»	Цветовое отличие ($\Delta E \leq 1$ из ISO/CIE 11664-6:2014)
зелёный	$x = 0.29$ $y = 0.68$	ЖЗС12 $x = 0.28$ $y = 0.68$	$\Delta E = 0.21$
синий	$x = 0.17$ $y = 0.03$	СС4 $x = 0.17$, $y = 0.04$	$\Delta E = 0.47$
пурпурный	$x = 0.58$ $y = 0.33$	ПС7 ($x = 0.45$ $y = 0.35$) ПС8 ($x = 0.69$ $y = 0.32$) Суммарно: $x = 0.57$, $y = 0.335$	$\Delta E = 0.89$
сине-зелёный	$x = 0.14$ $y = 0.36$	СЗС22 $x = 0.16$ $y = 0.36$	$\Delta E = 0.13$
красный	$x = 0.715$ $y = 0.272$	КС15 $x = 0.720$ $y = 0.270$	$\Delta E = 0.19$
оранжевый	$x = 0.52$ $y = 0.48$	ЖС16 $x = 0.52$ $y = 0.46$	$\Delta E = 0.64$
синий	$x = 0.15$ $y = 0.04$	СС15 $x = 0.15$ $y = 0.05$	$\Delta E = 0.23$

На рис. 2. представлены хроматические диаграммы, на которых линиями отмечены исходные прямые (чёрные) изменения цвета для каждого испытания, а также прямые, которые получаются при замене светофильтров на аналогичные им (цветные) из таблицы.

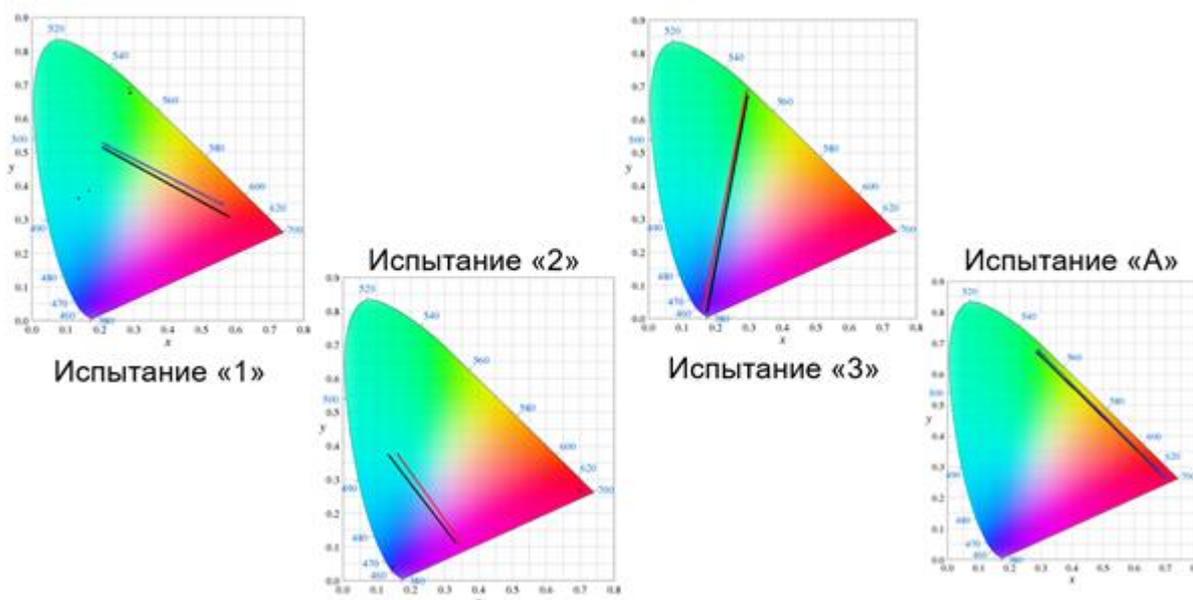


Рис. 2. Хроматические диаграммы для четырёх испытаний в аномалоскопе АН-59 (ГОИ)

В ходе работы были подобраны материалы светофильтров в оптической системе аномалоскопа. Для этого были измерены их спектральные характеристики на установке, состоящей из спектрофотометра с монохроматором МДР-206, рассчитаны координаты цвета и цветности, а также подобраны материалы-аналоги с учётом всех полученных данных. В работе был применён допуск на отклонение координат цветности от исходных линий на хроматических диаграммах. Для расчёта допуска было использовано цветовое отличие ΔE .

В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для проектирования приборов для выявления аномалий цветового зрения, а также для создания и использования компьютерных моделей.

Литература

1. Аномалоскоп : Модель АН-59 : Описание конструкции и методики работы / Всесоюз. объединение "Машприборинторг". Москва : Внешторгиздат [1963]. 24 с. : ил.
2. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Введён 28.06.89. М. : Изд-во стандартов. 1989. 19 с.
3. Быков Д.И. Применение компьютерной модели оптической системы аномалоскопа АН-59 для цветового исследования его режимов работы // Сборник трудов IX конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 15-18 апреля 2020г.). 2020.
4. Каталог продукции компании ООО «Электростекло» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elektrosteklo.ru/Catalog.htm> (дата обращения: 10.01.2021).
5. Онлайн-программа для расчёта цветового отличия «Delta-E calculator» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://colormine.org/delta-e-calculator>, своб.
6. ISO/CIE 11664-6:2014 Colour-difference formula.



Годовова Анастасия Сергеевна

Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы № L41752с,
направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика,
e-mail: anastasiagodovova@ya.ru



Плотников Михаил Юрьевич

Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н., с.н.с., доцент,
e-mail: mplotnikov@itmo.ru

УДК 681.787

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНА СХЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

А.С. Годовова, М.Ю. Плотников

Научный руководитель – к.т.н. М.Ю. Плотников

Работа выполнена в рамках темы №03.G25.31.0245 «Создание импортозамещающего производства волоконно-оптических морских сейсмических буксируемых кос, предназначенных для геофизических исследований, поиска и разведки месторождений углеводородов».

Аннотация

В работе представлены результаты математического моделирования динамического диапазона схемы обработки сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы. Установлено, что динамический диапазон схемы обработки сигналов уменьшается для полигармонических сигналов со сложным спектральным составом. Полученный результат требует внесения дополнительного запаса по динамическому диапазону в схему обработки сигналов для корректной регистрации волоконно-оптической косой сильных акустических сигналов в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова

Динамический диапазон, волоконно-оптические интерферометрические датчики, измерения гидроакустического давления, волоконно-оптическая буксируемая сейсмическая коса, полигармонический сигнал.

Объектом исследования является схема обработки сигнала с волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы. Коса осуществляет регистрацию искусственно возбуждаемых упругих сейсмических волн акустическими методами.

Волоконно-оптическая коса содержит 96 датчиков, каждый из которых представляет собой интерферометр Майкельсона. Для того, чтобы осуществлять опрос большого числа интерферометров с помощью минимального числа источников оптического излучения, интерферометры объединены (мультиплексированы) по времени в группы по 8 датчиков на одном оптическом волокне.

Интерференционный сигнал от каждого интерферометра регистрируют на фотоприемнике и демодулируют – т.е. производят ряд математических преобразований, получая на выходе обработки сигнал, пропорциональный измеряемому акустическому воздействию. Таким образом, становится возможной оценка величины гидроакустического воздействия по сигналу с волоконного интерферометра [1].

Полезный измеряемый сигнал можно охарактеризовать двумя основными параметрами – амплитудой и частотой. Динамический диапазон схемы обработки интерференционных сигналов уменьшается с увеличением амплитуды и частоты измеряемых сигналов, то есть существует сложность регистрации сильных и высокочастотных сигналов [1, 2].

Используемые в сейсморазведке акустические сигналы, как правило, представляют собой мощные импульсные высокочастотные сигналы. Как следствие, в ходе регистрации таких сигналов может возникнуть превышение уровня линейного динамического диапазона схемы обработки сигналов. Возникающее ограничение динамического диапазона обусловлено ограниченностью доступной ширины полосы частот интерференционного сигнала и определяется выбранной частотой опроса датчиков и частотой вспомогательной фазовой модуляции. При этом важным с точки зрения эксплуатации косы является анализ зависимости динамического диапазона схемы обработки при регистрации сигналов со сложным спектральным составом [2, 3].

С целью исследования динамического диапазона в волоконно-оптических датчиках при регистрации сигналов со сложным спектральным составом была реализована математическая модель схемы обработки в среде MATLAB.

В ходе моделирования была получена зависимость амплитуды выходного сигнала рассматриваемой схемы демодуляции от амплитуды и частоты измеряемого фазового сигнала. Она показала, что верхняя граница динамического диапазона увеличивается с уменьшением частоты измеряемого фазового сигнала. При ограничении динамического диапазона выходной сигнал искажается, поэтому при больших частотах и амплитудах выходной сигнал не соответствует измеряемому воздействию.

Следующим этапом моделирования была замена тонального измеряемого сигнала сигналом сложного спектрального состава. В ходе моделирования в интерференционный сигнал добавлялся дополнительный измеряемый фазовый сигнал с амплитудой D и частотой f , при этом оценивался динамический диапазон схемы как в случае единственного тонального сигнала, так и в случае сигнала со сложным спектральным составом. На рисунке представлены результаты моделирования. Таким образом, для полигармонических сигналов со сложным спектральным составом динамический диапазон схемы уменьшается с увеличением частоты и амплитуды добавочных спектральных составляющих измеряемого сигнала. Зависимость максимальной регистрируемой амплитуды сохраняется в виде обратной пропорциональности от частоты.

В результате исследования было установлено, что истинный динамический диапазон работы схемы демодуляции волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы для сигналов сложного спектрального состава меньше, чем для тонального сигнала. Полученный результат имеет большое практическое значение, которое заключается в том, что при наличии дополнительных помех в измеряемом сигнале, обусловленных, например, шумами буксировки косы, регистрируемые полезные сейсмические сигналы могут быть искажены из-за ограничений

динамического диапазона. Исследованный эффект необходимо учитывать при разработке действующих образцов волоконно-оптических буксируемых кос, закладывая дополнительный запас по динамическому диапазону в схему обработки сигналов.

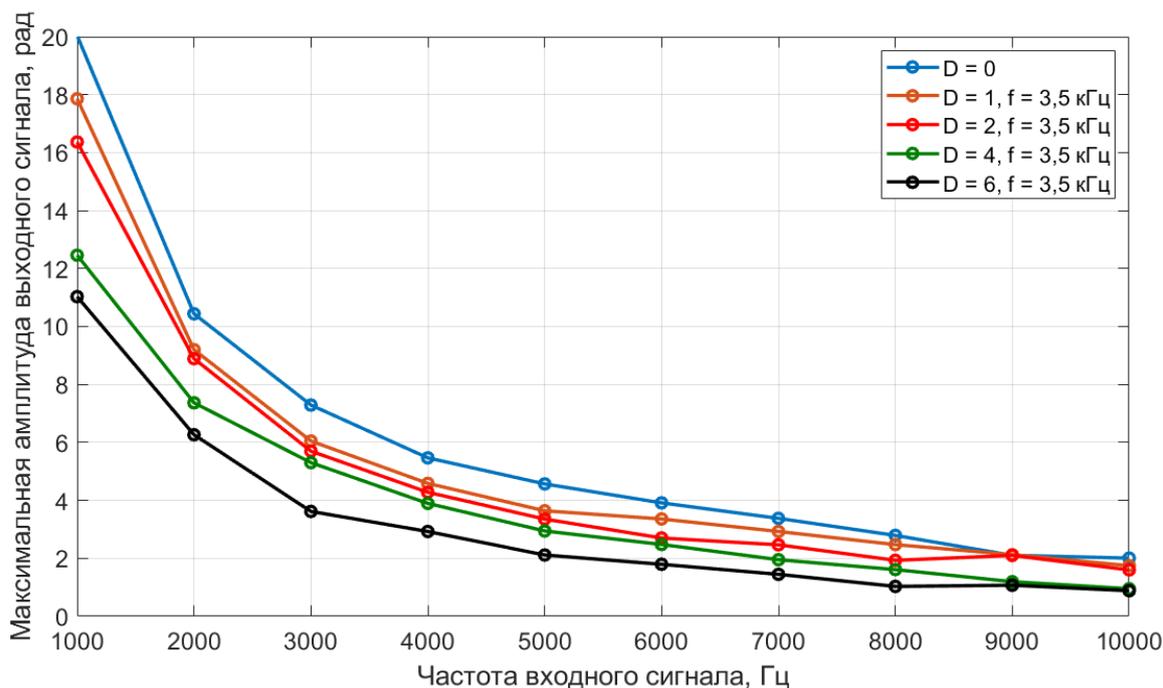


Рисунок. Зависимость максимальной амплитуды выходного сигнала от частоты измеряемого фазового сигнала

Литература

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера. 2008. 520 с.
2. Плотников М.Ю. Алгоритмы гомодинной демодуляции в фазовых волоконных акустооптических сенсорах: учебное пособие / Плотников М.Ю., Куликов А.В. СПб: Университет ИТМО. 2018. 60 с.
3. Yin Sh., Ruffin P. B., Yu F.T.S. Fiber Optic Sensors. Pennsylvania State University: CRC Press Taylor & Francis Group. 2008. 477 p.



Голобородько Людмила Игоревна

Год рождения: 1997

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

студент группы №В41005с,

направление подготовки: 12.04.02 – Прикладная оптика,

e-mail: ludagoloborodko@yandex.ru



Чертов Александр Николаевич

Год рождения: 1982

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

к.т.н., доцент,

e-mail: a.n.chertov@mail.ru

УДК 004.932, 681.78

**ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ**

Л.И. Голобородько

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Н. Чертов

Работа выполнена в рамках темы НИР «Исследование мультиспектральной оптико-электронной системы для диагностики цветных драгоценных камней».

Аннотация

В работе рассмотрены возможности применения систем мультиспектрального анализа для диагностики цветных драгоценных камней. Рассмотрены существующие технические решения задачи мультиспектрального анализа, конструктивные и программные. На основании проведенного исследования был сделан вывод о наиболее целесообразной конструкции системы с учетом специфики ее применения.

Ключевые слова

мультиспектральная съемка, гиперспектральная съемка, геммология, колориметрия, спектроскопия, микроскопия, цветные драгоценные камни.

Мультиспектральные системы анализа начали применяться повсеместно только последние 10-15 лет. Связано это, в первую очередь, с ростом вычислительной мощности компьютеров, а также с развитием технологий производства миниатюрных электронных компонентов. На данный момент мультиспектральные камеры являются быстрыми и компактными средствами исследования чего-либо, однако у каждой области применения своя специфика, которая определяет особенности построения и функционирования самой системы.

Актуальность работы обусловлена тем, что геммологическая диагностика в настоящее время является достаточно сложной задачей в силу большого разнообразия цветных драгоценных камней (ЦДК) и способов их облагораживания, их синтетических аналогов и подделок. Применение мультиспектрального метода

исследования может позволить упростить и унифицировать процесс диагностики цветных драгоценных камней.

Целью работы является определение принципов построения оптико-электронной мультиспектральной системы для диагностики цветных драгоценных камней с учетом особенностей этой задачи.

Системы мультиспектральной диагностики являются комплексными. Одной из критических составляющих является технология получения мультиспектрального снимка. Существуют различные технологии съемки мультиспектральных изображений, которые можно разделить на три группы: пространственное (линейное) сканирование, спектральное сканирование и одновременный захват информации (Snapshot).

В системах линейного сканирования камера записывает спектральную информацию последовательно для каждой последующей линии пространственных данных. Одной из первых была реализована съемка по линиям с диспергирующей призмой или решеткой. Данная технология хорошо адаптирована для дистанционного зондирования Земли и для анализа объектов на движущемся конвейере, позволяет получить высокое спектральное и пространственное разрешение, однако является дорогостоящей из-за имеющегося в составе диспергирующего элемента (свыше 20 тыс.\$). В промышленности чаще используются мультиспектральные системы, в которых применяется набор линейных детекторов, то есть фотоприемник состоит из нескольких полос датчиков с соответствующими им спектральными фильтрами. Обычно у таких систем 3-5 спектральных каналов, чего вполне достаточно для визуализации движущихся по конвейеру объектов, и такие системы значительно дешевле (примерно 4 тыс.\$ - 10 тыс.\$).

Также применяется нанесение фильтров непосредственно на сам КМОП-фотоприемник, что позволяет получить сравнимый по количеству и качеству с призмными системами объем информации. Такие системы миниатюрные, а их стоимость, за счет использования КМОП фотоприемников, составляет порядка 5 тыс. \$. По такой технологии работает матричный фотоприемник фирмы IMEC (Бельгия) [1], изображенный на рис. 1.



Рис. 1. Схема ПЗС-матрицы линейных детекторов фирмы IMEC

Технология спектрального сканирования, подразумевающая единовременный захват всей пространственной информации для каждого участка спектра, используется в тех случаях, когда не требуется перемещение камеры или объекта. Данная технология может быть реализована с помощью включения в систему барабана со светофильтрами, интерферометра или перестраиваемых фильтров.

Мультиспектральные системы с барабаном светофильтров крайне просты в реализации, но обеспечивают сравнительно небольшой набор спектральных каналов

(6-10). Барабан располагается чаще всего между объективом и объектом или между матрицей и объективом, как это показано на рис. 2. Ближайшим аналогом таких систем являются сканеры с мультиспектральными источниками [2], применяемые в таких сферах, как, например, криминалистика, дерматология, реставрация документов и т.д.



Рис. 2. Мультиспектральная камера фирмы Ocean Insight SpectroCam VIS с барабаном светофильтров

В тех областях, для которых важно высокое спектральное разрешение, находят применение системы, считывание спектра в которых производится при помощи интерферометра. Такие устройства имеют крайне высокую стоимость, большие габариты, и для работы с ними требуются экспертные навыки.

Широко распространены системы с перестраиваемыми фильтрами, обычно акустооптическими или жидкокристаллическими. Огромным преимуществом данной технологии является возможность изменения ширины и количества спектральных полос для решения конкретной задачи, однако такие системы являются довольно сложными. Компанией VTT (Финляндия) был разработан новый перестраиваемый фильтр с применением МЭМС технологии, работающий по принципу интерферометра Фабри-Перо. Применение такой технологии позволяет получить высокое спектральное разрешение и снизить стоимость и габариты конечного устройства.

В последнее время наблюдается высокий интерес к разработке мультиспектральных систем, способных одновременно производить съемку спектральной и пространственной информации (snapshot-системы). Слабым местом этой технологии является большой объем единовременно обрабатываемых данных, что приводит к снижению быстродействия системы. Это решается за счет либо снижения пространственного разрешения, либо уменьшения количества спектральных каналов [3]. Представленные на рынке мультиспектральные камеры фирм Parrot (рис. 3), Micasense и Sланtrange работают в видимом и ближнем ИК-диапазоне, считывая информацию с 4-5 матриц, соответствующих спектральным каналам. Такое решение является сравнительно недорогим (порядка 4-6 тыс.\$), и позволяет сделать саму систему компактной и прочной.



Рис. 3. Snapshot-камера Parrot Sequoia

Технология нанесения фильтров на фотоприемник также находит свое применение в snapshot-системах. Одним из вариантов реализации является нанесение ячеек по принципу фильтра Байера, но с 4 каналами. Другой вариант – использование мозаичного массива интерференционных фильтров Фабри-Перо совместно с матрицей микролинз, дублирующей изображение на каждый фильтр (ИМЕС).

Другой критической составляющей мультиспектрального анализа является технология обработки и анализа мультиспектральных данных. Набор программных средств для работы с такими изображениями сильно ограничен, так как чаще всего они заточены на обработку RGB изображений.

Задачами программных средств и алгоритмов обработки мультиспектральных изображений являются анализ спектральных каналов, вычисление статистики по каналам, кластеризация данных, идентификация объектов на изображении, взаимодействие с библиотеками спектральных характеристик.

Для работы с мультиспектральными изображениями вручную подходят некоторые специальные программные продукты (ERDAS ViewFinder, ENVI, ImageJ, Photoshop) и плагины. Они позволяют производить стандартные для графических пакетов операции над мультиспектральными изображениями, такие как, например, просмотр, фильтрация, настройка контраста, яркости, насыщенности и прочее.

Большинство существующих программ автоматической обработки мультиспектральных изображений ориентированы на попиксельную классификацию изображения без учета геометрических связей между пикселями. И для работы с изображениями объектов конечных размеров они не всегда подходят, так как возрастает влияние шумов. Однако в случаях, когда требуется выявление одного признака или построение модели неоднородного объекта с большим количеством значимых мелких деталей, применяются именно такие решения.

В настоящее время активно ведутся разработки способов распознавания и классификации протяженных объектов на мультиспектральных снимках, например, при помощи нейронных сетей или метода скользящего окна [4]. Сегментированное изображение даёт более удобную возможность последующей обработки, так как на изображении уже отсутствует резкий перепад яркости пикселей и однородные области представляют единое целое. Один из существующих подобных алгоритмов основан на анализе яркостно-цветовых признаков объекта по их координатам в различных цветовых пространствах. Для снижения влияния шумов эти признаки рассчитываются для непересекающихся блоков размером 20x20 пикселей, которые потом разделяются на несколько классов для построения морфологической карты исследуемого объекта.

Таким образом, имеется множество способов реализации мультиспектральных систем и методов обработки мультиспектральных изображений. Зная предмет исследования и условия работы системы, можно сделать выбор в пользу одного из вариантов.

В [5] были рассмотрены диагностические признаки цветных драгоценных камней и сделан вывод о том, что наиболее значимыми являются спектральные и микроскопические структурные особенности камня, такие как зональность окраски и включения в камне.

Процесс анализа драгоценного камня обычно происходит в лабораторных условиях, то есть в хорошо освещенном помещении при комнатной температуре $25 \pm 10^\circ\text{C}$, относительной влажности воздуха 45-80%, атмосферном давлении 630-800 мм рт. ст. с отсутствием резких перепадов температуры. Ко всем устройствам и приборам, используемым для анализа цветных драгоценных камней, применяется обязательное требование о неразрушающем воздействии на исследуемый образец.

Исходя из вышеописанных особенностей, можно сделать предположение о

наибольшей целесообразности использования схемы спектрального сканирования. Из рассмотренных в ходе данной работы вариантов реализации этой схемы наиболее подходящими для решения задачи выглядят система с барабаном светофильтров и система с перестраиваемыми фильтрами, так как они позволяют работать с разными наборами спектральных каналов. Однако для создания макета больше подходит система с барабаном светофильтров. Данная схема является модульной и содержит меньшее количество сложных электронных компонентов.

Далее стоит обратить внимание на то, что при диагностике драгоценного камня большое значение имеют зональность окраски, распределение микроскопических включений и их состав, а также наличие следов облагораживания камня (таких как склейка или пропитка). По причине возможности наличия большого количества мелких деталей в толще камня более целесообразным выглядит применение методов попиксельной классификации изображения на начальных этапах проведения исследований.

В результате выполнения данной работы была определена наиболее перспективная структура разрабатываемой системы для диагностики цветных драгоценных камней. По итогам проведенного исследования конструктивных решений задачи формирования мультиспектрального изображения были выявлены наиболее подходящие для решения поставленной задачи методы – система с барабаном светофильтров и система с перестраиваемыми фильтрами. Также было сделано предположение о наибольшей целесообразности попиксельной классификации изображения при его автоматической обработке.

Литература

1. Clémentine Bouyé, Thierry Robin, Benoît d'Humières «Spectral imaging spreads into new industrial and on-field applications» // SPIE 10539. Photonic Instrumentation Engineering V. 2018.
2. Миклас Х., Бреннер С., Саблатниг Р. «Мультиспектральная съемка для цифровой реставрации древних рукописей: устройства, методы и практические аспекты» // Историческая информатика. 2017. № 3. С. 116-134.
3. Hoyoung Lee, Soo Hyun Park, Sang Ha Noh, Jongguk Lim and Moon S. Kim «Development of a Portable 3CCD Camera System for Multispectral Imaging of Biological Samples» // Sensors. 2014. №14.
4. Синявский Ю.Н., «Методы и технология сегментации мультиспектральных изображений высокого разрешения для исследования природных и антропогенных объектов» / Синявский Ю.Н., Пестунов И.А., Дубровская О.А., Рылов С.А., Мельников П.В., Ермаков Н.Б., Полякова М.А. // Вычислительные технологии. 2016. Т.21. № 1.С. 127-140.
5. Голобородько Л.И., Чертов А.Н. «Исследование мультиспектральной системы для диагностики цветных драгоценных камней» // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО. 2020. С. 232-236.



Горбачев Станислав Александрович

Год рождения: 1996
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
аспирант,
направление подготовки: 05.17.06 – Технология
и переработка полимеров и композитов,
e-mail: stas89755@mail.ru



Зуев Вячеслав Викторович

Год рождения: 1961
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.х.н., доцент,
e-mail: vvzuev123@gmail.com

УДК 678.7

**ЭФФЕКТ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ
НА ФОРМИРОВАНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ В ДИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

С.А. Горбачев

Научный руководитель – д.х.н., доцент В.В. Зуев

Аннотация

В данном исследовании синтезированы потенциальные жидкокристаллические димерные системы. Методом ИК спектроскопии было исследовано влияние эффекта водородных связей на формирование жидкокристаллических димерных систем с различной долей водородных связей. Анализ эффекта водородных связей позволил оценить потенциальное жидкокристаллическое поведение.

Ключевые слова

Жидкокристаллические полимеры, водородная связь, органический синтез, димерные системы, термотропные полимеры, мезогенные фазы.

Полимерные жидкокристаллические материалы представляют собой обширный класс новых материалов, которые содержат мезогенные жидкокристаллические фазы. В настоящее время активно изучаются термотропные жидкокристаллические полимеры. Для обеспечения ЖК состояния в термотропных полимерных системах необходима высокая жесткость макромолекул, что может быть обеспечено введением мезогенных групп и жестких химических связей [1-2]. Задачей данного исследования является расширение числа жидкокристаллических полимеров и анализ эффекта водородных связей, влияющих на их формирование.

Формирование жидкокристаллического состояния может быть обеспечено несколькими способами. Одним из таких способов является водородное связывание. В данном исследовании для обеспечения бокового связывания был выбран мезогенный бифенил, а в качестве связи, которая позволяет осуществить водородное связывание, выбран уретановый фрагмент.

Синтез потенциальных жидкокристаллических систем осуществляли в несколько стадий [3]. По методу Вильямсона для придания плавкости будущей димерной системы вводили алифатическую группу, а также для формирования димерной системы вводили реакционно-способную группу. Схема синтеза показана на рис. 1.

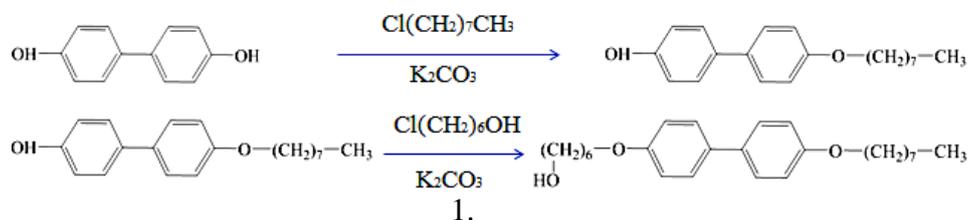


Рис. 1. Схема синтеза потенциальной жидкокристаллической системы по Вильямсону

Для формирования в димерной системе межцепных водородных связей вводили уретановый фрагмент. Образование димерной системы осуществляется путем связывания мезогенного бифенила гексаметилендиизоцианатом. Продукты связывания показаны на рис. 2.

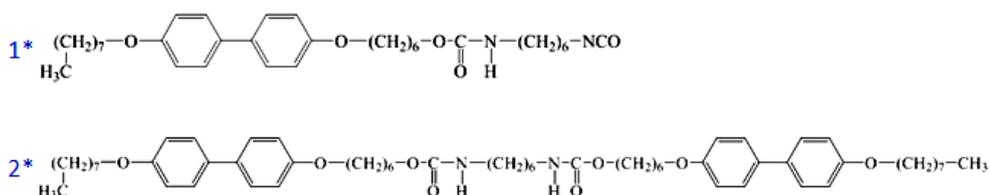


Рис. 2. Продукты связывания мезогенного бифенила гексаметилендиизоцианатом

Как показано на рис. 2, в процессе образования димерных систем были получены два соединения. Получена высокоплавкая система 2* (с температурой плавления 280 °С), в данной системе высокая доля водородного связывания препятствует образованию стабильного ЖК состояния. Понижение доли водородного связывания привело к получению продукта 1* (с температурой плавления 142 °С), в котором наблюдается образование смектообразной мезогенной фазы.

Систему водородных связей исследовали по ИК – спектрам карбонильных (3500 см⁻¹) и уретановых (1730-1701 см⁻³) групп. Долю водородных связей определяли по наличию свободных и связанных групп. ИК – спектры показаны на рис. 3.

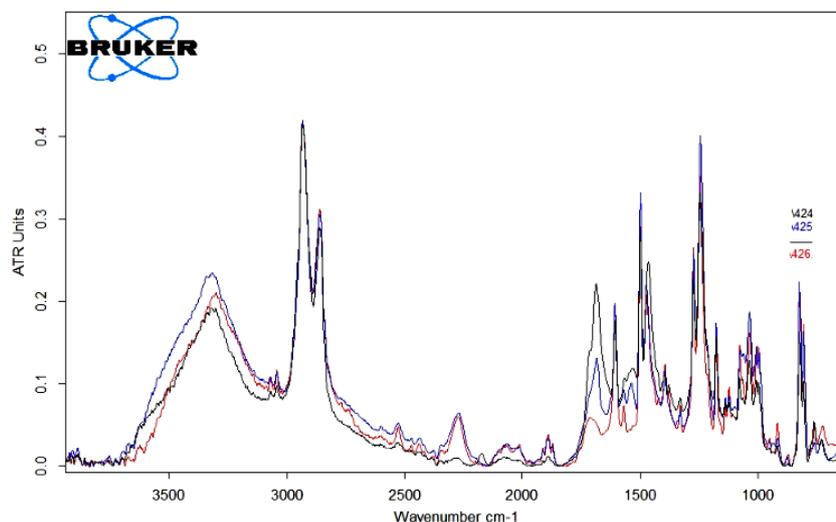


Рис. 3. ИК – спектры образцов 1* (425), 2* (424)

Из этого можно сделать вывод, что высокая доля связанных групп (образец 2*), препятствует формированию ЖК – состояния, а понижение доли связанных групп (образец 1*) приводит к образованию смектообразной мезогенной фазы.

Тип мезофазы образца 1* определяли методом поляризационной микроскопии. На рис. 4 показана текстура образца 1* со смектообразной мезогенной фазой (а) и характерная текстура смектической фазы (б).

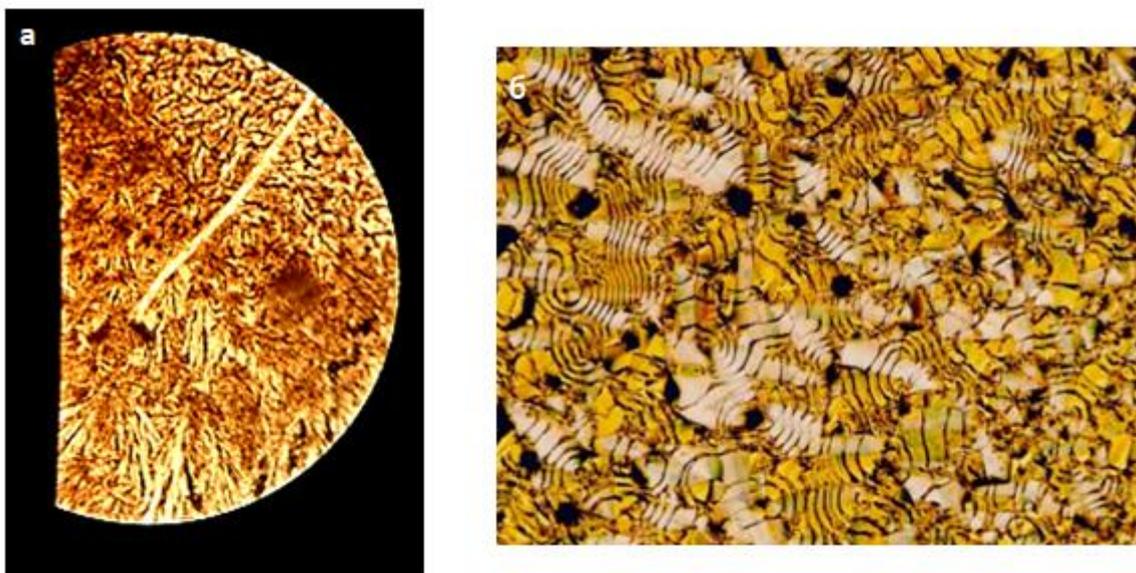


Рис. 4. а) Текстура смектообразной мезогенной фазы образца 1*,
б) Текстура смектической фазы

Таким образом, анализ ИК – спектров дает представление о том, что доля водородных связей влияет на формирование потенциальных ЖК систем, а именно высокая доля водородных связей препятствует образованию ЖК состояния. Микрофотография текстуры образца 1* подтвердила образование смектообразной мезогенной фазы.

Литература

1. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Либроком. 2013. 480 с.
2. DeMEUSE M.T., KISS G. Liquid crystal polymers as a reinforcement in high temperature polymer blends // Woodhead Publishing Limited. 2014. P. 141-164.
3. Corrie T. Imrie, Geoffrey R. Luckhurst Liquid crystal trimers. The synthesis and characterisation of the 4,4'-bis[v-(4-cyanobiphenyl-4'-yloxy)alkoxy]biphenyls // J. Mater. Chem. 1998. №8 (6). P. 1339-1343.



Иванова Татьяна Владимировна

Год рождения: 1973
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н, доцент,
e-mail: tvivanova@itmo.ru



Калинкина Ольга Сергеевна

Год рождения: 1994
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
аспирант,
направление подготовки: 05.11.07 – Оптические
и оптико-электронные приборы и комплексы,
e-mail: oskalinkina@itmo.ru



Куштысева Юлия Олеговна

Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики факультет,
студент группы №В41003с,
e-mail: julia.kushtyseva@gmail.com

УДК 535.317

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСФОКУСИРОВКИ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПО ФРТ**

Ю.О. Куштысева, О.С. Калинкина

Научный руководитель – к.т.н., доцент Т.В. Иванова

Работа выполнена в рамках темы НИР № 620170 «Разработка методов и средств решения прикладных задач оптотехники и биоинженерии».

Аннотация

В работе рассматривается алгоритм восстановления волнового фронта по известной функции рассеяния точки методом параметрической оптимизации. В качестве параметров оптимизации используются коэффициенты аппроксимации волнового фронта полиномами Цернике. Проанализировано влияние величины расфокусировки на сходимость метода в рассматриваемом алгоритме.

Ключевые слова

Функция рассеяния точки, пятно рассеяния, полиномы Цернике, оптимизация, абберации.

Введение

При изготовлении оптических систем важной задачей остается контроль качества изображения на этапе изготовления компонентов и юстировки системы. Возможным

методом решения данной задачи является интерферометрический контроль. Однако в некоторых случаях интерферометрический метод невозможно применить. Одним из таких случаев является осуществление юстировки телескопа в процессе его эксплуатации. Возможным решением является использование метода контроля по изображению известного объекта или по изображению звезды [1].

Методика контроля качества телескопа по пятну рассеяния широко известна, и кроме того, различные алгоритмы восстановления волнового фронта (в частности, методы восстановления фазы) по изображению точечного объекта получили широкое развитие в адаптивной оптике, голографии, микроскопии и других сферах. Некоторые алгоритмы восстанавливают волновой фронт в виде выборки значений, тогда как другие позволяют восстановить описывающие волновой фронт параметры (например, коэффициенты при полиномах Цернике).

Цель данной работы заключается в решении задачи восстановления параметров волнового фронта, а именно, коэффициентов при полиномах Цернике, методом параметрической оптимизации, по функции рассеяния точки (ФРТ), и анализе влияния расфокусировки оптической системы на сходимость метода.

Полиномы Цернике

Один из наиболее распространенных способов описания формы волнового фронта представляет собой разложение в ряд функции волновой аберрации, показывающей отклонение реальной формы волнового фронта от идеальной, по полиномам Цернике, образующим полную ортогональную систему на единичном круге [2]. Полиномы Цернике обладают наиболее простыми свойствами инвариантности, которые проявляются в том, что при повороте координатных осей вокруг центра каждый полином преобразуется в полином того же вида.

Разложение в ряд функции волновой аберрации представляется в виде (1):

$$W(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m c_{nm} R_n^m(\rho) \cos(m\varphi) + \sum_n \sum_m s_{nm} R_n^m(\rho) \sin(m\varphi), \quad (1)$$

где ρ и φ – зрачковые полярные канонические координаты, ($1 \geq \rho \geq 0$), n , m – неотрицательные целые числа, такие что $n + m$ – четное число, причем $n \geq m$; $R_n^m(\rho)$ – радиальные полиномы Цернике, зависящие только от ρ ; c_{nm} , s_{nm} – коэффициенты разложения.

Каждый полином Цернике можно соотнести с отдельным типом аберраций. Коэффициенты при полиномах позволяют количественно оценить соответствующие аберрации.

Следует отметить, что для достижения поставленной цели важным преимуществом полиномов Цернике является устойчивость к погрешностям вычислений в процессе компьютерного моделирования оптических систем или при осуществлении математической обработки результатов измерений.

Для анализа разъюстировки необходимо использовать коэффициенты, описывающие несимметричные аберрации – астигматизм и кому. Наибольший вклад в величину деформации волнового фронта вносят аберрации третьего порядка, в связи с этим в данной работе было решено ограничиться комой и астигматизмом третьего порядка, а именно, коэффициентами s_{31} , s_{31} для комы и s_{22} , s_{22} для астигматизма.

Восстановление полиномов Цернике по ФРТ

Восстановление полиномов Цернике по известной ФРТ является обратной задачей (т.е. более сложной) при моделировании оптических систем.

Для проверки метода в качестве известной ФРТ использовались смоделированные ФРТ, рассчитанные по заранее заданным коэффициентам аберраций (прямая задача). В

данном случае использовались коэффициенты c_{31} , s_{31} , c_{22} , s_{22} , а также c_{20} , отвечающий за расфокусировку. Затем к смоделированной ФРТ применялась параметрическая оптимизация (обратная задача), результатом которой являлись восстановленные коэффициенты при полиномах Цернике. Таким образом, можно легко сравнивать заданные при моделировании коэффициенты с коэффициентами, полученными в результате оптимизации (рис. 1).

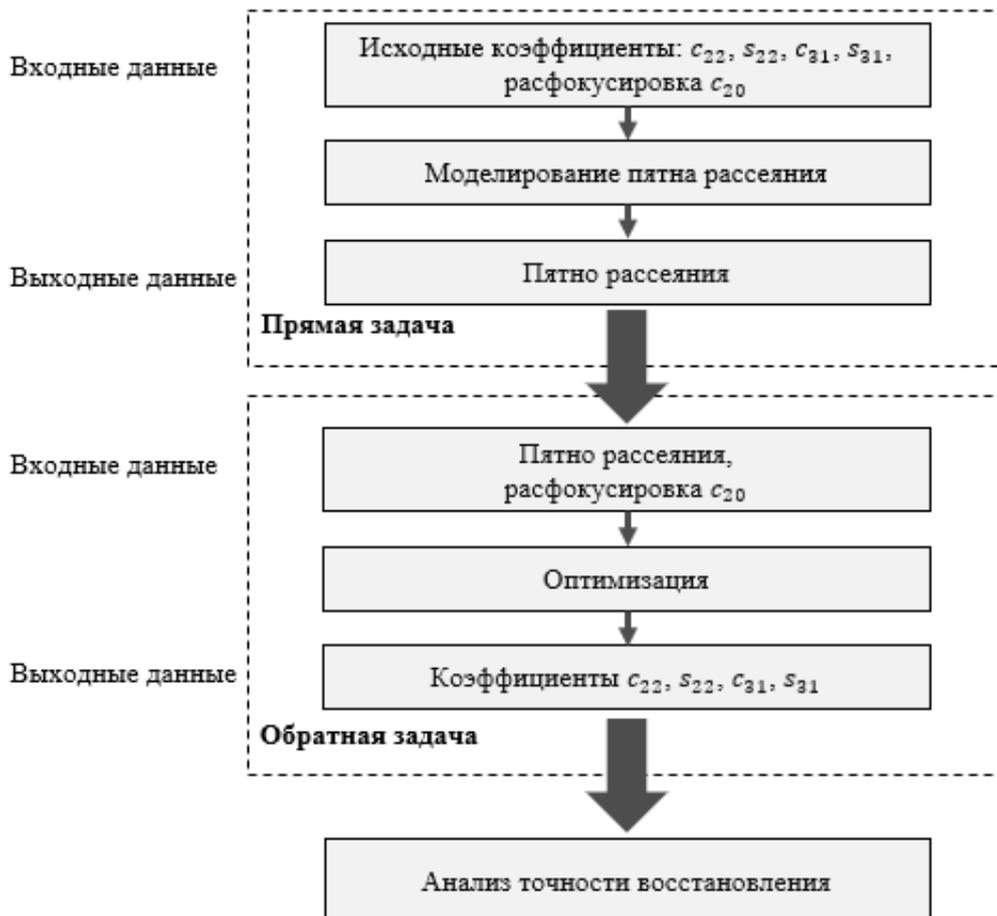


Рис. 1. Схема вычислений

В случае успешного восстановления заданные и полученные коэффициенты должны совпадать. При разнице коэффициентов менее чем 10^{-5} длин волн определение коэффициентов считалось успешным (2):

$$\begin{aligned}
 c_{22}' - c_{22} &\leq 10^{-5}\lambda, \\
 s_{22}' - s_{22} &\leq 10^{-5}\lambda, \\
 c_{31}' - c_{31} &\leq 10^{-5}\lambda, \\
 s_{31}' - s_{31} &\leq 10^{-5}\lambda,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где c_{31} , s_{31} , c_{22} , s_{22} – исходные коэффициенты, c_{31}' , s_{31}' , c_{22}' , s_{22}' – коэффициенты, полученные в результате оптимизации.

Задача оптимизации

Параметрическая оптимизация – это процесс нахождения значений параметров, при которых достигается минимум целевой функции. В данной работе искомыми параметрами являются коэффициенты при полиномах Цернике, а минимизируемая

функция (рис. 2) – среднеквадратическое отклонение (СКО) интенсивности в каждой точке референтной ФРТ от ФРТ, вычисляемой на каждом шаге оптимизации (3):

$$\frac{1}{2} \sum_{x'} \sum_{y'} \left\| h_{0_{x'y'}} - h_{x'y'}(c_{22}, s_{22}, c_{31}, s_{31}) \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $h_{0_{x'y'}}$ – референтное пятно рассеяния (функция рассеяния точки); $h_{x'y'}(c_{22}, s_{22}, c_{31}, s_{31})$ – пятно рассеяния на каждом шаге оптимизации; $c_{31}, s_{31}, c_{22}, s_{22}$ – коэффициенты при полиномах Цернике, описывающие астигматизм и кому.

Для численного решения задачи использовалась библиотека C++ с открытым исходным кодом Ceres Solver [3].

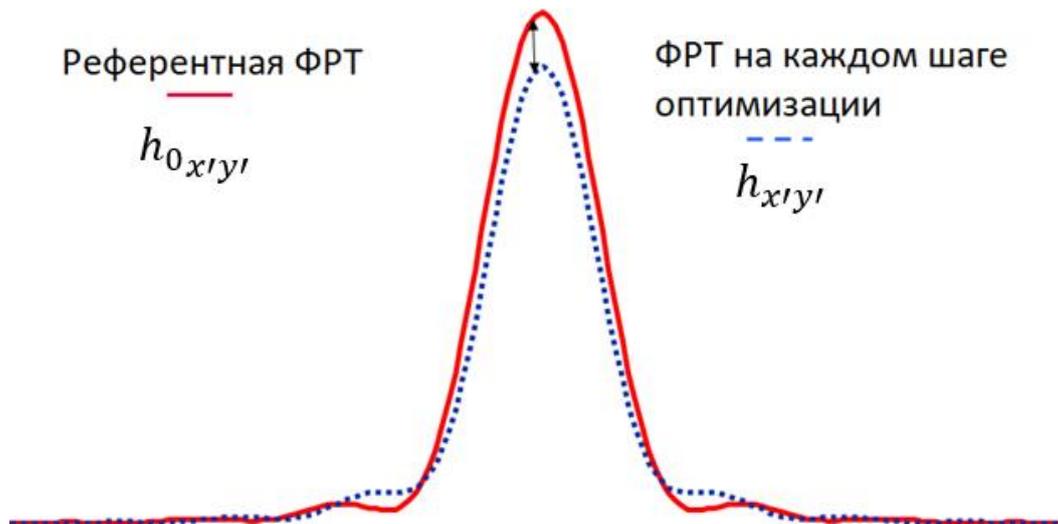


Рис. 2. К вычислению минимизируемой функции

Определение плоскости наилучшей установки (ПНУ)

Анализ работы алгоритма на смоделированных ФРТ, выполненный на начальном этапе, показал, что алгоритм может приводить к неправильному определению знаков коэффициентов. В отдельных случаях алгоритм может расходиться. Ввод заранее известной расфокусировки улучшил сходимость алгоритма. Результатом стало верное нахождение знака астигматизма и успешное восстановление коэффициентов при полиномах Цернике для большего количества ФРТ, смоделированных различными наборами четырех основных коэффициентов [4].

При работе с реальными зарегистрированными изображениями известным параметром является отклонение от плоскости наилучшей установки (ПНУ) Δz , определенной в процессе регистрации с некоторой точностью, что можно использовать в качестве устранения неоднозначности в определении расфокусировки. ПНУ определялась по вычисленной на основе ФРТ частотно-контрастной характеристике.

Коэффициент расфокусировки c_{20} можно вычислить следующим образом:

$$c_{20} = c_{20_{\text{ПНУ}}} + \Delta c_{20}, \quad (4)$$

где $c_{20_{\text{ПНУ}}}$ – коэффициент расфокусировки в ПНУ; Δc_{20} – отклонение коэффициента от ПНУ.

Таким образом, отклонение коэффициента от ПНУ является известной величиной, а коэффициент расфокусировки в ПНУ становится еще одним параметром оптимизации.

Исследование влияния расфокусировки на сходимость метода

Для поиска оптимальной величины отклонения коэффициента от ПНУ Δc_{20} промоделировано и проанализировано примерно 15000 вариантов комбинаций четырех основных определяемых коэффициентов (c_{31} , s_{31} , c_{22} , s_{22}). Величина каждого коэффициента генерировалась случайным образом в диапазоне от $-0,5$ до $0,5\lambda$. При такой генерации общее СКО волнового фронта будет в диапазоне от 0 до $0,4\lambda$.

В табл. 1-3 в качестве примеров показаны области восстановления для нескольких наборов исходных коэффициентов комы и астигматизма с одинаковой величиной СКО.

Таблица 1

Области восстановления для СКО = 0,133853

Исходные коэффициенты [λ]				Расфокусировка относительно границ глубины резкости Δc_{20} [λ]										
c_{22}	s_{22}	c_{31}	s_{31}	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	-0,1	-0,3	-0,2											
0,0	-0,1	-0,3	0,2											
0,0	-0,1	-0,2	-0,3											
0,0	-0,1	-0,2	0,3											

При выполнении моделирования значение СКО равное 0,133856 стало первым, при котором появились области с невозстановившимися значениями.

Таблица 2

Области восстановления для СКО = 0,305505

Исходные коэффициенты [λ]				Расфокусировка относительно границ глубины резкости Δc_{20} [λ]										
c_{22}	s_{22}	c_{31}	s_{31}	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
-0,5	-0,5	-0,2	-0,2											
-0,5	-0,5	-0,2	0,2											
-0,5	-0,4	-0,4	-0,2											
-0,5	-0,4	-0,4	0,2											
-0,5	-0,4	-0,2	-0,4											
-0,5	-0,4	-0,2	0,4											
-0,5	0,4	-0,2	0,4											
-0,5	0,5	-0,2	0,2											
-0,4	-0,5	-0,4	0,2											
-0,4	-0,5	-0,2	-0,4											
-0,4	-0,4	-0,4	-0,4											
-0,4	-0,4	-0,4	0,4											
-0,4	0,5	-0,4	-0,2											
-0,4	0,5	-0,2	0,4											

При значении СКО больше чем 0,305505, появляются такие сочетания исходных коэффициентов, при которых восстановление будет происходить только для одного значения расфокусировки из представленных в таблицах. С увеличением значения СКО количество таких сочетаний также будет расти.

Таблица 3

Области восстановления для СКО = 0,381881

Исходные коэффициенты [λ]				Расфокусировка относительно границ глубины резкости $\Delta c_{20}[\lambda]$											
c22	s22	c31	s31	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
-0,5	-0,5	-0,5	-0,5												
-0,5	-0,5	-0,5	0,5												
-0,5	-0,5	0,5	-0,5												
-0,5	-0,5	0,5	0,5												
-0,5	0,5	-0,5	-0,5												
-0,5	0,5	-0,5	0,5												
-0,5	0,5	0,5	-0,5												
-0,5	0,5	0,5	0,5												
0,5	-0,5	-0,5	-0,5												
0,5	-0,5	-0,5	0,5												
0,5	-0,5	0,5	-0,5												
0,5	-0,5	0,5	0,5												
0,5	0,5	-0,5	-0,5												
0,5	0,5	-0,5	0,5												
0,5	0,5	0,5	-0,5												
0,5	0,5	0,5	0,5												

При значениях СКО больше, чем 0,35 можно наблюдать влияние коэффициента, соответствующего коме. В табл. 3, например, восстановление волнового фронта происходит либо при положительных значениях отклонения коэффициента расфокусировки, либо при отрицательных.

Ячейки табл. 1-3, соответствующие областям успешного восстановления, отмечены цветом. Хорошо видно, что области восстановления отличаются при одинаковом СКО, и зависят от конкретного набора коэффициентов.

В реальных условиях получение изображений с различной расфокусировкой не является трудоемкой задачей, поэтому возможен поиск подходящей фокусировки перебором различных положений плоскости изображения.

Вывод

Представленный в работе метод предназначен для определения параметров волнового фронта по функции рассеяния точки. использование расфокусированных ФРТ оказывает влияние на стабильность работы алгоритма. При проведении вычислений в диапазоне расфокусировок от $-0,5\lambda$ до $0,5\lambda$ (с шагом $0,1\lambda$), т. е. для пятен с одинаковым набором искомым коэффициентов, но разным значением фокусировки, будет как минимум одно положение, при котором искомые коэффициенты успешно определяются.

Литература

1. Оптический производственный контроль / Под ред. Малакары Д.; Пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др.; Под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение. 1985. 400 с.
2. Bezdidko S.N. Theory of orthogonal aberration and its use in lens design // Optical Review. 2014. V. 21. N 5. P. 1-7.
3. Ceres Solver – A Large Scale Non-linear Optimization Library [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ceres-solver.org/>. (дата обр. 05.12.2020).
4. Kalinkina O., Ivanova T., Kushtyeva J. Wavefront Parameters Recovering by Using Point Spread Function // Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision Saint Petersburg, Russia, September 22-25, 2020.



Калугин Евгений Эдуардович

Год рождения: 1995

Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
аспирант,
направление подготовки: 05.11.01 – Приборы и методы
измерений (по видам измерений),
e-mail: znabyaklg@gmail.com



Аксарин Станислав Михайлович

Год рождения: 1987

Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.ф.-м.н.,
e-mail: sm_aksarin@itmo.ru



Алейник Артем Сергеевич

Год рождения: 1985

Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н.,
e-mail: artemal@itmo.ru



Умнова Ангелина Валерьевна

Год рождения: 1994

Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
инженер,
e-mail: angelina_umnova@rambler.ru

УДК 235-92

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГЕРМЕТИЗАЦИИ АНИЗОТРОПНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В УЗЛЕ
ГЕРМЕТИЗАЦИИ**

**Е.Э. Калугин, А.С. Алейник, А.В. Умнова
Научный руководитель – к.ф.-м.н. С.М. Аксарин**

Работа выполнена в рамках темы НИР №219951 «Разработка волоконно-оптического гироскопа для контрольно-измерительных устройств в наземных транспортных системах».

Аннотация

В ходе работы была разработана экспериментальная установка для запайки

анизотропных оптических волокон в металлической трубке при помощи преформы стеклоприпоя и индукционного нагревателя. Проведено исследование влияния запайки стеклоприпоем в коваровой трубке анизотропного оптического волокна на связь поляризационных мод. Выявлено, что при формировании гермовывода волокон в области запайки в анизотропном оптическом волокне коэффициент поляризационной экстинкции увеличивается от -65 дБ до -33 дБ.

Ключевые слова

Оптическое волокно, стеклоприпой, ковар, коэффициент поляризационной экстинкции, связь поляризационных мод, гермовывод.

Введение

Главным отличием анизотропных от изотропных оптических волокон (ОВ) заключается в способности сохранения введенного линейного состояния поляризации. АОВ примечательны для использования при создании волоконно-оптических интерферометрических датчиков, таких как волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), т.к. обладают высокой чувствительностью и, как следствие, точностью, а также помехоустойчивостью [1-3].

Второй составляющей ВОГ является многофункциональная интегрально-оптическая схема (МИОС), которая используется в качестве поляризатора, разветвителя и модулятора оптического сигнала. Принцип работы данных устройств основан на оптических свойствах полупроводниковых кристаллов, таких как кристалл ниобата лития. Оптические свойства полупроводниковых кристаллов меняются в зависимости от прикладываемого электрического напряжения, наличия водяных паров в окружающей среде, изменения температуры и газового состава окружающей среды. Для сохранения стабильной работы интегрально-оптических схем и, как следствие ВОГ, необходимо сохранение условий среды в течение всего срока службы. В связи с этим стоит вопрос о герметизации МИОС используемых в неблагоприятных условиях.

Целью данной работы является исследование влияния запайки стеклоприпоем в коваровой трубке анизотропных ОВ на связь поляризационных мод.

Подготовка к исследованию

Для тестирования метода запайки оптического волокна в пропускной трубке из ковара (сплав 29НК) был разработан индукционный нагреватель, который разогревал коваровую трубку а, та в свою очередь, плавил преформу стеклоприпоя. Индукционный нагреватель работает в режиме коммутации при нулевом напряжении (ZVS - zero voltage switch).

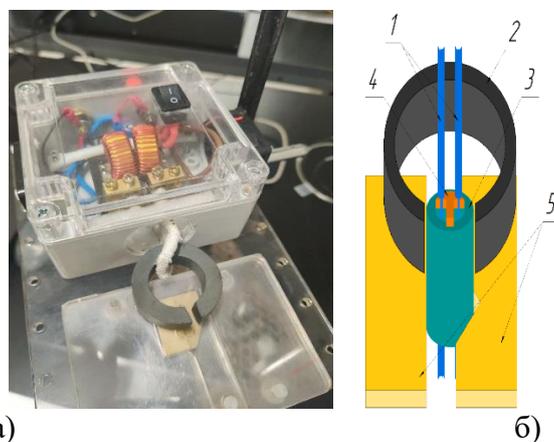


Рис. 1. а) Фото индукционного нагревателя в сборе, б) Общая схема запайки:
1 – оптические волокна, 2 – ферритовое кольцо, 3 – коваровая трубка, 4 – преформа
стеклоприпоя, 5 – керамические зажимы

В используемом нагревателе индуктор состоит из одного витка медного провода, намотанного на ферритовый тороидальный сердечник с зазором, внутрь которого помещается коваровая трубка для нагрева. Магнитное поле, возникающее вокруг витка индуктора, замыкается через тороидальный ферритовый сердечник и трубку, расположенную в зазоре. В трубке наводятся вихревые токи, которые разогревают её под действием тепла Джоуля, сообщаемое стеклянной преформе. Максимальная мощность нагревателя 120 Вт. Мощность нагрева регулируется входным напряжением схемы (максимум 12 В) и обеспечивает нагрев трубки до 300°C. На рис. 1 показаны фото индукционного нагревателя в сборе и общая схема запайки.

Для проведения исследования использовались трубки из ковара и Т-образные преформы стеклоприпоя, подходящие для запайки двух волокон в металлической трубке. Температура плавления преформ стеклоприпоя 200-230°C. Материалы данных компонентов выбирались как наиболее близкие по коэффициенту термического расширения (КТР) к кварцу, из которого изготавливаются ОВ: КТР кварца $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ковара $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, стеклоприпоя $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. На рис. 2 представлены габариты используемых компонентов.

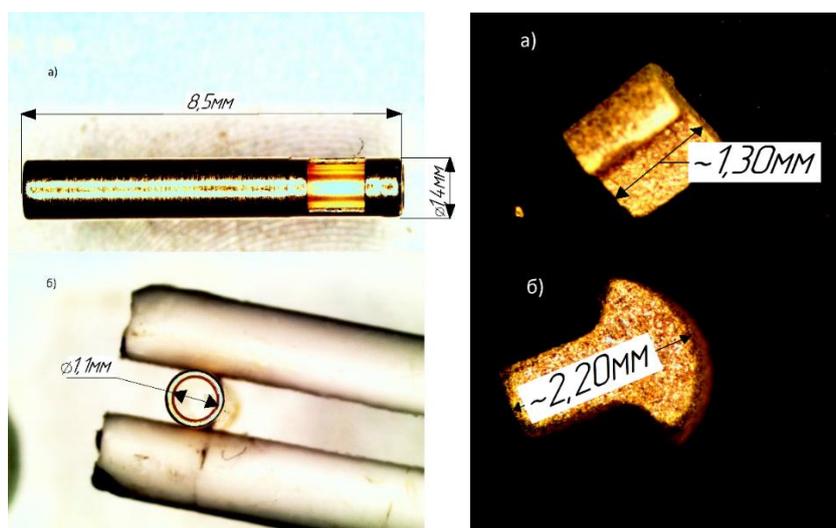


Рис. 2. Габариты коваровой трубки и преформы стеклоприпоя: а) вид сбоку, б) вид с торца

Изготовление образцов

Для изготовления образцов использовалась оснастка из керамики и органического стекла во избежание искажения векторов силовых линий магнитного поля индуктора.

Трубка крепилась вертикально, два волокна зачищались до кварцевого основания на длину около 10 мм и помещались в трубку таким образом, чтобы «голый» участок волокон находился в месте запайки. Преформа стеклоприпоя располагалась между волокнами на торце трубки при помощи пинцета.

В ходе исследования было подготовлено 4 образца. Все различия образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Отличительные особенности полученных образцов

№ образца	Длина ОВ, м	Кол-во ОВ	Метод центрирования ОВ
1	0,6	1	Неподвижно-свободно

продолжение таблицы

№ образца	Длина ОБ, м	Кол-во ОБ	Метод центрирования ОБ
2	4	2	Неподвижно-грузик
3	4	2	Позиционер-грузик
4	4	2 (уцелело одно)	Позиционер-Позиционер

Методика исследования

Для анализа величины коэффициента поляризационной экстинкции (PER – polarization extinction ratio) в исследуемых образцах использовалась методика широкополосной интерферометрии. С помощью данной методики можно добиться высокой точности в определении места локального преобразования в оптическом тракте, а по амплитуде дать оценку величине PER [2]. В настоящей работе с использованием сканирующего интерферометра Майкельсона с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных поляризационных мод исследуемого образца (рис. 3).

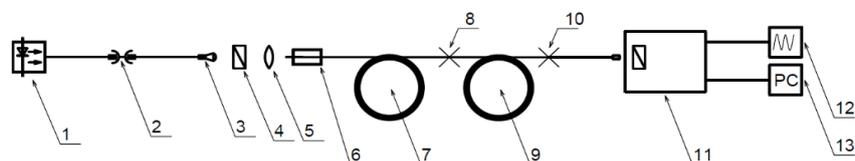


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения, 2 – оптическая розетка, 3 – коллиматор, 4 – поляризатор, 5 – объектив, 6 – держатель волокна, 7 – объект исследования, 8,10 – сварные соединения, 9 – линия задержки для образца №1 (ДЛП волокно, 13 м), 11 – поляризационный интерферометр Майкельсона, 12 – осциллограф, 13 – персональный компьютер.

Также для образца №3 было проведено исследование зависимости поляризационного коэффициента экстинкции анизотропного ОБ в месте запайки от температуры коваровой трубки. Для этого также использовалась методика широкополосной интерферометрии. В схему экспериментальной установки был добавлен элемент Пельте, с помощью которого коваровую трубку нагревали и охлаждали. Исследование состояло из трех этапов: нагрев от комнатной температуры до +70°C, остывание до комнатной температуры и охлаждение до -10°C. Каждый из этапов был проведен три раза (рис. 4).

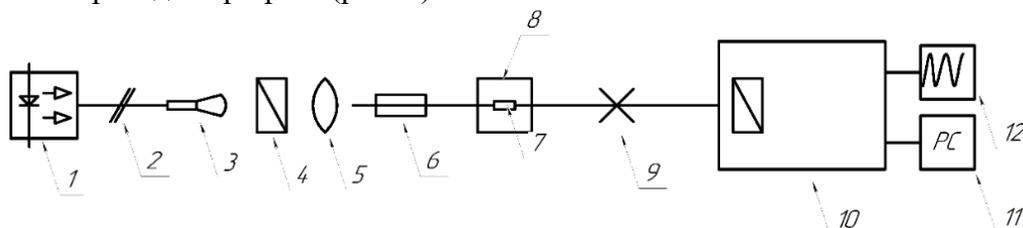


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования зависимости коэффициента поляризационной экстинкции полученных образцов от температуры: 1- источник излучения, 2 – оптическая розетка, 3 – коллиматор, 4 – поляризатор, 5 – объектив, 6 – держатель, 7 – объект исследования (трубка образца №3), 8 – элемент Пельте, 9 – сварное соединение, 10 – поляризационный интерферометр Майкельсона, 11 – компьютер, 12 – осциллограф

Результаты исследования

В результате данного исследования были получены величины PER в области запайки анизотропных ОБ в образцах №1-4 и зависимости PER анизотропного ОБ образца №3 от температуры коваровой трубки. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 5-7.

Результаты сканирования образцов №1-4

№ образца	Волокно	PER, дБ
1	Волокно 1	-29,17
2	Волокно 1	-34,94
	Волокно 2	-19,76
3	Волокно 1	-35,06
	Волокно 2	-35,08
4	Волокно 1	-46,55

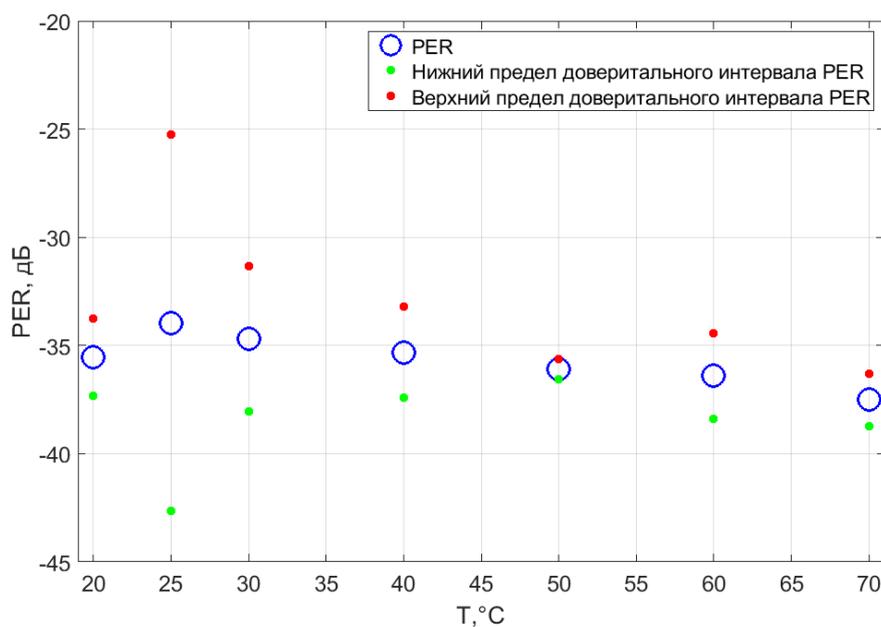


Рис. 5. Зависимость величины PER при нагреве коваровой трубки

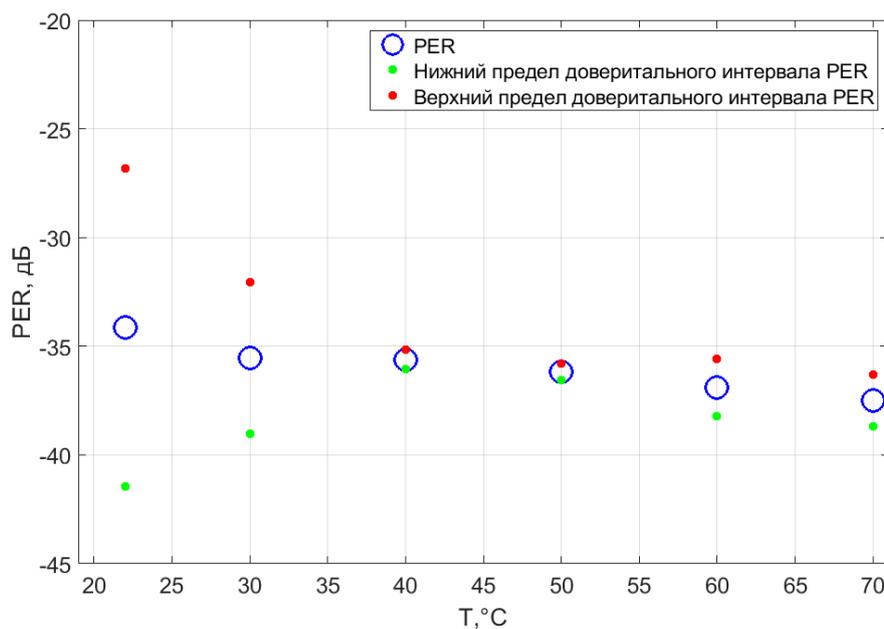


Рис. 6. Зависимость величины PER при остывании коваровой трубки

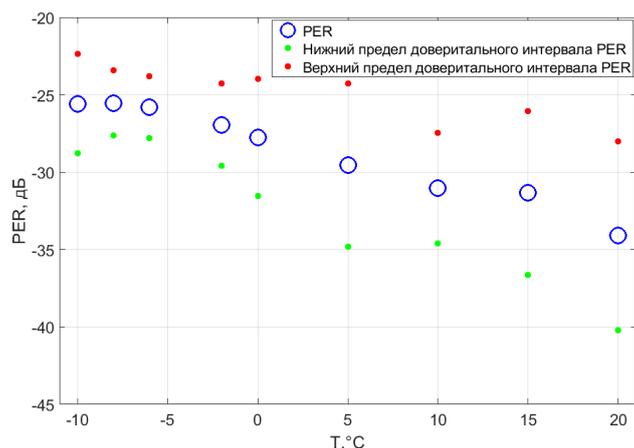


Рис. 7. Зависимость величины PER при охлаждении коваровой трубки

Из полученных измерений видно, что в месте запайки анизотропного ОВ в коваровой трубке при помощи преформы стеклоприпоя возникает увеличение связи поляризационных мод, так, PER увеличивается с -65 дБ (уровень чувствительности системы) до -33 дБ в среднем.

Температурные испытания показали, что при нагреве коваровой трубки в запаянном оптическом волокне PER улучшается с -35 дБ при комнатной температуре до -37 дБ при 70°C, а при остывании ухудшается до -34 дБ. При охлаждении коэффициент поляризационной экстинкции ухудшается с -34 дБ при комнатной температуре до -25 дБ при -10°C.

В ходе проведенных экспериментов было выявлено, что центрирование волокон в трубке при помощи трёхосных позиционеров с обеих сторон улучшает результат, так, например, с таким методом центрирования на образце №4 PER равен -46 дБ, тогда же на образце №3 при центрировании грузиком он равен -35 дБ. Также из полученных образцов можно сделать вывод, что необходимо более точно подбирать режим работы индукционного нагревателя для равномерного плавления преформы стеклоприпоя и контролировать область ОВ, располагающегося в трубке, для улучшения качества запайки, так, например, на образце №2 это привело к самому высокому из образцов PER в -19 дБ.

Исследования влияния температуры показали, что в области положительных значений температур PER изменяется незначительно, в области отрицательных значений ухудшается более весомо.

Данный метод создания гермовывода обладает потенциалом в использовании для герметизации корпуса МИОС, так как по предыдущим исследованиям известно, что величина PER от -30 дБ до -40 дБ незначительно влияет на сигнал ВОГ [4].

Литература

1. Lefevre H.C., Fiber-Optic Gyroscopes. Boston: Artech House, 1993. 313 p
2. Аксарин С.М., Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2014. 116 с.
3. Kaminow I.P., Polarization-maintaining fibers // Applied Scientific Research. 1984. V. 41. N 3–4. P. 257–270
4. Мухтубаев А.Б., Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: дис... канд. тех. наук. СПб., 2020. 199с.



Калугин Евгений Эдуардович

Год рождения: 1995
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
аспирант,
направление подготовки: 05.11.01 – Приборы и методы измерений (по видам измерений),
e-mail: znabyaklg@gmail.com



Аксарин Станислав Михайлович

Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.ф.-м.н.,
e-mail: sm_aksarin@itmo.ru



Виссарионова Екатерина Сергеевна

Год рождения: 2000
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы № В33001,
аправление подготовки: 12.03.02 – Опотехника,
e-mail: visskatya@gmail.com



Мухтубаев Азамат Булатович

Год рождения: 1990
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
научный сотрудник,
e-mail: mab@itmo.ru

УДК 535-92

**ВОЛНОВОДНЫЕ СВОЙСТВА АЗИТРОПНОГО ОДНОМОДОВОГО
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ**

**Е.Э. Калугин, В.Е. Виссарионова, А.Б. Мухтубаев
Научный руководитель – к.ф.-м.н. С.М. Аксарин**

Работа выполнена в рамках темы НИР №219951 «Разработка волоконно-оптического гироскопа для контрольно-измерительных устройств в наземных транспортных системах».

Аннотация

В ходе работы были произведены расчет диаграммы направленности посредством компьютерного моделирования и измерения диаграммы направленности, длины биений, величины двулучепреломления, h -параметра, зависимости связи

поляризационных мод от диаметра намотки оптического волокна, зависимости связи поляризационных мод от температуры окружающей среды. Выявлены, что величина двулучепреломления исследуемого волокна равна $6,19 \cdot 10^{-4}$, длина биений 2,52 мм и наиболее вероятные размеры полуосей сердцевинны равны 0,75 мкм и 1,83 мкм.

Ключевые слова

Оптическое волокно, диаграмма направленности, показатель преломления, двулучепреломление, h-параметр.

Введение

Как известно, главное отличие анизотропных от изотропных оптических волокон (ОВ) заключается в способности сохранять введенное линейное состояние поляризации. Анизотропные ОВ примечательны для использования при создании волоконно-оптических интерферометрических датчиков, таких как волоконно-оптических гироскоп (ВОГ), т.к. обладают высокой чувствительностью и, как следствие, точностью, а также помехоустойчивостью [1-3].

При формировании контура Саньяка образуются перехлесты ОВ, которые приводят к образованию анизотропии в ОВ, изменению величины двулучепреломления и, как следствие, связи поляризационных мод. Во избежание данного эффекта изготавливают анизотропные ОВ, устойчивые к механическим напряжениям.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование волноводных свойств оптического волокна с эллиптической сердцевинной.

Объект исследования

Нашими коллегами из АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» было разработано ОВ с эллиптической сердцевинной ЭЛ-3. Волокно ЭЛ-3 было изготовлено методом MCVD. Размеры полуосей сердцевинны приблизительно 0,75 мкм и 1,5 мкм (рис. 1). Сердцевина была подвержена легированию диоксидом германия, что привело к приросту разницы показателей преломлений (ПП) сердцевинны и кварцевой оболочки на 0,03. В табл. 1 представлены основные параметры ОВ ЭЛ-3.

Таблица 1

Основные параметры исследуемого оптического волокна

Параметр волокна	Значение
Тип анизотропии	Эллиптическая сердцевина
Размеры полуосей	$a \sim 0,75$ мкм, $b \sim 1,5$ мкм
Легирование сердцевинны	GeO ₂ 20 мол. %
Δn сердцевинны и оболочки	0,03

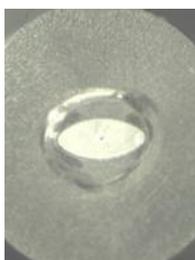


Рис. 1. Сечение пре-преформы волокна

Методики исследований

Измерение диаграммы направленности в дальнем поле проводилось путем поворота торца волокна относительно неподвижно расположенного фотодетектора.

Входная апертура фотоприёмного устройства диаметром 5 мм находилась на расстоянии 20 см от торца волокна, что обеспечивало измерение диаграммы в дальней зоне. Схема представлена на рис. 2а.

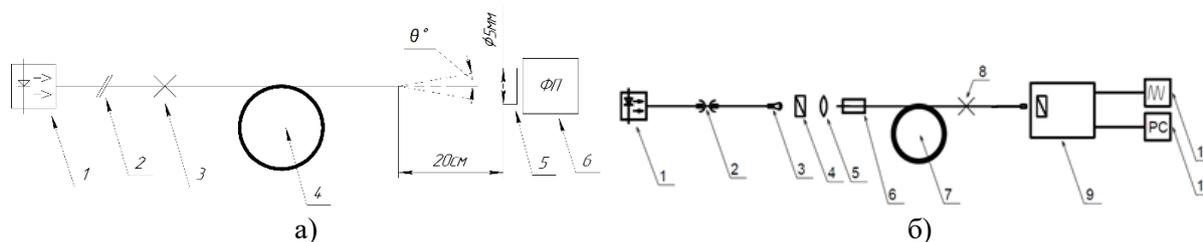


Рис. 2. Схема установки измерения: а) диаграммы направленности: 1 – источник излучения ($\Delta\lambda = 25 \text{ нм}$, $\lambda_c = 1555 \text{ нм}$), 2 – розетка, 3 – сварное соединение, 4 – объект исследования, 5 – входная апертура фотоприемного устройства, 6 – фотоприемное устройство; б) величины двулучепреломления, длины биений и h -параметра: 1 – источник излучения ($\Delta\lambda = 45 \text{ нм}$, $\lambda_c = 1575 \text{ нм}$), 2 – оптическая розетка, 3 – коллиматор, 4 – поляризатор, 5 – объектив, 6 – держатель волокна, 7 – объект исследования, 8 – сварные соединения, 9 – поляризационный интерферометр Майкельсона, 10 – осциллограф, 11 – персональный компьютер

Для измерения величины двулучепреломления, длины биений и h -параметра в исследуемых образцах использовалась методика широкополосной интерферометрии. Схема представлена на рис. 2б. С помощью данной методики можно добиться высокой точности в определении места локального преобразования в оптическом тракте, а по амплитуде дать оценку величине h -параметра [2]. В настоящей работе использовался сканирующий интерферометр Майкельсона с анализатором на входе для выделения обеих ортогональных поляризационных мод исследуемого образца. Измерения проводились на двух отрезках исследуемого ОВ длиной 2 м и 16,95 м.

Для измерения зависимости величины h -параметра от диаметра катушки использовалась оснастка с диаметрами от 100 мм до 10 мм. Объектом исследования являлся отрезок исследуемого ОВ длиной 15 м. Так как катушка и смотка ОВ вызывают сильное скручивание его вокруг своей оси, во избежание этого эффекта в центре исследуемого участка заранее был подготовлен изгиб (петелька) диаметром ~ 100 мм. Закрепляя петельку на каждом из диаметров катушки, наматывалось путем вращения катушки вокруг своей оси с ручным контролем натяжения. Наматывалось от 6 до 8 метров волокна в зависимости от диаметра (рис. 3).

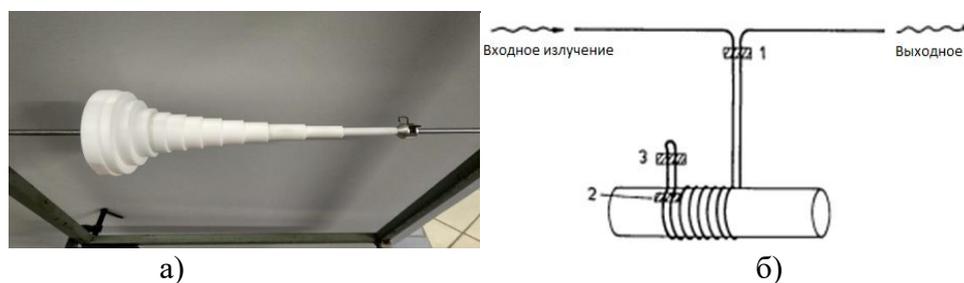


Рис. 3. а) фото изготовленной оснастки, б) метод намотки ОВ на катушку: 1 – крепление волокна неподвижно на оптическом столе, 2 – крепление волокна на катушке, 3 – крепление формирующее петельку

Для измерения зависимости величины h -параметра от температуры окружающей среды использовался термостат и сухой лед. Сканирования исследуемого ОВ проводились с интервалом 5° от комнатной температуры до -60°C .

Моделирование

Моделирование производилось в среде Multiphysics COMSOL. Оно было направлено на выявление параметров модели исследуемого ОВ, при которых рассчитанные значения распространения излучения наиболее точно совпадают с экспериментальными. Всего использовалось 2 модели. Для первой модели создавалось два домена: кварцевая оболочка и сердцевина. Для определения диаграммы направленности расчетной моды моделировалась дифракция моды на воздухе в дальней зоне. Результаты первой модели, электрическая составляющая мод в разных плоскостях, используется в качестве условия для левой границы модели волокна, выделена синим на рис. 4б. Излучение регистрировалось на выделенной красным цветом дуге на рис. 4б. В результате модели получали распределение нормированной интенсивности, которое сравнили с экспериментальными данными. В качестве показателя сравнения использовался коэффициент корреляции.

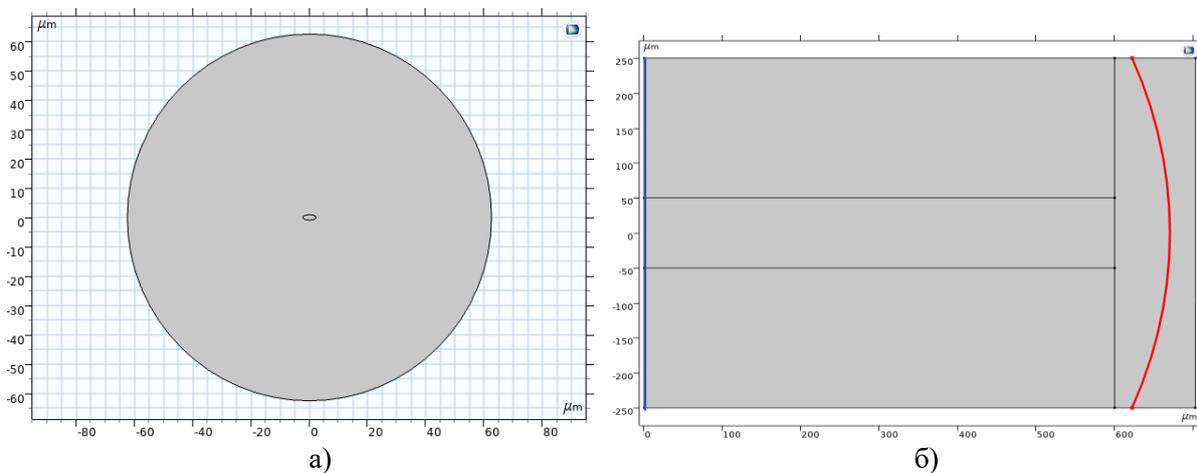


Рис. 4. а) первая модель, б) вторая модель

Для определения точности измеренного Δn были сравнены графики экспериментальных данных с графиками, полученными при моделировании с $\Delta n = 0,03$, и с другими значениями Δn . Для этого в математическое выражение профиля ПП была добавлена c – степень сглаживания ПП:

$$n(\lambda) + \Delta n \cdot e^{-\left(\left(x/b\right)^2 + \left(y/a\right)^2\right)^c},$$

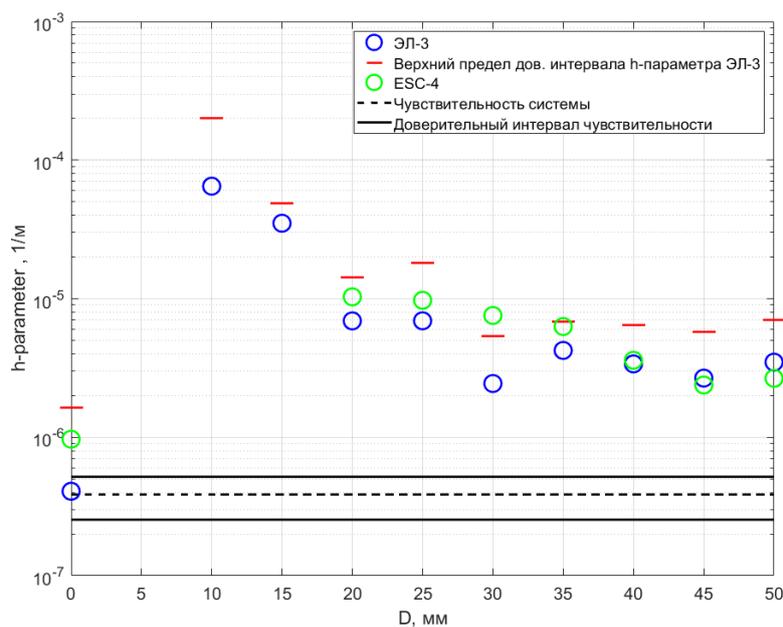
где $n(\lambda)$ – ПП для длина волны λ , Δn – разница ПП сердцевины и кварцевой оболочки, a и b – длины полуосей, x и y – координаты, c – степень сглаживания ПП.

Результаты исследования

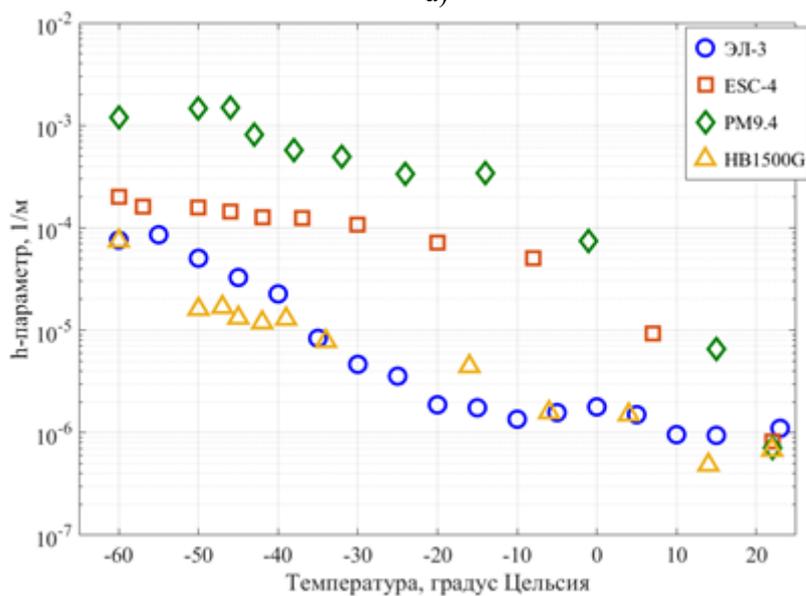
В результате данного исследования были получены величина двулучепреломления, длина биений, h -параметр, зависимость h -параметра от диаметра катушки, зависимость h -параметра от температуры окружающей среды. Были также получены экспериментальные и расчетные данные диаграммы направленности исследуемого ОВ. Для сравнения на графиках представлены значения для волокон с эллиптически напрягающей оболочкой ESC-4 и PM9.4 (табл. 2, рис. 5-7).

Результаты сканирования

Параметр		Длина волокна	
		2 м	16,95 м
L , мм		2,52	2,52
$\Delta n_b \cdot 10^{-4}$		6,19	6,19
h-параметр, $1/\text{м} \cdot 10^{-7}$	Первая ось	-	6,23
	Вторая ось	-	6,44



а)



б)

Рис. 5. Зависимость h-параметра от а) диаметра намотки и б) от температуры окружающей среды

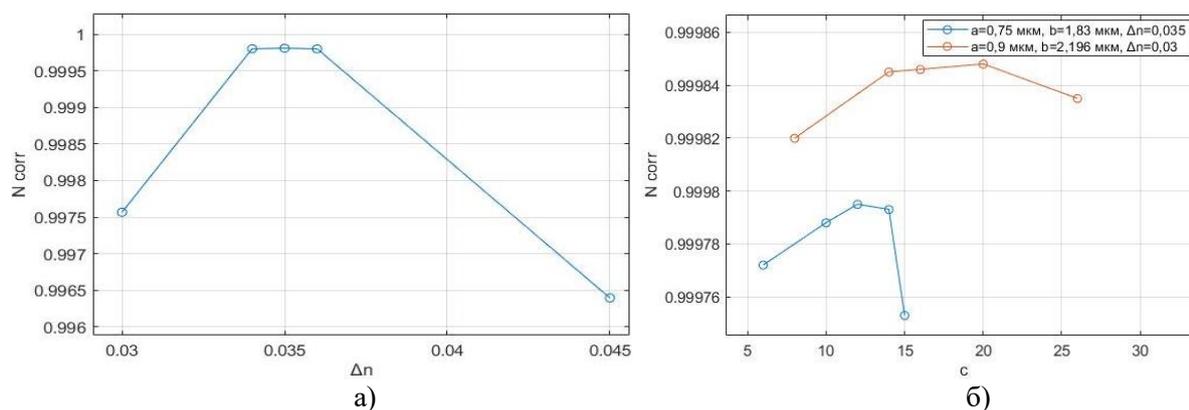


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции а) от значения Δn при $a = 0,75 \mu\text{м}$, $b = 1,83 \mu\text{м}$ без сглаживания профиля ПП; б) от значения степени сглаживания профиля ПП для двух вариантов параметров

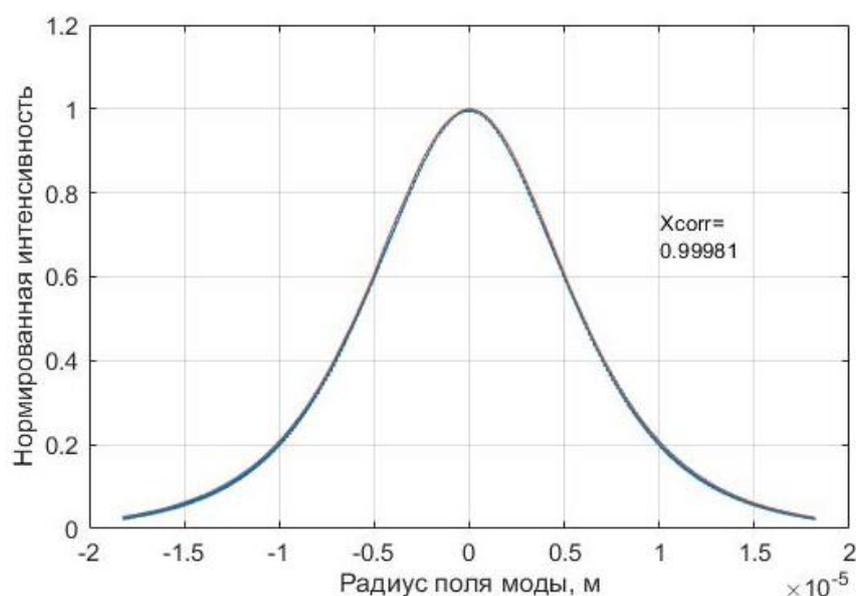


Рис. 7. Сравнение диаграммы направленности, полученной экспериментально (оранжевый), с данными моделирования (синий) при $a = 0,75 \mu\text{м}$ $b = 1,83 \mu\text{м}$, $\Delta n = 0,035$

Из экспериментального измерения диаграммы направленности видно, что функция интенсивности не сходится с распределением Гаусса, что натолкнуло на проверку исходных данных при помощи моделирования. Моделирование показало, что наилучший коэффициент корреляции с экспериментальным графиком получили при параметрах сердцевин $a = 0,75 \mu\text{м}$, $b = 1,83 \mu\text{м}$ и $\Delta n = 0,035$. Однако, допуская размеры полуосей сердцевин $a = 0,9 \mu\text{м}$, $b = 2,196 \mu\text{м}$, при $\Delta n = 0,03$ и $c = 20$ коэффициент корреляции получился наиболее подходящим.

Измерения показали, что волокно ЭЛ-3 обладает длиной биения $2,52 \text{ м}$ и величиной двулучепреломления $6,19 \cdot 10^{-4}$. Связь поляризационных мод измеренная в величине h -параметр равна $6,23 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}$ для одной оси и $6,44 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}$ для другой.

Из полученной зависимости h -параметра от диаметра намотки видно, что уменьшение диаметра намотки от 50 мм до 10 мм приводит к увеличению h -параметра с $3,48 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}$ до $6,48 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м}$. Однако заметно, что до диаметра 30 мм включительно величина h -параметра изменяется незначительно, в пределах погрешности. Охлаждение оптического волокна от комнатной температуры до -60°C привело к увеличению h -параметра от $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}$ до $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/м}$.

По итогам проведенного исследования можно сказать, что наиболее вероятные

длины полуосей сердцевины $a = 0,75$ мкм и $b = 1,83$ мкм, а разница показателей преломления сердцевины и оболочки равна $0,035$ с точностью ± 0.0002 .

Из полученных результатов можно сделать вывод, что олокно ЭЛ-3 обладает меньшей чувствительностью к малым диаметрам намотки по сравнению с волокном ESC-4. Так, например, при диаметре намотки 20 мм h -параметр на ESC-4 равен $1 \cdot 10^{-5}$ 1/м, когда у ЭЛ-3 $6,9 \cdot 10^{-6}$ 1/м на том же диаметре. А также то, что волокно ЭЛ-3 имеет потенциал в использовании в области отрицательных температур.

Литература

1. Lefevre H.C., *Fiber-Optic Gyroscopes*. Boston: Artech House, 1993. 313 p.
2. Аксарин С.М., Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2014. 116 с.
3. Kaminow I.P., Polarization-maintaining fibers // *Applied Scientific Research*. 1984. V. 41. N 3–4. P. 257–270.



Машина Екатерина Алексеевна

Год рождения: 2000
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы №Р33113,
направление подготовки: 09.03.04 – Системное
и прикладное программное обеспечение,
e-mail: mashina.katherina@gmail.com



Сушенцова Марина Вячеславовна

Год рождения: 2001
МГУ имени М. В. Ломоносова
факультет почвоведения,
студент кафедры химии почв, 3 курс,
направление подготовки: 05.03.06 – экология
и природопользование,
e-mail: sushentsova.mv@gmail.com



Балакшин Павел Валерьевич

Год рождения: 1984
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
к.т.н.,
e-mail: pvbalakshin@gmail.com

УДК 004.93, 631.4

**ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА КОСВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА КУЛЬТИВАЦИИ ПОЧВЫ**

**Е.А. Машина, М.В. Сушенцова
Научный руководитель – к.т.н. П.В. Балакшин**

Работа выполнена в рамках инициативных исследовательских работ по проекту «SmartHomeAgro».

Аннотация

В работе рассматриваются методы определения типа пахотного горизонта по косвенным данным на основе анализа фотоизображений результатов механических испытаний и фито-индикации с целью дальнейшего создания оптимального алгоритма культивации почвы.

Ключевые слова

Пахотный горизонт, культивация почв, гранулометрический состав почвы, фито-индикация, сверточная нейросеть.

Землепользование на территории дачных угодий – популярное времяпрепровождение, досуг и способ заработка для 42% жителей России. Однако, совокупные трудозатраты на единицу продукции таких самодеятельных садоводов

подчас в несколько раз больше, чем, в крупных сельскохозяйственных предприятиях [1].

Причем масштабным эффектом, повышающим эффективность крупного сельскохозяйственного предприятия, можно объяснить не более 20% излишних трудозатрат самодеятельных агрономов. Больше половины излишних трудозатрат самодеятельных агротехников объясняется неправильным выбором способов культивации (обработки) почвы, что в большинстве случаев возникает из-за неправильного определения типа почвы [2].

Объясняется это тем, что «любительскому земледелию» недоступно подавляющее большинство современных технологий мониторинга почвенного слоя, которые используются в современных хозяйствах (связанных, в том числе, и с постоянным лабораторным анализом химического и физического состояния почв и ряда агротехнических и мелиорационных методов), поэтому на приусадебных участках приходится использовать косвенные методы определения типа почв, основанные по большей части на субъективных оценках, что в подавляющем большинстве случаев приводит к неправильному определению типа почвенного горизонта. Это, в свою очередь, приводит к ошибкам в агротехнике и серьезным потерям в урожайности [3].

И если в черноземной зоне с излишними трудозатратами мириться достаточно легко, поскольку общая эффективность сельскохозяйственной деятельности в тех регионах достаточно велика, то в средней полосе (особенно в Нечерноземье), являющейся, фактически зоной рискованного земледелия, субъективные ошибки в определении типа почвы и связанных с ним алгоритмов культивирования могут привести к падению урожайности в несколько раз [4].

Причем следует обратить внимание и на то, что «скопировать» агротехнологии, применяемые на соседнем участке, тоже практически не представляется возможным, так как почвам, характерным для районов рискованного земледелия, пущенным в сельскохозяйственный оборот, свойственно быстрое изменение их типа, обусловленное предыдущей деятельностью анализа человека на них.

Прямые методы специализированных исследований, направленных на определение типа пахотного горизонта и включающие механический, химический, агрохимический, минералогический, радиологический, токсикологический и микробиологический анализ исследования самодеятельному агротехнику в условиях дачного хозяйства практически недоступны, поскольку требуют применения дорогостоящих исследовательских стендов [3].

Однако в литературе [5] описаны два косвенных способа определения типа почвенного горизонта, которые можно отнести к «традиционным», совместное правильное использование которых позволит с достаточной степенью точности правильно определить дальнейшую стратегию культивации почвы.

Первый вид испытаний представляет собой механический способ определения гранулометрического состава пахотного горизонта, определяющий относительное содержание в почве частиц различных фракций независимо от их минералогического и химического состава и заключающийся в следующем.

Для того чтобы определить, тип почвы на участке, из пахотного горизонта берется пригоршня земли, которая равномерно увлажняется до консистенции густой пасты. Получившийся субстрат скатывается «в колбаску» толщиной около 3 мм. После чего производится попытка свернуть получившийся образец в кольцо и оценивается получившийся результат:

- если почва пластична и хорошо скатывается, а кольцо легко сворачивается и держит форму, то почва глинистая, тяжелая;
- если почва скатывается в «колбаску», но трескается при попытке сложить ее

кольцом, почва является суглинистой;

– если почва рассыпается, скатать из нее что-либо цельное не удастся, сложить кольцо невозможно, почву можно отнести к разряду песчаной или супесчаной (легкой).

При наличии качественной и репрезентативной «референтной таблицы образов», содержащей необходимое для проведения однозначной оценки количество переходных типов почв, метод определения гранулометрического состава пахотного горизонта («метод кольца») позволяет достичь высокую степень достоверности результата, сравнимую с подобными лабораторными испытаниями [5].

Вторым косвенным методом определения типа почвенного горизонта (комплексно описывающим его химические, агрохимические и минералогические характеристики), применяемым для создания алгоритма культивации, близкого к оптимальному, является метод фито-индикации почвы, сводящийся к классификации природных трав, произрастающих на данной почве.

Этот метод основан на том, что преобладание определенной растительности на определенных участках позволяет сделать однозначные выводы о строении, состоянии почвы и ее свойствах. Таким образом, анализируя растительность на участке почвы, мы можем приблизительно определить, с каким типом почвы имеем дело [6].

Так, например, если растительный покров на участке почвы разрежен, это свидетельствует о низком естественном плодородии. Высокая густая растительность, состоящая из здоровых и внешне сильных растений, свидетельствует о хорошем состоянии почвы, ее насыщенности питательными веществами. При этом на кислую почву укажут мох, осока, хвощ, щавель. Признаком нейтральной реакции почвы служат мать-и-мачеха, клевер, сныть и крапива. Для слабощелочных почв характерно произрастание лебеды и горчицы полевой [6].

Комплексное использование двух вышеперечисленных методов позволит определить тип пахотного горизонта со степенью вероятности, достаточной для однозначного выбора дальнейших алгоритмов культивации таких почв [5], [6].

Суть предлагаемого авторами метода экспресс-анализа типа пахотного горизонта состоит в том, что объективная оценка типа пахотного горизонта по результатам косвенных испытаний механическим способом определения гранулометрического состава и методом фито-индикации производится с использованием анализа фотоизображений, выполняемого с применением методов машинного обучения, основанных на использовании алгоритма предобученной сверточной нейросети [7].

При этом в качестве референтных образов для предварительного обучения [8] используются систематизированные по типам почв фотоизображения результатов механических испытаний гранулометрического состава почвы по «методу кольца», полученные, в том числе, на учебном полигоне факультета почвоведения МГУ в поселке Чашниково Московской области.

В качестве референтных массивов изображений растений, используемых в методе фито-индикации почвы используются маркированные фотоизображения характерных для каждого вида почв растений [6], взятые из открытых источников биологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

По ряду референтных образов не удалось на первом этапе набрать необходимое количество изображений, поэтому пришлось использовать «искусственные методы расширения референтной базы», а именно технологию горизонтального поворота, перемешивания примеров и деформацию изображений [9].

Технология горизонтального поворота предполагает зеркальное отражение изображения, являющегося исходным. При этом наличие «зеркального аналога» позволяет вдвое увеличить продолжительность каждого цикла машинного обучения, а также ускорить обучение сети в связи с тем, что сеть получает в свое распоряжение вдвое больше обучающих примеров.

Эффективность применения технологии перемешивания обучающих примеров основывается на том, что нейросети обучаются существенно быстрее при подаче наиболее непредсказуемого набора примеров из обучающей выборки. Для реализации этой технологии существующие систематизированные наборы изображений объектов перед подачей на вход «распознавателя» предварительно перемешивались.

Использование технологии предварительной деформации референтных изображений основано на понимании того, что нейронная сеть должна уметь распознавать изображения, несмотря на искажения входных данных, такие как случайные шумы, реализуемые искусственным предварительным добавлением в референтные образы псевдослучайных линейных и нелинейных искажений.

После проведения предварительного обучения нейросети на массивах исходных данных 15600 образов в сентябре 2020 года была проведена верификация алгоритма в натуральных условиях полигона факультета почвоведения.

Предварительные натурные испытания автоматизированной системы распознавания результатов косвенных определений типов почвенных горизонтов исключительно с использованием методов распознавания графических изображений на реальных тестовых примерах показали высокую эффективность при определении типа пахотного горизонта по косвенным признакам.

Однако, в связи с недостаточным объемом фотографических данных, на которых происходило предобучение нейросети, метод распознавания по фотографическим изображениям анализируемых объектов оказался очень чувствителен к условиям освещенности (в том числе из-за наличия/отсутствия теней при существенной монохромности кадра), из-за чего часто системе распознавания не удавалось вычленить характерные места изображения.

Особенно остро это проявилось при реализации распознавания для метода фито-индикации в условиях сильно загущенного травостоя, при котором проблема монохромности изображения и существенной затененности значительных участков кадра усугублялось и тем, что характерные для распознавания растения находились в разных высотных горизонтах.

Частично эту проблему удалось решить, искусственно затеняя участки съемки и производя съемку одного и того же участка с нескольких различных ракурсов [10]. Это существенно повышало качество распознавания, но значительно усложняло предварительную подготовку «полевых материалов».

Анализ полученных результатов показал, что полученная описанным выше образом информация о типе пахотного горизонта позволяет обоснованно принять решение о выборе оптимального вида культивации почвы для последующего выращивания на нем выбранных сельскохозяйственных культур, используя нормализованные алгоритмы культивации [2], что сводится всего лишь к созданию и информационному наполнению по имеющимся источникам специализированной базы знаний [3], [4], [11].

По результатам проведенных работ могут быть сделаны следующие выводы:

– для определения типа пахотного горизонта в условиях «любительского земледелия» возможно использовать косвенные методы оценки фито-индикации и механического способа определения гранулометрического состава с использованием анализа фотоизображений, производимого с применением методов машинного обучения на основе алгоритма предобученной сверточной нейросети,

– для расширения эффективности использования ограниченного набора референтных образов в процессе предварительного обучения нейросети, необходимо использовать специализированные технологии предварительной подготовки референтных данных (в том числе технологию горизонтального поворота, перемешивания примеров и деформацию изображений),

– в связи с существенной монохромностью «полевых фотоизображений», подвергаемых операции распознавания, для получения качественных изображений необходимо создание специализированных методик, описывающих режимы съемки распознаваемых объектов.

Результаты приведенных в настоящей работе исследований в дальнейшем будут использованы при создании линейки специализированных программных средств «SmartHomeAgro», предназначенных для информационной поддержки самостоятельных земледельцев с целью снижения их трудозатрат на производство сельскохозяйственной продукции путем повышения обоснованности принимаемых ими решений.

Литература

1. Костычев П.А. Почвоведение / Костычев П.А.; под ред. Вильямса В.Р. М.: Издательство Юрайт. 2019. 315 с.
2. Валько В.П., Щур А.В. Особенности биотехнологического земледелия / Валько В.П., Щур А.В.; М-во сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, УО "Белорусский государственный аграрный технический университет". Минск: БГАТУ. 2011. 192 с.
3. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобногидрофильные соединения / Милановский Е.Ю. Москва : ГЕОС. 2009. 186 с.
4. Литвинович А.В. Изменение содержания и состава гумуса дерновоподзолистых почв в процессе мелиоративного освоения и перехода от пашни к лесу : монография / Литвинович А.В., Плылова И.А., Павлова О.Ю.; Рос. акад. с.-х. наук, Агрофиз. НИИ Россельхозакад. Санкт-Петербург, Пушкин. 2012. 91 с.
5. Добровольский В.В. Избранные труды. Т. 2. Геохимия почв и ландшафтов / Добровольский В.В. Москва : Научный мир. 2009. 752 с.
6. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 2003. 216 с.
7. Sutskever I., Martens J., Dahl G., Hinton G. On the importance of initialization and momentum in deep learning. *J. of Machine Learning Research*. 2013. V. 28. No. 3, pp. 1139–1147.
8. Efitorov A., Dolenko T., Burikov S., Laptinskiy K., Dolenko S. Study of Efficiency of Dividing the Problem Space as a Means to Improve Solution of Multi-parameter Inverse Problem by Adaptive Methods. *Procedia Computer Science*, 2018, V.123. pp.122-127.
9. Селянкин, В.В. Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений: учебное пособие / Селянкин В.В. //С-Пб: Лань. 2019. 152с.
10. Келби С. Цифровая фотография. Т.1 / Келби С.. Москва: Вильямс. 2016. 256 с.
11. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности / Наумов А.В. Новосибирск: Издательство СО РАН. 2009. 208 с.



Останин Степан Андреевич

Год рождения: 1995

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
аспирант,

направление подготовки: 02.00.06 – Высокмолекулярные
соединения,

e-mail: stepan.ostanin1995@gmail.com



Зуев Вячеслав Викторович

Год рождения: 1961

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.х.н., доцент,

e-mail: vvzuev123@gmail.com

УДК 544.03

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПОДВИЖНОСТИ
ПОЛИУРЕТАНОВ МЕТОДОМ 2D WISE ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ**

С.А. Останин

Научный руководитель – д.х.н., доцент В.В. Зуев

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-33-90001.

Аннотация

В данном исследовании методом твердотельной 2D 13С-1Н WISE ЯМР спектроскопии была исследована молекулярная подвижность образцов полиуретанов с различной массовой долей жестких и подвижных перфторированных блоков. Полученные двумерные спектры позволили оценить корреляцию между мобильностью систем и их доменной структурой.

Ключевые слова

Твердотельная ЯМР спектроскопия, полиуретаны, водородная связь, органический синтез, микрофазное разделение, молекулярная подвижность.

Полиуретаны (ПУ) являются одним из самых универсальных пластиковых материалов. Они имеют отличные физические и химические свойства, такие как хорошая эластичность, растяжимость, прочность на разрыв и сопротивление истиранию. Природа химического состава позволяет адаптировать полиуретаны для решения сложных задач, придавать им любые необычные формы и улучшать промышленные и потребительские товары. Одним из направлений улучшения промышленных свойств ПУ является введение в его структуру перфторированных блоков. Полиуретаны (ПУ) представляют собой сегментированные сополимеры, состоящие из чередующихся гибких мягких сегментов и так называемых жестких сегментов [1]. Принято считать, что жесткие сегменты имеют тенденцию к агрегации в упорядоченные наноразмерные твердые домены в результате образования водородных связей, что приводит к фазово-разделенной структуре с жесткими доменами, распределенными в подвижной эластомерной матрице. Важными факторами, влияющими на эту структуру, являются соотношение жестких/мягких сегментов в

сополимере, способность жестких и мягких сегментов кристаллизоваться, степень конкуренции в образовании водородной связи между жесткими сегментами и между жесткими и мягкими сегментами, а также взаимная растворимость жесткого и мягкого сегментов [2, 3]. Все эти параметры связаны с молекулярной подвижностью, которая определяет ряд свойств полимера, включая механические и термопластичные. Поэтому надлежащее изучение молекулярной подвижности ПУ может помочь в задаче создания материалов с желаемыми свойствами.

Для исследования влияния структурных факторов на формирование микроструктуры и их роли в управлении динамикой сегментированных ПУ был разработан и синтезирован систематический ряд сополимеров. В работе был использован олигомерный 4,4'-дифенилметандиизоцианата Wannate PM-20. В качестве формирующего мягкий сегмент полиола выступали полиэтиленгликоль-600 и его фторированный аналог Fluorolink E10-H. В качестве удлинителя цепи использовались бисфенол А и его фторированный аналог бисфенол АФ.

ЯМР WISE (ЯМР с разделением линий по частотной полуширине в стеке протон-углеродных взаимодействий) использует двумерный спектр для отображения спектральных характеристик атомов водорода, связанных с каждым из хорошо разрешенных химических сдвигов углерода в интересующем материале [4]. В эксперименте 2D WISE ЯМР спектр ^{13}C CP/MAS высокого разрешения отображается по одной оси, а линии протонного спектра, связанные с отдельными углеродными участками и имеющие соответствующую этому участку ширину, по второй оси [5]. Последовательность импульсов состоит из 90-градусного импульса, подаваемого на протоны, который переворачивает намагниченность в плоскость xy , за которым следует период эволюции t_1 . За это время намагниченность протонов изменяется под действием дипольной связи. Затем применяется импульс под углом 90 градусов, чтобы повернуть намагниченность обратно по оси z . В простейшем варианте этого эксперимента при времени смешивания $t_m=0$ намагниченность протонов передается на ближайшие атомы углерода посредством процесса кросс-поляризации. Сигнал ^{13}C детектируется в условиях MAS в течение времени t_2 .

Поскольку ширина линий ^1H отражает размер гомоядерного дипольного соединения, более жесткие сегменты на спектре WISE будут иметь более широкие линии. Таким образом, один спектр может коррелировать информацию о локальной подвижности и химической структуре. Кроме того, с введением периода времени перемешивания для обеспечения спиновой диффузии среди различных спиновых систем ^1H ЯМР WISE может выделить домены с размером 0,5-200 нм, образованные конкретными компонентами блок-сополимера или смесью полимеров.

Таким образом, в наших образцах метод ^{13}C - ^1H WISE позволяет установить корреляцию между доменной структурой и сегментарной подвижностью. На рис. 1 показан 2D-спектр WISE, а также проекции водородного сигнала образца со 100% ПЭГ-600.

Все сигналы ^{13}C имеют соответствующие связям сигналы ^1H с узкой шириной линии, равной ~ 1 кГц. Ширина линий для ароматических компонентов (1,3 кГц) немного выше, чем для фрагментов оксида этилена (1,1 кГц). Следовательно, в целом метод 2D WISE позволяет детектировать только подвижную фазу образцов. При увеличении объемной доли компонента удлинителя цепи бисфенола А выше 50% начинает наблюдаться увеличение ширины линий ^1H . Спектр образца представлен на рис. 2.

Однако, что наиболее примечательно, увеличение ширины наблюдается для сигналов, находящихся на химическом сдвиге углерода равном 70 ppm, что соответствует этиленоксидным группам. При увеличении концентрации бисфенола А до 70% ширина сигнала этиленоксида составляет порядка 26 кГц. Спектр образца представлен на рис. 3.

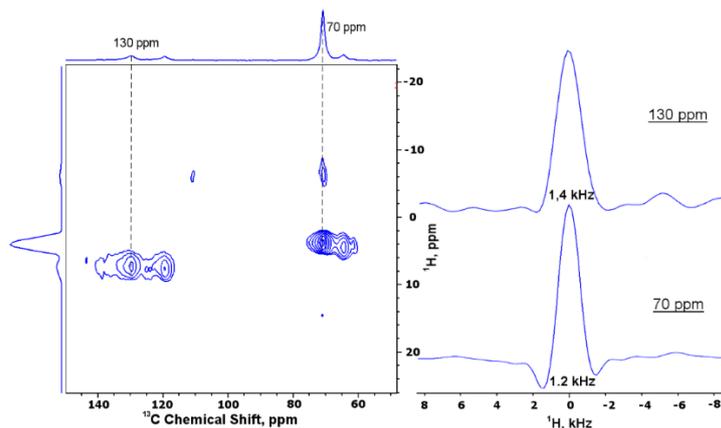


Рис. 1. WISE ЯМР спектр образца 100% ПЭГ-600 (слева) и проекции ^1H сигналов на определенных ^{13}C углеродных химических сдвигах (справа)

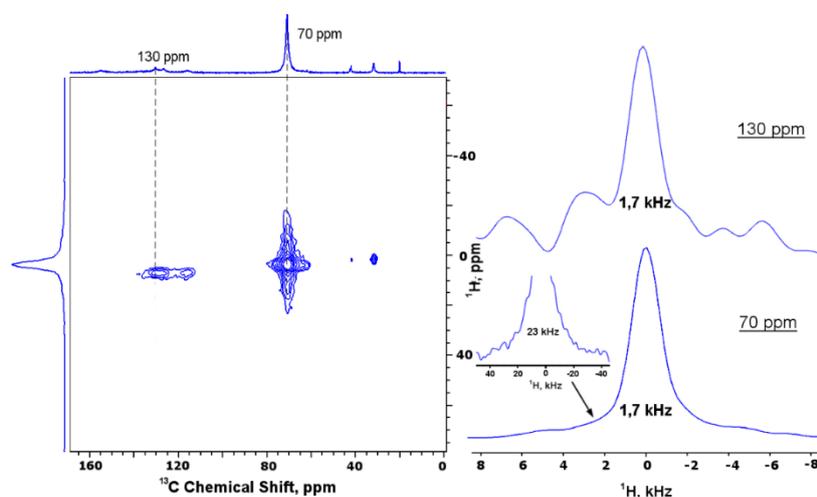


Рис. 2. WISE ЯМР спектр образца 50% ПЭГ-600 с 50% бисфенола А (слева) и проекции ^1H сигналов на определенных ^{13}C углеродных химических сдвигах (справа)

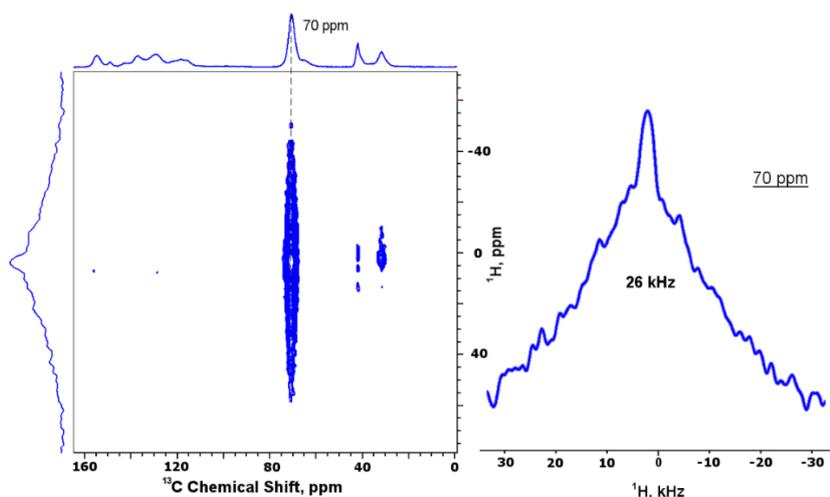


Рис. 3. WISE ЯМР спектр образца 30% ПЭГ-600 с 70% бисфенола А (слева) и проекции ^1H сигналов на определенных ^{13}C углеродных химических сдвигах (справа)

Из этого можно сделать вывод, что именно фрагменты этиленоксида образуют наиболее неподвижные фракции в образце полимера. Их вклад в увеличение жесткости

возрастает с увеличением доли бисфенола А. В спектре ЯМР WISE образца без блоков мягких сегментов были обнаружены не только широкие, но и узкие линии (порядка ~ 1 кГц), отнесённые к метильным группам бисфенола А и к метиленовым группам изоцианатных компонентов. Это показало нам, что распределение молекулярных подвижностей зависит не только от морфологии образца, но и от его микроструктуры. Так как метод WISE работает только в сетке протон-углеродных взаимодействий, образец с перфторированным мягким сегментом (b) содержал только узкие линии. Спектр представлен на рис. 4.

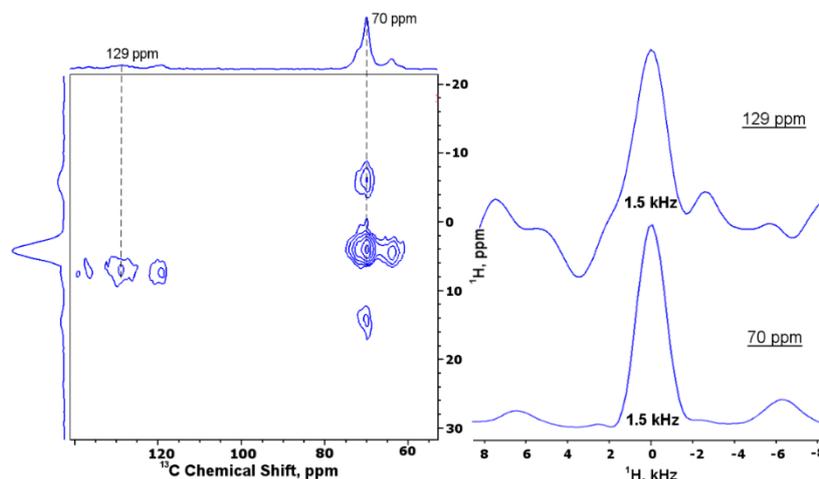


Рис. 4. WISE ЯМР спектр образца 100% Fluorolink E10-H (слева) и проекции ^1H сигналов на определенных ^{13}C углеродных химических сдвигах (справа)

Это вызвано тем, что основной объем мягкого сегмента состоит из атомов углерода и фтора и не содержит атомов водорода. Наблюдаемые в спектре сигналы были отнесены к концевым метиленовым группам блоков мягкого сегмента.

Таким образом, анализ спектров подтвердил предположение о том, что жесткость аморфной фазы увеличивается с повышением массовой доли ароматического удлинителя цепи (бисфенола), а подвижность мягкой фазы в образцах с нулевым или низким количеством подвижных блоков обуславливается присутствием диметилметановых и метиленовых звеньев.

Литература

1. Thomas S, Datta J, Hoponiuk JT, Raghunadhan A. Polyurethane polymers: Composites and Nanocomposites // Elsevier: Amsterdam. 2017.
2. Mokeev M.V., Ostanin S.A., Zuev V.V. Prototropic behavior of cyclohexane substituted urethane and urea compounds. Observation of H-bond mediated 4HJH1H3 coupling constants across urea fragments // Tetrahedron - 2019, Vol. 75, No. 48, pp. 130691.
3. Mokeev M.V., Ostanin S.A., Saprykina N.N., Zuev V.V. Microphase structure of polyurethane-polyurea copolymers as revealed by solid-state NMR: effect of molecular architecture // Polymer - 2018, Vol. 150, pp. 72-83.
4. Schmidt-Rohr, K., Clauss, J. and Spiess, H. W. Correlation of structure, mobility, and morphological information in heterogeneous polymer materials by two-dimensional wideline-separation NMR spectroscopy // Macromolecules - 1992, 25, 3273
5. Lin C.-L., Kao H.-M., Wu R.-R., & Kuo P.-L. Multinuclear Solid-State NMR, DSC, and Conductivity Studies of Solid Polymer Electrolytes Based on Polyurethane/Poly(dimethylsiloxane) Segmented Copolymers // Macromolecules – 2002. 35(8), 3083–3096.



Пихота Нина Сергеевна

Год рождения: 1997

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
аспирант 1 года,

направление подготовки: 05.11.07 – Оптические
и оптико-электронные приборы и комплексы,
e-mail: pihota1997@yandex.ru



Чертов Александр Николаевич

Год рождения: 1982

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н., доцент,

e-mail: a.n.chertov@mail.ru

УДК 53.082.5

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ
РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗНОГО
СЫРЬЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ**

Н.С. Пихота

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Н. Чертов

Аннотация

В ходе аналитического обзора существующих методов радиометрической сепарации алмазосодержащей руды были рассмотрены рентгенолюминесцентная и рентгенографическая сепарация, спектроскопия комбинационного рассеяния, ультрафиолетовая сепарация при межзонном и внутрицентровом возбуждениях, колориметрическая и лазерная сепарация. Проведена оценка применимости этих методов для обогащения алмазосодержащих кимберлитов и определена необходимость разработки и исследования лазерно-трансмиссионного метода обогащения алмазного сырья.

Ключевые слова

Рентгенолюминесцентная сепарация, рентгенографическая сепарация, спектроскопия комбинационного рассеяния, ультрафиолетовая сепарация, колориметрическая сепарация, лазерная сепарация, алмаз.

Основными технологическими процессами извлечения алмазов из руды во всем мире являются рентгенолюминесцентный и рентгенографический методы сепарации. Рентгеновские методы сепарации обладают высокими показателями селективности и производительности, однако требуют больших энергозатрат (рентгеновская трубка потребляет порядка 5 кВт), также существует опасность работы с рентгеновским излучением для оператора и окружающей среды, а рентгенозащитные экраны существенно повышают себестоимость аппарата. К тому же рентгеновские методы сепарации нецелесообразно применять для всех классов крупности алмазосодержащих кимберлитов. На отечественных фабриках для каждой крупности сырья используются различные методы обогащения. Рентгеновские сепараторы широко применяются в

диапазоне классов $-50+5$ мм. Для обогащения самого продуктивного класса крупности $-5+2$ мм применяются комбинированные схемы, включающие гравитационные, рентгеновские и липкостные сепараторы. Класс крупности -2 мм обогащается комбинированной схемой, которая включает обогащения на винтовых сепараторах и на пневматических флотационных машинах с производительностью до 200 т/ч [1].

Существенными недостатками используемых на фабриках методов сепарации являются потребление больших объемов технической воды (расходуется $0,4$ м³ воды на обработку 1 тонны алмазосодержащей руды) и требование значительных энергозатрат: на горнодобывающую промышленность приходится 2-3% мирового энергопотребления, что соизмеримо с количеством расходуемой энергии всей гражданской авиацией. Столь высокие показатели приводят к росту экологической ответственности.

Таким образом, необходимо проведение исследований в области обогащения алмазосодержащих руд, направленных на разработку неразрушающего, бесконтактного метода, который будет обладать сопоставимыми показателями производительности по сравнению с рентгеновской сепарацией при меньших энергозатратах и экологической нагрузке. Одним из перспективных направлений таких исследований является оптическая сепарация, к которой относятся спектроскопия комбинационного рассеяния, ультрафиолетовый, колориметрический и лазерный методы обогащения.

При использовании метода спектроскопии комбинационного рассеяния молекулы образца переводятся в возбужденное электронное состояние при помощи короткого лазерного импульса, и затем регистрируется спектр комбинационного рассеяния образовавшихся фотоиндуцированных частиц с помощью измерения неупругого рассеяния (стоксовое и антистоксовое рассеяние). Природный алмаз можно отделить от иных материалов, в том числе образованных также исключительно связями углерод-углерод, по наличию интенсивной полосы в спектре комбинационного рассеяния -1332 см⁻¹ [2]. Однако данная полоса весьма чувствительна к различным отклонениям в кристаллической решетке, из чего следует, что алмазы с напряжениями, трещинами и дефектами имеют пониженную вероятность обнаружения спектроскопией комбинационного рассеяния. Также недостаток использования метода спектроскопии комбинационного рассеяния при сепарации алмазного сырья заключается в том, что при наличии на кристаллах сильных загрязнений, что естественно для обогащательных процессов, эффективность возбуждения существенно снижается.

Другой оптический метод основан на свойстве веществ люминесцировать под воздействием УФ-лучей. Внутрицентровое возбуждение основано на оптическом возбуждении с энергией излучения меньше ширины запрещенной зоны алмаза ($<5,4$ эВ). Попадая в вещество, излучение возбуждает примесные дефекты, энергетические уровни которых лежат в запрещенной зоне [3]. Применимость данного метода сепарации ограничена тем, что цвет фотолюминесценции разнообразен в зависимости от состава примесей и дефектов, часть алмазов не люминесцируют при облучении ультрафиолетовым излучением, а другая часть испускает излучение, трудно отличимое от свечения иных сопутствующих минералов (таких как кальцит, доломит, галит, микроклин и т.д.).

Если же энергия излучения больше ширины запрещенной зоны алмаза, то можно говорить о межзонном возбуждении. При воздействии на алмаз излучением с длиной волны от 180 до 225 нм происходит фотолюминесценция в видимой области спектра голубого цвета, что соответствует люминесценции А-полосы. Важным преимуществом метода оптического межзонного возбуждения является отличие кинетики люминесценции основных сопутствующих материалов от кинетики люминесценции алмазов. Недостатки состоят в том, что метод оптического межзонного возбуждения не позволяет выявлять «безазотные» алмазы, так как основан на кинетике затухания А-

полосы люминесценции, которая отсутствует в алмазах данного типа, а также имеются трудности с подбором оптимальной оптической схемы из-за использования в качестве источника эксиплексной лампы, которая создает высокий уровень шума.

Для обогащения золотосодержащих руд, кварца, полевого шпата активно применяется колориметрическая сепарация. Данный метод основан на определении цветовых характеристик разделяемых объектов путем измерения и совокупной оценки отражательной способности в трех спектральных областях – красной, зеленой и синей. Измерение оптических и геометрических параметров объекта осуществляется матричным приемником. Критерием распознавания материала служат характеристики на основе цветностей модели RGB [4]. Оптические системы обычно конструируют с применением сканирующих устройств, благодаря которым свет поступает на датчик последовательно с отдельных участков куска породы, что позволяет более четко отделять не только мономинеральные зерна, но и сростки с учетом доли извлекаемого минерала в них. Недостатки метода для первичного обогащения алмазосодержащих руд заключаются в необходимости предварительной тщательной подготовки материала и в разнообразии цветовой окраски алмазов, что приводит к необходимости создания большой базы данных всевозможных оптических признаков алмазов.

В последние годы в качестве источника излучения для обогащения минерального сырья активно стали применять лазеры. Метод лазерной сепарации минерального сырья основан на использовании различий в способности минералов отражать, пропускать и преломлять свет. При сепарации используют часть оптического спектра, в которой наблюдаются наибольшие различия в разделяемых материалах. В научной литературе не удалось обнаружить информацию о применении лазерного метода в обогащении алмазного сырья, однако предлагается рассмотреть принцип работы лазерного метода при обогащении кварцевого галечника [5]. Описанная технология лазерного сканирования основана на том, что быстровращающееся многогранное зеркало отражает один или несколько лазерных лучей разного цвета на участок сканирования и несколько датчиков, по одному на каждый цвет лазера, и затем анализируется отражённое изображение. Обратный сигнал каждого лазера фильтруется и поступает на соответствующий датчик. Совокупность данных со всех датчиков предоставляет необходимую информацию о каждом отдельно взятом образце и позволяет выявить кварц, так как чистые кристаллы создают эффект рассеивания, в отличие от пустой породы. Таким образом, кристаллы кварца обнаруживаются независимо от их цвета или химического состава. Преимущество использования лазерных источников при обогащении минерального сырья состоит в возможности создания мощного пучка света малого диаметра, что дает возможность анализировать руду крупностью, соизмеримой с выходным диаметром лазерного пучка, а также выделять не только мономинеральные зерна, но и сростки.

В ходе работы был проведен анализ основных существующих оптических методов сепарации алмазосодержащих руд. Рассмотренные существующие методы рентгеновской и оптической сепарации имеют ряд преимуществ и недостатков, описанных в таблице.

Таким образом, для решения проблемы высокого энергопотребления, упрощения технологического процесса, а также поиска возможности уменьшить применение рентгена или вовсе отказаться от него при обогащении алмазосодержащих руд на обогатительных фабриках необходимы дальнейшая разработка и исследование лазерно-трансмиссионного метода обогащения алмазного сырья.

**Преимущества и недостатки методов
 радиометрической сепарации алмазосодержащих руд**

Метод оптической сепарации	Преимущества	Недостатки
Рентгенолюминесцентная сепарация	<ul style="list-style-type: none"> • высокая селективность; • высокая производительность 	<ul style="list-style-type: none"> • не обнаруживает алмазы типа IIa; • высокое энергопотребление; • небезопасность использования рентгеновского излучения
Рентгенографическая сепарация	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет обнаружить нелюминесцирующие и слабо люминесцирующие алмазы; • высокая селективность; • высокая производительность 	<ul style="list-style-type: none"> • высокое энергопотребление; • небезопасность использования рентгеновского излучения; • производительность ниже, чем у рентгенолюминесцентного сепаратора
На основе спектроскопии комбинационного рассеяния	<ul style="list-style-type: none"> • высокая эффективность при сортировке алмазов; • позволяет отделить природные алмазы от искусственных; • позволяет отказаться от рентгеновского излучения 	<ul style="list-style-type: none"> • при наличии в алмазе напряжений, трещин и дефектов существенно снижается вероятность обнаружения; • сложный оптический тракт; • при наличии загрязнений на алмазе существенно снижается вероятность обнаружения
На основе ультрафиолетового внутрицентрового возбуждения	<ul style="list-style-type: none"> • эффективно при геолого-поисковых работах; • позволяет отказаться от рентгеновского излучения 	<ul style="list-style-type: none"> • цвет люминесценции разнообразен в зависимости от состава примесей и дефектов; • часть алмазов не люминесцирует; • часть алмазов испускает свечение трудно отличимое от люминесценции сопутствующего материала
На основе ультрафиолетового межзонного возбуждения	<ul style="list-style-type: none"> • позволяет отказаться от рентгеновского излучения; • высокая селективность 	<ul style="list-style-type: none"> • не обнаруживает алмазы типа IIa

продолжение таблицы

Метод оптической сепарации	Преимущества	Недостатки
Колориметрическая сепарация	<ul style="list-style-type: none"> • высокая производительность; • меньшее энергопотребление; • позволяет отказаться от рентгеновского излучения 	<ul style="list-style-type: none"> • требуется предварительная тщательная подготовки материала; • необходимо создание большой базы данных возможных оптических признаков алмазов
Лазерная сепарация	<ul style="list-style-type: none"> • высокая производительность; • меньшее энергопотребление; • позволяет обнаружить алмазы всех типов; • позволяет обнаруживать алмазы крупностью, соизмеримой с выходным диаметром пучка • позволяет отказаться от рентгеновского излучения 	<ul style="list-style-type: none"> • не изучено применение при первичном обогащении алмазосодержащих руд

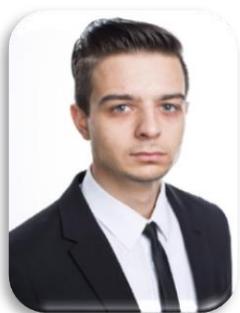
Литература

1. Авдохин В.М., Чернышева Е.Н. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов / Авдохин В.М., Чернышева Е.Н. // Горный журнал. 2010. №26. с. 465-477.
2. Lim H., Park S., Cheong H. Photoluminescence of nature diamonds / Hyunjin Lim, Sooyoun Park, Hyeonsik Cheong // Journal of the Korean Physical Society. 2006. vol. 48 no. 6 p. 1556-1559.
3. Емельянова А.С. Взаимодействие лазерного излучения с кристаллами алмаза при межзонном и внутрицентровом возбуждении / Емельянова А.С. // Труды международной байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. 2015. №1. с. 234-236.
4. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов в 3т. / Абрамов А.А. 2-е изд., стер. М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2001. Т.1 Обогащительные процессы и аппараты. 510 с.
5. Роббен К., Вортуба Г. Обогащение полезных ископаемых с применением лазерных технологий / Роббен К., Вортуба Г. // Добывающая промышленность. 2018. №4. с. 148-149.



Алейник Артём Сергеевич

Год рождения: 1985
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н., доцент,
e-mail: yartemal@yandex.ru



Кикилич Никита Евгеньевич

Год рождения: 1991
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н., научный сотрудник,
e-mail: kikilich@mail.ru



Моторин Евгений Анатольевич

Год рождения: 1992
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
инженер,
e-mail: kaktuss001@yandex.ru



Погудин Григорий Константинович

Год рождения: 1996
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
аспирант,
направление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,
оптические и биотехнические системы и технологии,
e-mail: gkpogudin@itmo.ru

УДК 681.7.068.2; 681.7.024.6

**НАДЁЖНОСТЬ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

Н.Е. Кикилич, Е.А. Моторин, Г.К. Погудин
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.С. Алейник

Работа выполнена в рамках темы НИР №219978 «Изготовление блоков оптического усиления».

Аннотация

В данной работе представлены сравнение методов сварки оптического волокна, а также влияние метода сварки, растворителя, диаметра изгиба оптоволокна на надёжность

сварного соединения оптоволоконна. Приведены рекомендации по улучшению надёжности сварочных соединений оптоволокон.

Ключевые слова

Оптоволоконно, оптоволоконный усилитель, сварные соединения, сварка электрической дугой, лазерная сварка.

Неоспоримые преимущества оптического волокна по сравнению с проводными линиями связи обеспечивают всё большее распространение волоконно-оптических линий связи по всему миру. На рис. 1 представлена схема подводных трансконтинентальных линий связи по состоянию на январь 2021 года.

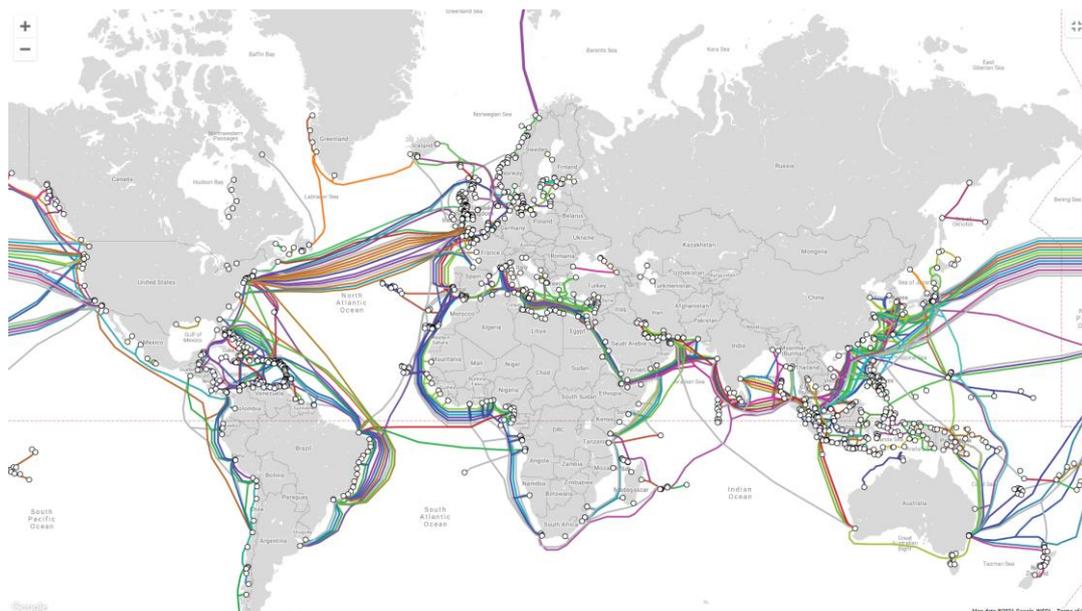


Рис. 1. Карта подводных оптоволоконных линий по состоянию на январь 2021-го года [1]

В частности, в России с начала нулевых годов протяжённость ВОЛС ежегодно увеличивается на тысячи и десятки тысяч километров наземных линий, связывающих отдаленные регионы в единую сеть. В соответствии со Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года, утверждённой Президентом РФ в октябре прошлого года, к 2030 году запланировано создание трансарктической магистральной подводной волоконно-оптической линии связи по трассе Северного морского пути [2]. Отдалённость и труднодоступность отдельных районов, по которым прокладываются ВОЛС, сложные климатические условия нашей страны выдвигают особые требования по надёжности к этим магистралям. Тем более это требование относится к подводным линиям связи и особенно к прокладываемым в замерзающих морях.

Помимо оптоволоконного кабеля, в волоконно-оптических линиях связи для усиления оптического сигнала используются оптоволоконные усилители, устанавливаемые на всём протяжении оптоволоконной линии через каждые 50-100 км. На рис. 2 представлена упрощённая блок-схема одного из вариантов исполнения оптоволоконного усилителя.

Известно, что на надёжность любой системы в целом влияет надёжность её элементов и их количество. Одним из элементов с наименьшей надёжностью в конструкции данных усилителей обладают лазерные диоды. Нароботка до отказа одного сварного соединения больше, чем у лазерного диода. Однако, так как в усилителях в зависимости от оптической схемы существует до сотни сварных соединений, надёжность сварного соединения имеет большое значение.

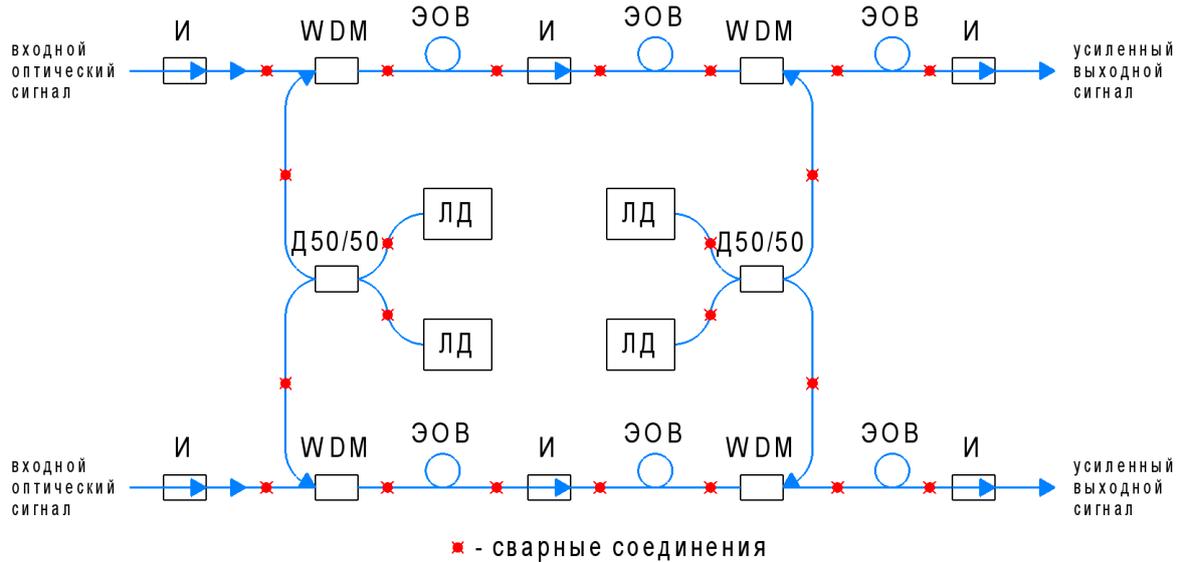


Рис. 2. Блок-схема оптоволоконного усилителя:

И – оптический изолятор; WDM (Wavelength Division Multiplexer) – мультиплексор;
 ЭОВ – эрбиевое оптоволокно; ЛД – лазерный диод; Д50/50 – делитель мощности 1×2.
 Красными точками обозначены сварные соединения

Оптоволоконные кабели в процессе эксплуатации могут подвергнуться воздействиям техногенного или природного характера, например изменению температуры или механическому растяжению. Согласно [3], время наработки до отказа оптоволокна

$$t_f = \frac{B \cdot S^{(n-2)}}{\sigma^n}, \quad (1)$$

где B – параметр хрупкости материала, также зависящий от внешней среды; S – статическая прочность волокна; σ – прикладываемое к волокну напряжение; $n \cong 20$ – константа для волокна в оболочке, полученная экспериментально.

Уравнение (1) дает качественное представление о взаимосвязи между напряжением, дефектами волокна и влиянием окружающей среды на надёжность волокна. Смысл этого уравнения – резкое сокращение срока службы волокна в результате небольших изменений прочности или приложенного напряжения. Так, например, для нового волокна с $n = 20$ прогнозируемое время наработки до отказа 1000 лет. При увеличении нагрузки на 25% время наработки до отказа сократится до 10 лет, а при росте нагрузки на 40% – до 1 года. В табл. 1 показаны различные виды прочности волокна и прикладываемого напряжения, а также соответствующие им характерные значения.

В процессе развития оптоволоконных технологий совершенствовались и методы сварки оптоволокна. Исторически первым применялся метод сварки открытым пламенем газовой горелки, который затем был вытеснен последовательно методами сварки электрической дугой, нагревательным элементом и газовым лазером. В настоящее время наиболее широко применяются методы сварки электрической дугой и газовым лазером. В табл. 2 перечислены преимущества и недостатки основных методов сварки.

Таблица 1

**Характерные значения прочности оптоволокна
 и прикладываемого напряжения при различных условиях [3]**

Прочность оптоволокна или напряжение, килофунт-сила/дюйм ²	Прочность оптоволокна или напряжение, МПа	Виды прочности или прикладываемого напряжения
> 2000	> 13800	Теоретически достижимая прочность
550	3800	Медианная прочность нового волокна
300	2100	Прочность сварного соединения для подводных применений
200	1400	Прочность при механическом снятии изоляции волокна
200	1400	Напряжение, прикладываемое при испытании на прочность волокна для подводных применений
100	700	Напряжение, прикладываемое при испытании на прочность на прочность
< 50	< 350	Прочность при значительном повреждении волокна в процессе механического снятия изоляции

Таблица 2

Сравнение методов сварки [4]

Метод	Преимущества	Недостатки
Открытое пламя газовой горелки	– Широкая область нагрева (~5 мм)	– Требуется система подачи газа – Сильная зависимость надёжности сварного соединения от человеческого фактора – Повышенные требования к безопасности
Нагревательный элемент	– Концентрический (равномерный) источник нагрева – Масштабирование зоны нагрева за счёт размеров и материала нагревательного элемента	– Сварка проводится в присутствии инертного газа (аргона) – Осаждение материала нагревательного элемента на поверхности волокна – Сложность при замене нагревательного элемента – Проблема чистоты газа

продолжение таблицы

Метод	Преимущества	Недостатки
Электрическая дуга	Не требуется газ	Осаждение частиц SiO_2 на поверхности волокна при загрязнении электродов
Газовый CO_2 лазер	<ul style="list-style-type: none"> – Регулировка размеров зоны нагрева ($\sim 0.4 - 4$ мм) – Отсутствуют затраты на расходники – Прочность сварки до 650 килофунт-сил/дюйм² 	<ul style="list-style-type: none"> – Повышенные требования к безопасности – Высокие начальные инвестиции в оборудование (высокая стоимость газового лазера)

В процессе сварки электрической дугой на поверхности оптоволокна осаждаются частицы оксида кремния и материала электродов. Частицы кремния аккумулируются и на электродах, что постепенно снижает прочность последующих (рис. 3).

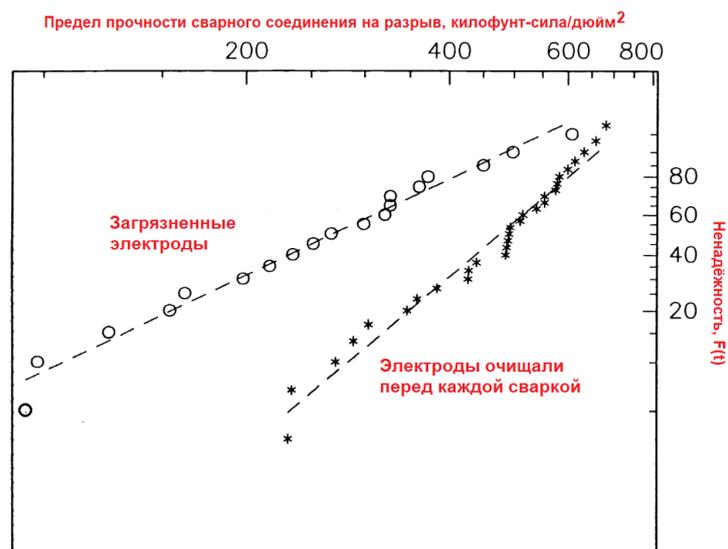


Рис. 3. Влияние чистоты электродов при сварке электрической дугой на прочность сварного соединения [5]

Для повышения надёжности сварного соединения по некоторым источникам [4] рекомендуется заменять электроды, являющиеся расходным материалом, через каждые 500 сварок, поэтому дополнительным преимуществом лазерной сварки является отсутствие электродов, а также более резкая граница зоны нагрева.

Для удаления загрязнений с поверхности волокна применяют химические растворители. Наиболее распространёнными являются изопропиловый спирт, этанол и ацетон. В статье [4] приводятся результаты исследования влияния данных растворов на прочность сварного соединения, так как после очистки различными растворителями поверхность волокна может по-разному адсорбировать влагу. Большое количество влаги, в свою очередь, снижает срок службы волокна. Согласно результатам исследования, представленным в работе [4], использование ацетона при ультразвуковой очистке предпочтительнее, потому что прочность, как указано в табл. 3, в этом случае выше. Данные в табл. 3 приведены для сварки электрической дугой.

Зависимость прочности сварного соединения после ультразвуковой очистки от растворителя, времени и интенсивности очистки [4]

Растворитель	Этанол		Изопропиловый спирт		Ацетон	
	30 с.	60 с.	30 с.	60 с.	30 с.	60 с.
Интенсивность очистки	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
Минимальное значение прочности, килофунт-сила/дюйм ²	238	306	264	357	355	263
Максимальное значение прочности, килофунт-сила/дюйм ²	409	499	522	536	564	547
Среднее значение прочности, килофунт-сила/дюйм ²	340	400	384	427	451	439
СКО, килофунт-сила/дюйм ²	47	58	76	54	67	87

Для сварки лазером результаты исследований показаны на рис. 4. Исходя из данных, приведённых на графике, надёжность сварного соединения при обработке ацетоном в случае лазерной сварки также выше.

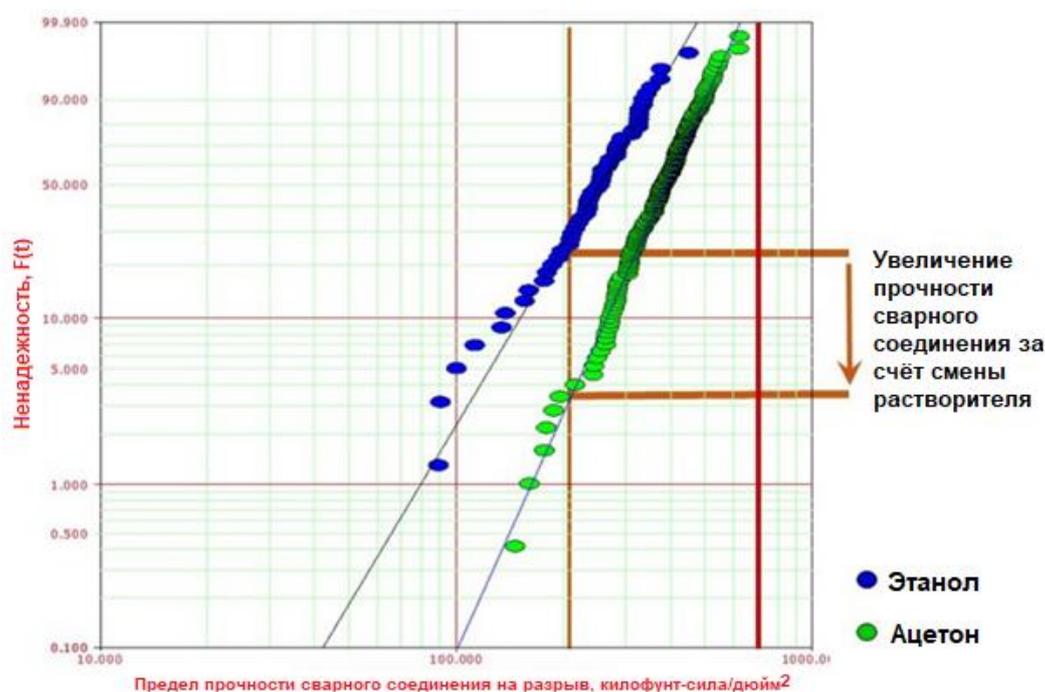


Рис. 4. Влияние растворителя на надёжность сварного соединения при лазерной сварке [4]

Немаловажным фактором, влияющим на надёжность сварных соединений, является диаметр изгиба волокна. Ограниченное пространство и уплотнённое расположение элементов внутри телекоммуникационного оборудования требуют уменьшения диаметра изгиба волокна. В работе [6] с помощью экспериментальных данных, полученных при динамических испытаниях сварных соединений на

растяжение, и математической модели была оценена зависимость срока службы сварных соединений от диаметра изгиба волокна; результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Расчётный срок службы сварного соединения волокна
в зависимости от диаметра изгиба оптоволокна в области сварного соединения [6]**

Диаметр изгиба, мм	Напряжение, ГПа	Срок службы
5	1,81	89 с
10	0,90	15 дней
20	0,45	600 лет
30	0,30	10 ⁵ лет
40	0,23	10 ⁷ лет
50	0,18	10 ⁸ лет
60	0,15	10 ⁹ лет

Например, при диаметре изгиба 50 мм расчетный срок службы составит 100 миллионов лет. Однако можно отметить, что меньшие диаметры изгиба используются редко из-за повышенных оптических потерь на изгибах.

Таким образом, в результате обзора можно заключить, что надёжность сварных соединений оптоволокна зависит от метода сварки, вида растворителя для очистки поверхности оптоволокна, чистоты электродов при сварке электрической дугой и диаметра изгиба оптоволокна. Далее, для создания сварных соединений повышенной надёжности рекомендуется применять метод сварки лазером. Сварка электрической дугой, в свою очередь, требует контроля чистоты поверхности электродов и их периодической замены. Наконец, в качестве растворителя для ультразвуковой очистки поверхности оптоволокна перед сваркой предпочтительнее использование ацетона.

Литература

1. Submarine Cable Map [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.submarinemap.com>, свободный – Загл. с экрана (дата обращения: 25.01.2021).
2. Указ Президента РФ «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/J8FhckYOPAQQfxN6Xlt6ti6XzpTVAvQy.pdf>, свободный. Загл. с экрана (дата обращения: 25.01.2021).
3. Wood W.W. Reliability of optical connectors and splices [Текст] / Wood W.W. // Fiber Optics Reliability and Testing: Benign and Adverse Environments: сб. тез. докладов конф. 1994. V. 2074. P. 276-287.
4. Duke M.D. Benefits of CO2 laser heating for high reliability fiber splicing [Текст] / M.D. Duke, [et all.] // Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXI: сб. тез. докладов конф. 2016. V. 9735. P. 97351B.
5. Krause T.J. Factors affecting arc fusion splice strengths [Текст] / Krause T.J., Stroumbakis D. // Optical Network Engineering and Integrity: сб. тез. докладов конф. 1996. V. 2611. P. 98-109.
6. Zimnol M. Lifetime of splices under tension [Текст] / Zimnol M., [et all.] // 24th European Conference on Optical Communication: сб. тез. докладов конф. 1998. V. 1. P. 361-362.



Родикова Лилиана Сергеевна

Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
магистрант группы №В42013с,
направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,
e-mail: liliana.baranowa@yandex.ru



Коротаев Валерий Викторович

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.т.н., профессор,
e-mail: vvkorotaev@itmo.ru



Тимофеев Александр Николаевич

Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н, с.н.с.,
e-mail: timofeev@itmo.ru

УДК 681.786

**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ РАБОЧИХ
ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН В РЕЖИМЕ ВАЛОПОВОРОТА**

Л.С. Родикова, В.В. Коротаев, А.Н. Тимофеев

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Коротаев

Работа выполнена в рамках темы НИР №620170 «Разработка методов и средств для решения прикладных задач опотехники и биоинженерии».

Аннотация

Контроль и диагностика повреждений рабочих лопаток без вскрытия цилиндра являются актуальной проблемой обеспечения надежности работы паровой турбины. Видеоэндоскопирование поверхностей рабочих лопаток позволит решить поставленную задачу и существенно ускорить процесс контроля эрозийного износа лопаточного аппарата. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить наиболее влияющие составляющие погрешности контроля рабочих лопаток.

Ключевые слова

Турбины паровые, лопатки рабочие, эндоскопия, погрешность контроля, эрозийный износ, деформации.

Рабочие лопатки паровых турбин подвергаются разрушению вследствие больших каплеударных нагрузок и протекающих эрозионных процессов. Периодический контроль состояния лопаток позволяет выявить начальные стадии процесса их разрушения, произвести своевременный ремонт и предотвратить поломку турбины.

Перспективным решением этой технологической задачи является применение систем видеозендоскопирования [1]. Основным элементом таких системы является эндоскоп, который, в свою очередь, включает объектив, матричный фотоприёмник, источник подсветки и модуль обработки изображений. При этом работа системы состоит в том, чтобы синхронно с вращением ротора турбины снимать каждую рабочую лопатку и по полученным изображениям определять величину хорды. По этой величине и судят об износе лопаточного аппарата [2].

Сложные условия применения (температура, влажность), работа в условиях ограниченного пространства (большая глубина изображаемого пространства) оказывают негативное воздействие на процесс контроля. Поэтому целью настоящей работы являлись теоретические и экспериментальные исследования влияния составляющих погрешности контроля величины хорды рабочих лопаток и возможных путей ослабления или их компенсации.

В рассматриваемой оптической схеме видеозонда 1 (рис. 1) плоскость YOX , в которой перемещаются рабочие лопатки 5 с линейной скоростью V , объективом 2 сопрягается с плоскостью $Y'O'X'$ (оси OX и $O'X'$ перпендикулярны плоскости чертежа). Когда fotocувствительная плоскость приёмника совпадает с плоскостью $Y'O'X'$, в первом приближении формулу связи между регистрируемым размером хорды 4 B'_i и его действительным значением b_i можно записать в виде выражения

$$b_i = B'_i \sqrt{\frac{(z_0 - f_{об})^2}{f_{об}^2} + \text{tg}^2 \alpha_i}, \quad (1)$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива, z_0 – расстояние от главной плоскости объектива HH' до оси рабочей лопатки, α_i – угол наклона хорды рабочей лопатки.

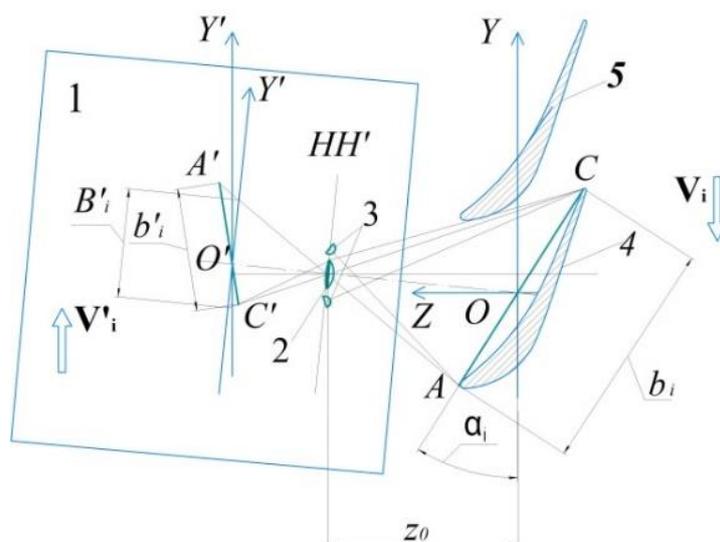


Рис. 1. Схема хода лучей в оптической схеме видеозонда при контроле величины хорды рабочей лопатки

Для эффективной работы фотоприёмника источниками оптического излучения 3 осуществляется импульсная подсветка кромок рабочих лопаток A и C .

Анализируя схему (рис. 1) и выражение (1), нетрудно увидеть, что для эффективной работы системы выбор параметров элементов и их работа оказывает существенное влияние на определение величины хорды рабочих лопаток.

Существующие конструктивные решения по способу подсветки в эндоскопах делятся на три типа: светодиодная подсветка, световод и осветительная лампа. Последний тип практически не используется из-за конструктивных трудностей реализации и больших габаритов. Светодиодные осветители в целом по своим техническим характеристикам не уступают световоду, однако они гораздо эффективнее для импульсной подсветки и дешевле, из-за чего они являются более распространёнными. Поэтому наиболее подходящим решением для реализации источника излучения в разрабатываемом эндоскопе является светодиодная подсветка.

Наиболее важными требованиями к источнику излучения для проектируемой системы являются малые габариты, мощность и угол излучения, так как необходимо осветить объект большой площади, находящийся на достаточно малом расстоянии до него. Согласно проведенным расчетам, необходимый угол излучения должен быть не менее 110° . Светодиод КРННС-1005SYСК фирмы Kingbright (с параметрами: максимум спектра излучения 590 нм, угол излучения 120° , максимальная сила света 60 мКд) удовлетворяет всем перечисленным требованиям [3].

Для обеспечения погрешности контроля величины хорды не более 0,3 мм на расстояниях до лопаток 80-120 мм при размере хорды рабочих лопаток 200 мм получено, что разрешающая способность на фотоприемнике должна быть не менее 833 телевизионных линий.

С учетом того, что выбираемая матрица должна быть чувствительна к излучению светодиода КРННС-1005SYСК, а ее размер не должен превышать 1/3 дюйма, выбрана монохромная КМОП-матрица IMX238LQJ фирмы Sony с числом активных пикселей 1296×1041 пкс и размером одного пикселя $3,75 \times 3,75$ мкм [4].

Габаритно-энергетический расчет показал, что при необходимом фокусном расстоянии объектива $f'=3$ мм и угле обзора $2\omega \geq 110^\circ$ диаметр входного зрачка объектива должен быть не менее $D_{ex} \geq 0,88$ мм. Исходя из указанных параметров, выбран промышленный широкоугольный объектив марки Finite conjugate производства TECHSPEC, имеющий параметры: $f'=3$ мм, $2\omega=110^\circ$, $D/f=1:2.5$ [5].

Для указанных параметров и выбранных элементов схемы видеоозонда оценена суммарная погрешность работы системы и проанализировано влияние ее составляющих.

При анализе погрешностей к факторам, влияющим на работу системы, были отнесены погрешности: задания фокусного расстояния объектива; задания расстояние до оси рабочей лопатки; от нестабильности времени экспозиции; от изменения углов наклона хорды по сечениям; от неопределенности радиуса сечения рабочей лопатки; от шумов фотоприемного матричного поля анализа; от температурной деформации корпуса. Также из-за того, что контроль происходит в движении, то есть в режиме валоповорота, в системе присутствует такие динамические погрешности, как влияние скоростного смаза изображения и погрешность от нестабильности частоты вращения ротора.

Для анализа погрешности контроля использовался метод частных производных от функций по соответствующим влияющим параметрам. В качестве исходной формулы была взята функция контроля размера хорды b_i , (1) включающая в себя основные источники первичных погрешностей параметров оптической схемы [1].

Полученные результаты вычислений для наглядности представлены в виде диаграммы влияния всех составляющих погрешностей измерения с указанием процентного вклада в суммарную погрешность (рис. 2, а).

Из диаграммы следует, что наибольший вклад вносят погрешность неточности задания фокусного расстояния (67%), погрешность задания расстояния от центра рабочей лопатки до входного зрачка объектива (15%), погрешности от воздействия температуры окружающей среды и от нестабильности угла наклона хорды (по 7%).

Две наиболее влияющие погрешности определения ширины хорды от неточности задания фокусного расстояния объектива и неопределенности расстояния от видеозонда до оси рабочей лопатки являются систематическими и поэтому могут быть компенсированы при калибровке системы. При возможности собственной калибровки видеозонда эти погрешности могут быть уменьшены до величин, не превышающих погрешности, обусловленной внутренними шумами приемника оптического излучения.

После компенсации процентный вклад составляющих изменился, процент влияния неточности задания фокусного расстояния составил всего 5% (рис. 2, б). Наибольшее влияние теперь оказывают погрешность от нестабильности угла наклона хорды (25%), погрешность задания расстояния до центра рабочей лопатки (15%) и погрешность от воздействия температуры окружающей среды (12%).

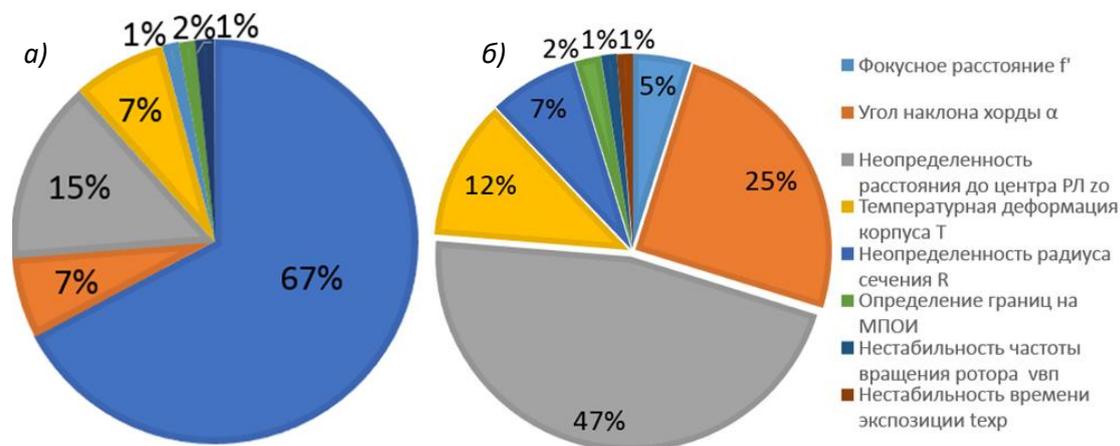


Рис. 2. Диаграмма для оценки влияния каждой фактора влияющего на погрешность измерения до калибровки (а) и после (б)

Эксперимент, проводимый в статике (при неподвижных рабочих лопатках), показал, что оценка измеренного значения хорды рабочей лопатки, равной 103 мм (рис. 3), составила 103,09 мм при СКО результатов измерений 0,39 мм.

Проведенный эксперимент по оценке влияния динамической погрешности для рабочей лопатки с тем же размером хорды равным, 103 мм, показал, что оценка измеренного значения этой величины в динамике составила 103,33 мм при СКО результатов измерений равной 0,88 мм.

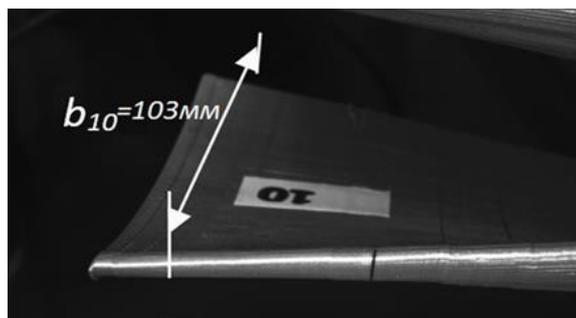


Рис. 3. Изображение модели рабочей лопатки с шириной хорды 103 мм

Заметное увеличение суммарной погрешности, выявленное экспериментом, обусловлено нестабильностью частоты вращения ротора и скоростным смазом изображения, которые появляются при захвате кадров рабочих лопаток в движении.

Руководствуясь заданными характеристиками системы, предложено использовать в качестве основных элементов видеоэндоскопа: светодиоды с силой света 60 мКд и углом излучения 120°; КМОП-матрицу с диагональю 1/3 дюйма и числом активных пикселей 1296x1041 пкс; объектив с фокусным расстоянием $f'=3,0$ мм с относительным отверстием $D/f=1:2.5$ и угловым полем $2\omega=110^\circ$.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований влияния составляющих погрешности контроля величины хорды рабочих лопаток выявлено, что наиболее сильное влияние оказывают погрешность от нестабильности угла наклона хорды, погрешность задания расстояния до центра рабочей лопатки и погрешность от воздействия температуры окружающей среды.

Литература

1. Шуть Г.А., Коротаев В.В., Пузырев Е.И., Рыжова В.А., Тимофеев А.Н., Ахмеров А.Х., Родикова Л.С. Видеоэндоскопирование рабочих лопаток паровых турбин и контроль их геометрических параметров // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 11. С. 58-67.
2. Шуть Г.А., Пузырев Е.И., Васильева А.В., Васильев А.С., Некрылов И.С., Ахмеров А.Х., Тимофеев А.Н. Комплексная система эндоскопирования для контроля эрозийного износа лопаток паровых турбин // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 3. С. 228-237.
3. KPHHS-1005SYCK Datasheet Kingbright [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/product/kphhs-1005syck> (дата обращения 05.11.2020)
4. IMX238LQJ Datasheet Sony Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/Sony/IMX238LQJ-C/pdf.php.id=10046821> (дата обращения 08.12.2020).
5. TECHSPEC Rugged Blue Series M12 Lenses. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.edmundoptics.co.uk/f/rugged-blue-series-m12-lenses/36005/> (дата обращения 21.12.2020).



Сафонов Павел Андреевич

Год рождения: 1998

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

магистрант группы №В4100с,

направление подготовки: 12.04.02 – Оптехника,

e-mail: safonovalm@yandex.ru



Коротаев Валерий Викторович

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

д.т.н., профессор,

e-mail: vvkorotaev@itmo.ru

УДК 681.7.015.2; 621.78.3

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ

П.А. Сафонов, В.В. Коротаев

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Коротаев

Аннотация

Цель работы: анализ текущего состояния и перспектив развития рынка тепловизионной техники в мире и в России. Выделены ключевые факторы, приведшие к изменению структуры рынка за последние годы. Произведен обзор приемников оптического излучения инфракрасного диапазона и оптических материалов. Актуальность темы определяется быстрыми темпами развития данного направления в последнее время, в том числе более широким применением медицинских термометров и тепловизоров в условиях пандемии 2020 года.

Ключевые слова

Тепловизионная техника, элементная база, инфракрасные приемники оптического излучения.

Быстрые темпы развития тепловизионной техники за последние годы, обусловленные, в том числе, достижениями в технологиях создания элементной базы и материалов, привели к изменению структуры рынка тепловизоров и его потребностей. Исследование современного состояния в данной области проводилось в несколько этапов: рассмотрение ситуации и выявление причинно-следственных связей на мировом и российском рынке, последующий сравнительный анализ, позволяющий оценить, насколько состояние с тепловизионной техникой в России соотносится с общемировыми тенденциями.

С момента своего возникновения мировой рынок тепловизионной техники рос, прежде всего, из-за военных применений. Сегодня военный сектор обеспечивает рынку некоторый рост, но парадигма его развития изменилась. Из графика на рис. 1 видно, что сегодня основной рост рынка обеспечивает гражданское направление [1].

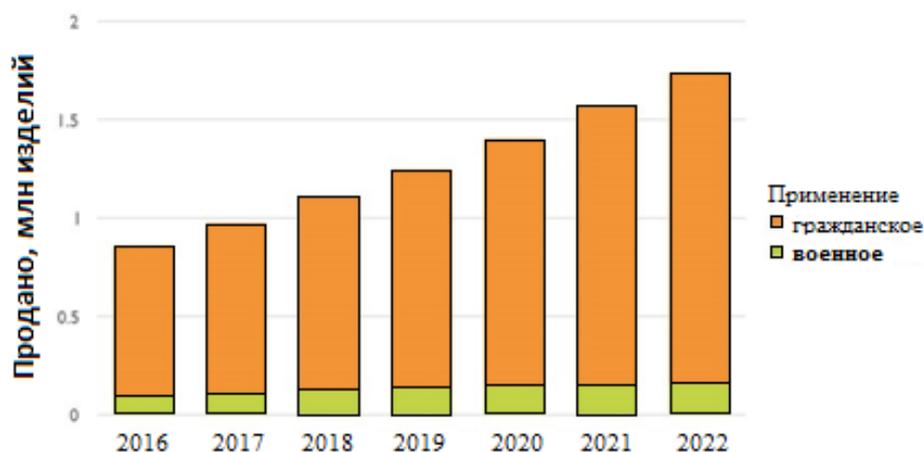


Рис. 1. Продажи тепловизоров (прогноз на 2021-2022г.)

Согласно данным Maxtech International (США), полученным до начала эпидемии COVID-19, рынок ИК-систем составлял в 2017 г. 10,5 миллиардов долларов и уже к 2025 г. мог достигнуть 20 миллиардов долларов. Теперь эти цифры могут быть значительно выше, полагают эксперты [2].

Подтверждением вышесказанного стала пандемия COVID-19, которая явилась дополнительным стимулом в широком развитии тепловизионной техники, причем именно в гражданском секторе что, в свою очередь, вызвало рост мирового рынка. При этом отмечается устойчивая тенденция последних лет: тепловизионная техника постепенно переходит из дорогого, узкоспециализированного рыночного сегмента в массовый, от насадок на телефоны до приборов наблюдения и контроля. И этот сектор дает наибольшую прибыль.

Если говорить о географии стран-производителей, то вполне очевидно, что это в первую очередь экономически развитые страны - США, Франция, Великобритания, Израиль, Германия (рис. 2.) [3].

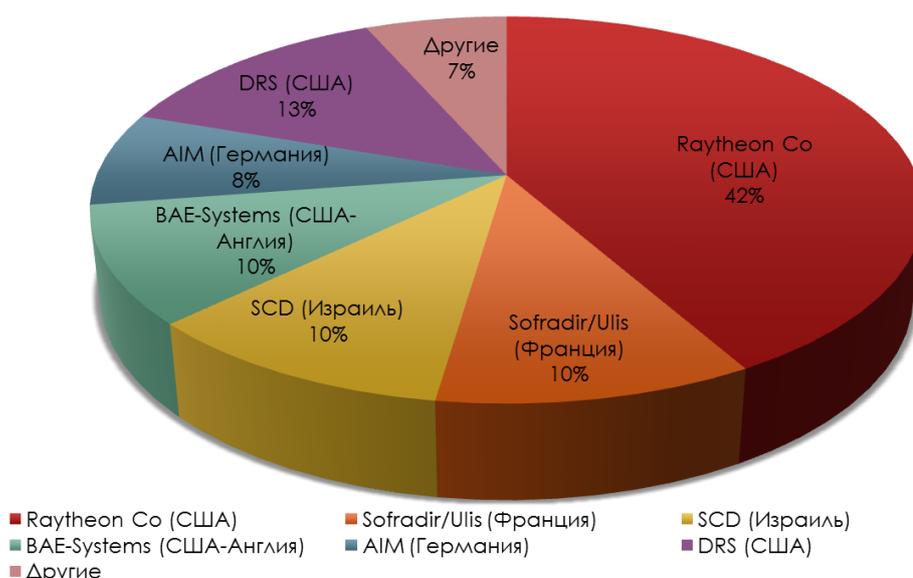


Рис. 2. Основные производители тепловизионной техники. Мировой рынок, до пандемии

Это легко объяснимо – развитие данной тематики требует наличия высоких технологий и первоначально стимулировалось оборонными заказами. На сегодняшний день лидерами являются такие компании, как Raytheon, Sofradir/Ulis, SEEK, British Aerospace, Dahua Technology.

Тем не менее, уже в последние годы на мировом рынке тепловизионной техники наметилась вполне объяснимая тенденция – появление новых производителей из Южной Кореи, Китая, Японии и других стран Юго-Восточной Азии, которые усиливают конкурентную борьбу, что в результате делает тепловизионное оборудование более доступным. Проведенный анализ позволил выделить следующие факторы, позволяющие компаниям быть среди лидеров современного общемирового рынка: реализация инновационных технологий, минимизирующих массогабаритные характеристики; экономическая эффективность продукции, достигаемая массовостью производства; расширение сфер применения устройств; ориентация на гражданский сектор; привлекательная для потребителя доступная ценовая ниша.

Рассмотрение ситуации на российском рынке показывает следующую картину.

Тепловизионный рынок России в 2015 г. составлял 4878 шт. А уже в 2016 г. объем рынка вырос на 23%, составив 5989 шт. [4]. При этом объем экспорта тепловизионных приборов в том же 2016 году составил всего 109 шт. Предпочтение зачастую отдавалось именно военному сектору, хотя гражданский сектор (то есть бытовое применение) дает самую высокую прибыль при массовом производстве.

При этом следует отметить, что российскому рынку присуща определенная специфика – значительная часть отечественных производителей приборов используют импортные компоненты. Пример - тепловизионные прицелы для охоты. В тройке наиболее популярных – изделия российского производства. Однако матрицы для данных прицелов производит Франция, что увеличивает стоимость изделия. Кроме того, производство может оказаться под угрозой в случае ужесточения антироссийских санкций. Другой пример: в РФ до определенного времени серийно не производили сенсоры в диапазоне LWIR, зачастую используя производителей из юго-восточной Азии.

В результате существуют изделия хорошего качества, разработанные в России, с отечественным программным обеспечением, но собранные на импортной элементной базе.

Сегодня для отечественного рынка тепловизионного оборудования, как, впрочем, и общемирового, стало характерным появление новых участников. Но причины здесь иного характера. Если в начале 2000-х годов доля тепловизоров для измерений производства компании FLIR составляла 90%, то пришедшая политика санкций против нашей страны и ценовое давление привели к закрытию российского филиала компании, и ниша была занята конкурентами из Китая, Германии, Японии.

По состоянию на начало 2020 г. на российском рынке можно выделить следующие ключевые фигуры (в скобках приводится доля рынка): Hikvision (28%), Dahua (21%), FLIR Systems (18%), Axis Communications (16%), «Швабе» (11%). Как видно - и здесь доля отечественных тепловизоров также невысока.

Эксперты уверены [1], что возможен многократный рост объема рынка с увеличением доли участия российских компаний. Сегодня в России уже разрабатывают и выпускают тепловизоры, состоящие полностью из отечественных комплектующих. В частности, этим занимается холдинг «Швабе» госкорпорации «Ростехнология». Среди крупных производителей можно выделить ОКБ «Астрон», ЦНИИ «Циклон» холдинга «Росэлектроника», ОАО «Вологодский оптико-механический завод» холдинга «Швабе», которые продолжают совершенствование своей продукции.

Определенный интерес представляют двухдиапазонные сканирующие системы, производимые из отечественных комплектующих – например, комплекс

видеонаблюдения АСТРОН-4К или разработка АО «ПО УОМЗ» СОН-730. Такие системы, иногда называемые гибридными, так как они обладают двумя камерами, работающими в видимом и инфракрасном диапазонах, а затем производится полное совмещение тепловизионного и телевизионного изображений в одном кадре. Программное обеспечение является также отечественной разработкой.

Говоря о востребованности тепловизоров в разных областях хозяйственной деятельности в России, большинство экспертов сошлись к следующему распределению [1-4]: охрана и системы безопасности являются лидерами, затем следуют медицина, энергетика и промышленность.

Драйвером совершенствования тепловизионных систем является развитие элементной базы — новых оптических систем, фотоприемных устройств (ФПУ), схем обработки сигналов, систем отображения и др. В работе был произведен обзор тепловых детекторов как одной из наиболее важных составляющих тепловизора.

Все многообразие детекторов можно разделить на два класса: на фотонные детекторы и на тепловые приемники излучения, в первую очередь микроболометры. Фотонные детекторы обладают большей чувствительностью, однако сложны в производстве, поэтому их цена выше и свое применение они находят в военных изделиях и приборах для промышленности и научных исследований.

Микроболометры обладают меньшей чувствительностью, но зато они дешевле, и именно поэтому их чаще используют в гражданском секторе. С начала 2000 года достигнуты значительные результаты в создании неохлаждаемых тепловых приемников оптического излучения ИК-диапазона, которые, во-первых, сравнимы по своим характеристикам с фотонными детекторами, а во-вторых, значительно дешевле. Поэтому сегодня количество произведенных неохлаждаемых болометров в несколько раз превышает рынок инфракрасных матриц прочих типов (рис. 3) [2].

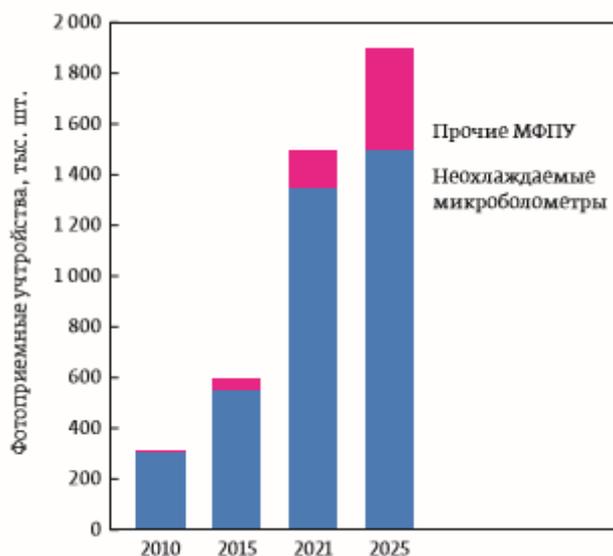


Рис. 3. Рынок фотоприемных устройств

Так, в 2018 г. специалистами АО «ОКБ «Астрон» удалось разработать конструкцию пикселя микроболометрической матрицы, имеющего равные коэффициенты поглощения в двух спектральных диапазонах – 3...5 и 8...14 мкм.

Сегодня основные работы в части развития фотоэлектронных модулей сосредоточены на уменьшении массогабаритных показателей и потребляемой мощности. Основной формат матричных фотоприемных устройств составляет де-факто 640×512 элементов при шаге 15 мкм. Эксперты полагают, что по показателю

«цена/качество» данный формат сохранит данную позицию приблизительно до 2025 г. В то же время рядом передовых разработчиков на коммерческий рынок выводится мегапиксельный формат 1280×1024 элементов, хотя пока цены на них достаточно высоки, что затрудняет массовый переход на этот формат. Из анализа различных источников, посвященных этой теме, становится очевидным, что рост потребителей неохлаждаемых болометров проявляется именно за счет гражданского сектора, который не испытывает потребности в высокой обнаружительной способности и готов пожертвовать ей ради низкой цены. Иными словами, зачастую речь идет об обнаружении и, возможно, различении, но не об идентификации.

Проведенный сравнительный анализ параметров неохлаждаемых микроболометрических матриц различных производителей позволил прийти к выводу, что российская продукция близка по своим показателям к мировому уровню. В качестве примера в табл. 1 приводятся данные ряда серийных изделий ведущих предприятий [5]. В качестве образца российской продукции взят тепловизионный детектор компании «Астрон». Данное фотоприемное устройство работает в спектральном диапазоне 7-14 мкм, имеет типичный для ряда аналогичных изделий шаг фоточувствительных элементов равный 17 мкм.

Таблица 1

Данные ряда серийных изделий ведущих предприятий

Параметры	Sofradir/ULIS (Франция)	Raytheon (США)	North Guangwei Technology- GWIC (Китай)	FLIR Systems (США)	ОКБ Астрон (Россия)
Название матрицы	Pico 1024E	AAQ-27	GWIR0302X1A	Tau640	Астрон 64017-1
Материал	a-Si	VOx	VOx	VOx	VOx
Формат матрицы	1024x768	2048x1024	640x512	640x512	640x480
Диапазон спектр. чувствительности, мкм	8..14	7..13	8..14	7,5..13	7..14
Шаг ФЧЭ, мкм	17	17	17	17	17
NETD, мК	60	<50	40	<50	40

Производят в России и фотонные матрицы (табл. 2) – это НПО “Орион”, московский завод “Сапфир” (для спектрального диапазона 3-5 мкм) и АО “ОКБ”Астрон“ совместно с ИФП СО РАН (8-12 мкм) [2].

Таблица 2

Фотонные матрицы

Параметры	НПО “Орион”	МЗ “Сапфир”	АО “ОКБ”Астрон“ и ИФП СО РАН
Приборы	ФЭМ18М-03, ФЭМ16М-01	ФУК-149М, ФУК-154М	АСТРОН- 640КРТ15А810
Материал	InSb	InSb	CdHgTe/Si
Формат матрицы	640x512 320x256	320x240, 320x256	640x480/512
Диапазон, мкм	3,6-4,9 3-5	3-5	8-12
Шаг, мкм	15	30	15
Рабочая температура, К	80	80	70

Материалы используемых сегодня для объективов ИК-камер – это германий, селенид цинка и халькогенидные стекла (примером может послужить серия стекол марки ИКС).

Германиевый сегмент оптики для инфракрасных камер, обладая высоким уровнем оптико-механических свойств, уже долгое время доминирует на рынке, и это, вероятно, продолжится еще в ближайшие 3 года. В такие же сроки сохранится 10% темп роста объема изготовления линз из селенида цинка.

Что касается линз из халькогенидных стекол, то холдинг «Швабе», как ожидают аналитики «Ростехнологий», будет стараться развить рост и планирует занять до 100% российского рынка. Главным преимуществом этого материала является его технологичность. Если германиевые и селенидные стекла необходимо обрабатывать механически, то халькогенидные стекла можно изготавливать методом прессования. Это делает их значительно дешевле упомянутых выше аналогов.

Таким образом, в ходе выполнения работы были поставлены и решены следующие задачи: проведен анализ мирового и российского рынка тепловизионного оборудования; выделены доли участия основных компаний на рынке и сформулированы ключевые факторы, приведшие к изменению его структуры; определены востребованные области применения и факторы роста; рассмотрены сферы применения тепловизионной техники, а также спектр приоритетных задач; произведен обзор элементной базы, в том числе приемников оптического излучения ИК-диапазона, как одной из наиболее важных составляющих тепловизионного прибора; произведен анализ доминирующих материалов для линз ИК-камер.

Полученные в работе результаты позволяют ознакомиться с современным состоянием тепловизионной техники и наиболее актуальными направлениями ее развития, а также будут полезны на начальных стадиях разработок тепловизионной техники, когда требуется определить концепцию изделия, разработать структурную схему или выбрать элементную базу.

Литература

1. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона – современное состояние и тенденции развития // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 10. С. 613-624.
2. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть 2. // Фотоника. 2020. Т. 14. № 4. С. 320-330.
3. Мировой рынок инфракрасных камер – прогнозы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://infracrystal.ru/mainnews/news_post/mirovoy-rynok-nfrakrasnykh-kamer-prognozu (дата обращения 18.11.2020).
4. Аналитический отчет Discovery Research Group «Рынок тепловизоров в России», 2016г.
5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть 1. // Фотоника. 2020. Т. 14. № 3. С. 234-244.



Сиротин Алексей Владиславович
Университет ИТМО,
факультет энергетики и экотехнологий,
студент группы №W4105,
направление подготовки: 16.04.03 – Холодильная,
криогенная техника и системы жизнеобеспечения,
e-mail: yaver.mbizi@gmail.com



Пахомов Артем Николаевич
Университет ИТМО,
факультет энергетики и экотехнологий
к.т.н., доцент,
e-mail: oleg.cryogenics@gmail.com

УДК 536.584.6

КРИОСТАТИРОВАНИЕ «ГОРЯЧИХ КУБИТОВ» НА УРОВНЕ В 1,5 К С ПОМОЩЬЮ ГЕЛИЕВОГО СОРБЦИОННОГО РЕФРИЖЕРАТОРА

А.В. Сиротин, А.Н. Пахомов

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Н. Пахомов

Аннотация

В работе проведён анализ важности устройств и методов обеспечения сверхнизких температур для современных квантовых процессоров и предложена идея об обеспечении лучшей масштабируемости квантовых вычислительных систем за счёт перехода на «горячие кубиты», криостатируемые гелиевыми сорбционными рефрижераторами на температурном уровне в 1,5 К. Также приведён краткий обзор проводимого авторами расчёта такой установки.

Ключевые слова

Гелиевый ожижитель, квантовый процессор, кремниевые спиновые кубиты, рефрижератор растворения, горячие кубиты, сорбционный насос, криостатирование.

Квантовые компьютеры являются чрезвычайно сложными устройствами, работу которых на сегодняшний день невозможно обеспечить без использования наукоёмких криогенных установок. Как правило, квантовые процессоры требуют поддержания температурного уровня порядка сотен или даже десятков мК – уровня, обеспечить который могут только чрезвычайно сложные криогенные машины, рефрижераторы растворения, в которых гелий-3 растворяется в гелии-4. Стоимость создания и эксплуатации таких установок составляет порядка миллионов долларов. Надо отметить, что холодопроизводительность любых криостатов может очень сильно зависеть от температурного уровня. Приблизительная оценка показывает, что при температурах в десятки и сотни мК существующие гелиевые рефрижераторы выдают холодопроизводительности порядка десятков или сотен мкВт, в то время как уже на температурном уровне в $1,5 \div 2$ К становятся доступны целые кВт холода. Этот факт

приобретает наибольшее значение при рассмотрении путей развития квантовой вычислительной техники в будущем. Как известно, вычислительные мощности квантовых компьютеров зависят от количества используемых в них кубитов. В настоящее время даже мощнейшие квантовые компьютеры используют всего лишь около пятидесяти кубитов [1]. Однако для дальнейшего развития квантовой вычислительной техники необходимо совершить переход к квантовым процессорам, использующим большие количества – например, миллионы – кубитов [2]. При этом надо учитывать, что с повышением количества кубитов намного увеличиваются и выделяемое процессором тепло и, соответственно, требуемая холодопроизводительность криостатирующей установки. Соответственно, становится желательным использовать «горячие кубиты», температурный уровень работы которых позволял бы использовать более мощные криостаты для лучшей масштабируемости квантовых процессоров. Вдобавок, более высокий температурный уровень работы позволил бы отказаться от использования рефрижераторов растворения и произвести переход к более дешёвым и простым устройствам.

В 2020 году в журнале Nature была опубликована статья, в которой анализировалась работа квантового процессора на температурном уровне в 1,5 К [2]. В работе был рассмотрен квантовый процессор, основанный на когерентном контроле спинового резонанса электронов в кремнии с помощью электрического поля. Квантовые точки были изолированы от резервуара электронов, и в ходе эксперимента инициализация и считывание кубитов производилось исключительно за счёт туннелирования электронов меж двух квантовых точек. Для опыта использовался кремний, обогащённый изотопом ^{28}Si (присутствие ^{29}Si было отмечено на уровне порядка 800 ppm, что, по словам авторов, допускает дальнейшее улучшение параметров установки, учитывая техническую возможность уменьшить содержание ^{29}Si ещё на порядок). Как известно, при увеличении количества кубитов и температуры в квантовых процессорах ухудшается возможность поддерживать достаточно высокую верность вычислений квантовых вентилях и достаточно большие времена когерентности. Однако в вышеупомянутой работе «горячие кубиты» (находившиеся на температурном уровне в 1,5 К) показали значения этих параметров, вполне сопоставимые с результатами кубитов при стандартных температурных уровнях в 0,1 К и ниже. В частности, верность вычислений «горячих» однокубитных вентилях составила 98,6%, а время удержания когерентности приблизительно составило 2 мкс.

В вышеизложенной статье было произведено прямое сравнение работы кубитов при температурах 0,04 К и 1,5 К. Соответственно, в ходе всего эксперимента использовался обычный рефрижератор растворения, в котором для проведения эксперимента на более высоком температурном уровне отключалась циркуляция в системе гелия-3. В таком случае криостатирование осуществлялось только лишь за счёт оживителя гелия-4 с откачкой паров над жидкостью. Стоимость создания и эксплуатации такой установки оценивается всего лишь в тысячи долларов, т.е. на три порядка меньше «полного» рефрижератора растворения. Учитывая достаточно высокие значения параметров работы «горячих кубитов» и вышеприведённые рассуждения, логично представить, что наиболее перспективным для дальнейшего развития квантовой вычислительной техники квантовым компьютером была бы установка, состоящая из 1) оживителя гелия; 2) ступени откачки паров над жидкостью (например, с помощью сорбционного насоса); 3) квантового процессора, состоящего из большого числа «горячих кубитов». Целью нашей работы стал расчёт такой установки.

Заметим, что вышеизложенная статья является далеко не единственной, посвящённой «горячим кубитам». В прошлом проводились и многие другие исследования, рассматривавшие, помимо прочего, времена когерентности ансамблей квантовых точек структуры Si-MOS при температурах вплоть до 10 К; времена

когерентности глубоководных примесей в кремнии при 10 К; и ансамбли спинов донорных электронов в кремнии вплоть до 20 К [2]. Однако именно вышеизложенное исследование, во-первых, является наиболее современным; во-вторых, представляется наиболее полным и практически значимым, включая в себя также и оценку верности вычислений вентилей с «горячими кубитами»; а в-третьих, представляет наиболее чёткую и интересную задачу для криогенного расчёта. Действительно, температуры ниже 20 кельвинов, но выше 4,5 легко обеспечиваются гелиевыми рефрижераторными установками без ожигения и без включения концевой насосной ступени. Такие установки представляют меньшую расчётную сложность и интерес.

Первый этап расчёта вышеобозначенной установки, первоначальный расчёт гелиевого ожигителя, был выполнен. Нами была выбрана схема установки: без ступеней внешнего охлаждения, с двумя детандерными ступенями и концевой дроссельной. Схема установки и диаграмма соответствующего цикла в T-S координатах приведена на рис. 1.

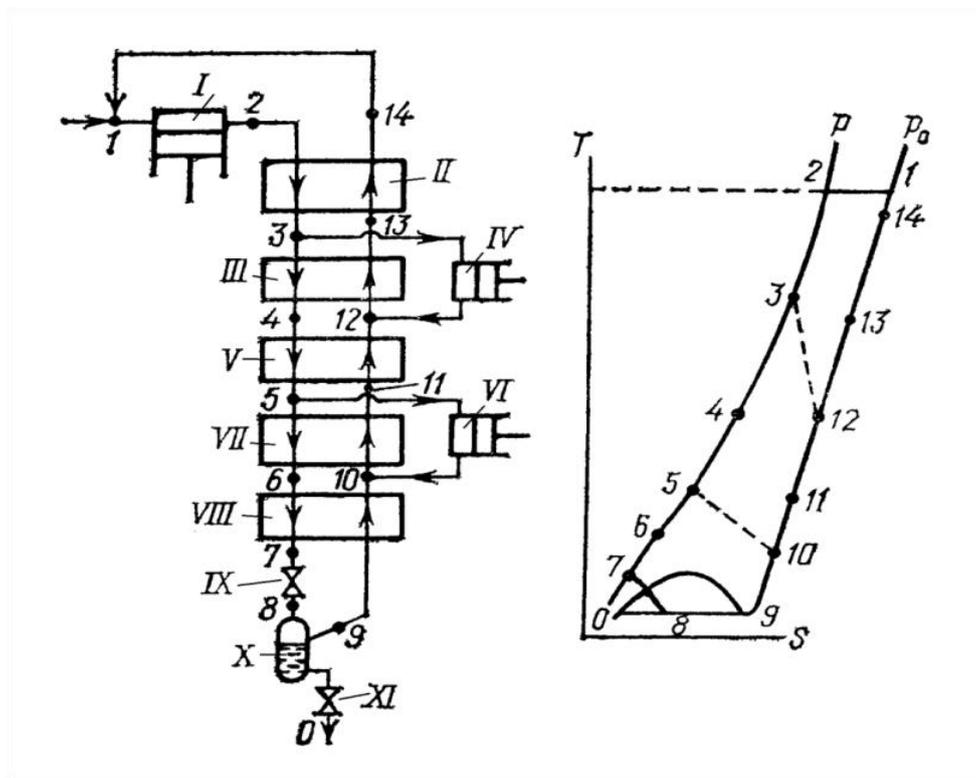


Рис. 1. Принципиальная схема проектируемого гелиевого ожигителя с T-S диаграммой

Другим результатом работы является создание модели установки в программе HYSYS.Process v2.2 (рис. 2).

Термодинамический пакет, использованный в программе, представлял собой модифицированное уравнение состояния Бенедикта-Вебба-Рубина (MBWR). Уравнение MBWR использовалось как наиболее точное из имеющихся термодинамических пакетов для задачи описания состояния гелия в широком диапазоне температур и давлений, в том числе в процессе ожигения [3]. Нужно отметить, что данная модель требует дальнейшей доработки для получения сходимости при более широких диапазонах входных и внутренних данных.

Итак, результатами исследования являются расчёт установки ожигения гелия и создание её базовой модели в программе HYSYS.Process. Среди уже достигнутых результатов также следует отметить проверку сходимости уравнений теплового

баланса на теплообменных аппаратах (ТОА), показавшую высокую сходимость уравнений; а также базовый расчёт ТОА в программе 2PVT.

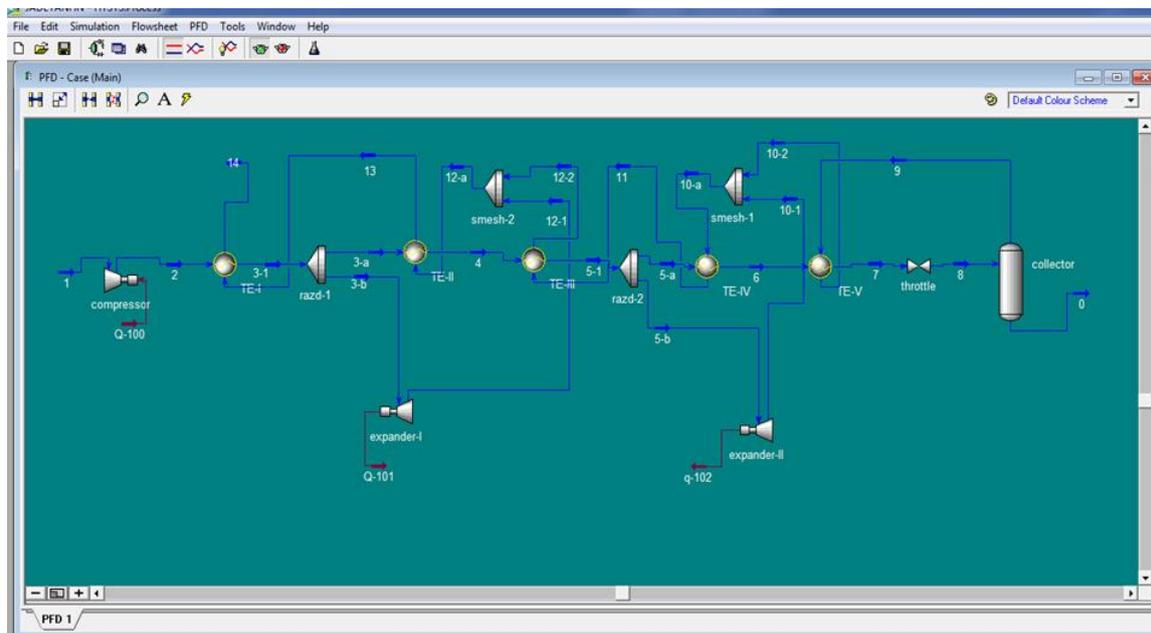


Рис. 2. Модель проектируемого гелиевого ожижителя в программе HYSYS.Process

Задачи, которые ещё предстоит решить в рамках этого исследования, состоят в следующем: кроме расчёта ступени сорбционного насоса (включающего расчёт гладкого отверстия в трубе откачки для ограничения оттока плёнки сверхтекучего гелия и уменьшения потерь полезного холода), предстоит также оптимизация схемы ожижительной установки (в том числе возможный переход от детандеров поршневого типа к турбодетандерам и дополнение концевой дроссельной ступени эжектором для дополнительного увеличения производительности), а также повышение динамичности модели ожижителя в программе HYSYS.Process. Также предстоит провести анализ новейшей литературы, предлагающей вместо перехода к «горячим» кубитам обеспечить масштабируемость системы на традиционном температурном уровне порядка 0,1 К за счёт уменьшения теплопритоков, подводимых от электрических элементов [1].

Литература

1. Scientists Achieve 'Transformational' Breakthrough in Scaling Quantum Computers [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencealert.com/scientists-achieve-transformational-breakthrough-in-scaling-up-quantum-computers> (дата обращения: 22.02.2021).
2. Yang C.H., Leon R.C.C., Hwang J.C.C. et al, «Operation of a silicon quantum processor unit cell above one kelvin» // Nature 580. 2020. P. 350–354.
3. Лавров Н.А., Хуциева С.И., «Гелиевые ожижители: сравнение расчетных методов для определения оптимальных параметров» // Neftegaz.RU. 2017. №4. С. 46.



Смирнова Алена Викторовна

Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы №L42712,
направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика,
e-mail: 79213040490@ya.ru



Аксарин Станислав Михайлович

Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.ф.-м.н.,
e-mail: staksar@gmail.com

УДК 539.25

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИГОЛЬЧАТЫХ ДОМЕНОВ В $Ti:LiNbO_3$
ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ**

А.В. Смирнова, С.М. Аксарин
Научный руководитель – к.ф.-м.н. С.М. Аксарин

Работа выполнена в рамках темы НИР-ФУНД №12445 «Исследование физических механизмов и природы шумов в интегрально-оптических схемах и их влияния на прецизионные оптические измерения».

Аннотация

В работе исследованы игольчатые домены в $Ti:LiNbO_3$ интегрально-оптических модуляторах при помощи различных способов микроскопии. Представлены результаты исследования игольчатых доменов в фазовых модуляторах разных модификаций на основе кристалле ниобата лития. Рассмотрены причины возникновения доменов, а также дана оценка их влияния на паразитный сдвиг фазы выходного излучения модулятора.

Ключевые слова

Ниобат лития, фазовые модуляторы, игольчатые домены, пироэлектрический эффект, анизотропное травление, пьезоэлектрическая силовая микроскопия.

Для использования ниобата лития (НЛ) в качестве основы для фазовых модуляторов используют монодоменированную заготовку в виде були, из которой нарезают пластины X-среза (для рассматриваемого типа модуляторов). Однако в некоторых случаях гомогенность монодоменного кристалла может быть нарушена за счет ряда внешних воздействий на готовое изделие. Таким образом, в кристалле НЛ можно наблюдать механизм переключения направления поляризации доменов. В настоящей работе был проведен ряд исследований, показавших существование игольчатых доменов в образцах фазовых модуляторов (рис. 1) вдоль границ электродов (золото) и поляризаторов (алюминий), что позволило судить о пироэлектрическом механизме образования доменов, а также дать количественную и качественную характеристику доменам.

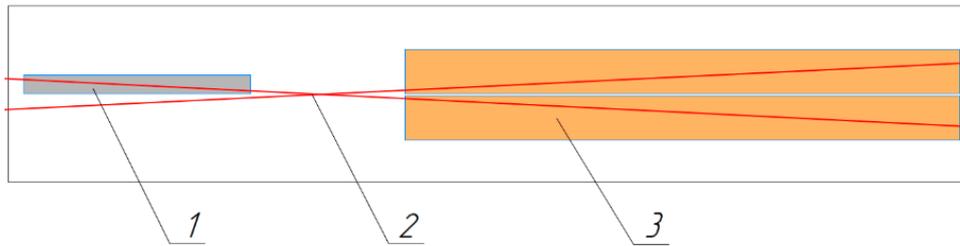


Рис. 1. Фазовый модулятор на основе НЛ,
где 1 – поляризатор, 2 – волноводы, 3 – электроды

Механизм переключения доменов в НЛ, в общем, является в достаточной степени изученным явлением и позволяет утверждать, что: наличие игольчатых доменов свидетельствует об имеющем место высоком уровне электрического поля в рассматриваемом объеме НЛ и начале процесса реполяризации; рост доменов сопровождается возникновением токов за счет перемещения связанных зарядов в объеме НЛ; доменная стенка является областью дислокации с наличием несвязанных зарядов, которая характеризуется более высоким уровнем электрической проводимости; пьезоэлектрическое поле, возникающее на границах электродов, способно вызывать процесс реполяризации, где граница нового домена будет начинаться от края электрода [1].

В работе были рассмотрены фазовые модуляторы, имеющие золотые электроды и поляризаторы из алюминия.

На рис. 2 схематично показаны стадии, вероятная форма и относительные размеры кинетики разрастания встречного домена (красным), берущего свое начало от края электрода (желтым), где контур с размерами a , $0,75a$ и $0,1a$ определяется формой напряженности E_z компоненты электрического поля.

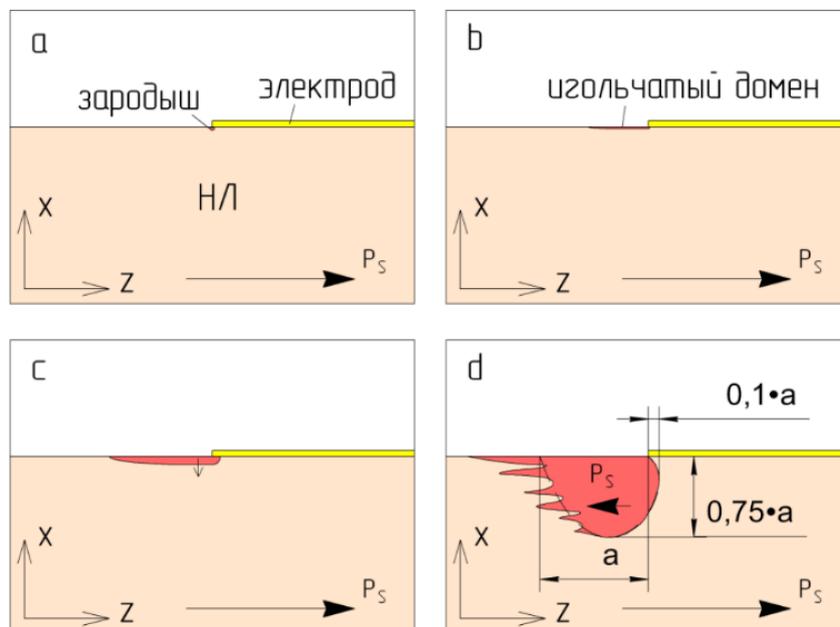


Рис. 2. Стадии формирования доменов в межэлектродном зазоре,
где а) Образование отдельных зерен нано-доменов вдоль границы электрода;
б) Прорастание игольчатого домена вдоль оси Z (1D рост); в) Движение доменной стенки игольчатого домена в ширь и в глубину (2D рост); д) Возникновение отдельных 1D игольчатых ответвлений на стенке домена с их последующей коалесценцией

Стоит отметить, что формирование зерен будет происходить в местах дефектов решетки НЛ и местах дефектов края электрода, где формируется повышение локальной напряженности поля за счет коронного эффекта. Также вполне вероятно, что зародышеобразование вдоль края электрода будет наблюдаться и при нормальном режиме работы электрооптических модуляторов при подаче на электроды управляющего модулирующего напряжения, что говорит о необходимости предварительного анализа распределения напряженности электрического поля в зазоре при разработке топологии электродов. Как показало моделирование в программном пакете Comsol, существенно важным фактом является вклад ширины электрода и его близости к полярной грани кристалла в формируемое поле в межэлектродном зазоре. Уменьшение ширины электрода приводит к снижению напряженности электрического поля. Как следствие, уменьшается паразитное влияние на свет, проходящий по волноводу.

Для наблюдения доменов в сегнетоэлектриках существует множество методов, однако часть из них оказывается либо недоступна за счет использования дорогостоящего оборудования, либо неприменима к НЛ из-за наличия анти-параллельных 180° доменов [2–4]. Также некоторую сложность для наблюдения доменов может вызывать ориентация кристалла X-среза исследуемых образцов.

В работе для анализа доменов использовалось анизотропное травление, которое является разрушающим методом контроля. В этом случае удаляются электроды и нарушается поверхностный слой, что не позволяет использовать испытанные образцы повторно. Результаты травления наблюдались в различные типы оптических микроскопов, а также в конфокальный лазерный сканирующий микроскоп (рис. 3).

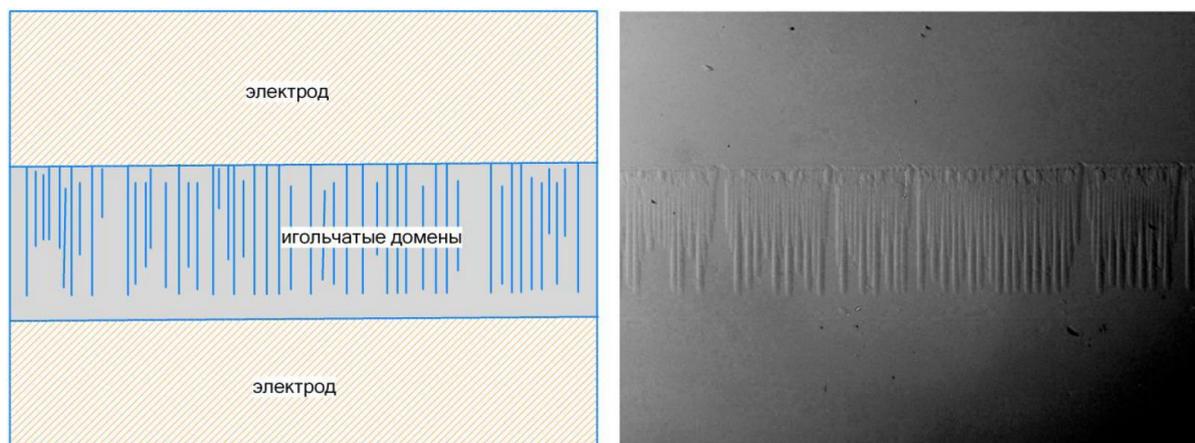


Рис. 3. Участок между конутрами двух алюминиевых электродов (зазор около 50 мкм). Слева показана соответствующая схема расположения электрода и игольчатых доменов

Стало видно, что нарушения кристаллической структуры монодоменного НЛ наблюдаются вдоль линии края электрода и представляют собой линии, направленные вдоль оси Z кристалла НЛ.

Помимо этого, были использованы неразрушающие методы контроля, такие как сканирующая электронная микроскопия и пьезоэлектрическая силовая микроскопия. Исследование другого образца методом атомно-силовой микроскопии пьезо-отклика PFM (рис. 4) показало наличие большого числа доменов в межэлектродном зазоре, причем результаты позволили дать характеристику форме доменов на поверхности и степени переключения поляризации.

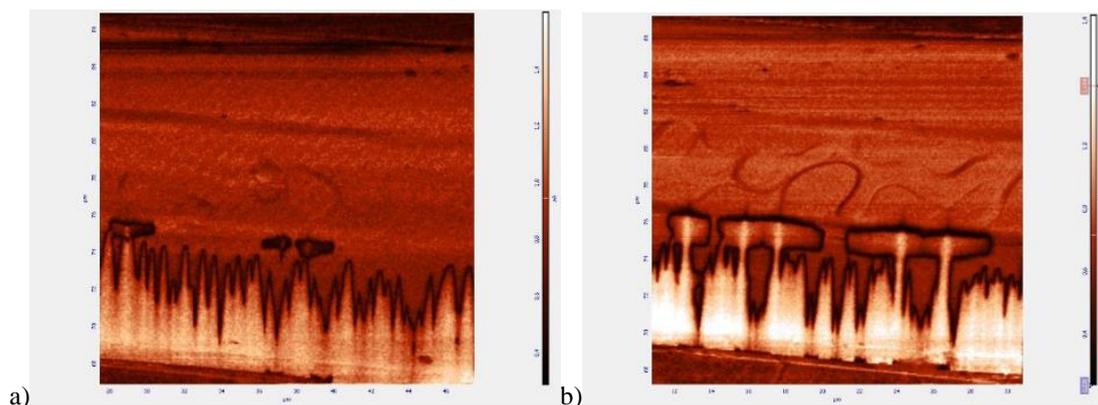


Рис. 4. Изображение PFM. Участок межэлектродного зазора шириной 18 мкм (на а и б показаны два соседних участка). Сверху и снизу видны границы электродов. Вдоль края нижнего электрода виден участок полной переполаризации от которого начинают рост игольчатые домены. Также на обоих снимках видны домены «островного» типа.

На рисунке 4(а) и 4(б) показаны два соседних участка с межэлектродным зазором шириной 18 мкм, где вдоль нижнего края электрода видна область с игольчатыми доменами. Наличие полосы сплошного заполнения встречным доменом шириной 2-4 мкм вдоль края электрода позволяет сделать предположение, что электрическое поле переключения поляризации существовало в этом месте длительное время и имел место сильный градиент поля вдоль оси Z и X, что привело к появлению большого числа игольчатых доменов с их последующей коалесценцией, что подтверждается теоретическим обоснованием. Наличие же только сильной напряженности электрического поля будет приводить, в первую очередь, к росту преимущественно изолированных игольчатых доменов. Также видно, что на данном образце присутствуют области «островков» доменов, что говорит о следах вторичного переключения поляризации, что привело к обособлению более длинного первичного домена (например, во время нагрева). Кроме того, стоит отметить аномальное ограничение растущих доменов вдоль линии начала возвышения волновода, что может быть вызвано различием свойств участка НЛ с повышенной концентрацией титана.

На основе литературных данных о природе доменного образования и результатах проведенных экспериментальных исследований можно утверждать, что в интегрально-оптических модуляторах на основе кристаллов НЛ формируются области с доменами обратного знака в поверхностном слое кристалла вдоль границ электродов вследствие пироэлектрического эффекта, имеющие форму игольчатых окончаний, направленных к середине межэлектродного зазора параллельно оси Z кристалла. Форма, размеры и количество доменов носят преимущественно случайный характер и определяются величиной напряженности пироэлектрического электрического поля, вызванного изменением температуры кристалла, а также наличием дефектов решетки в кристалле и неровностями края электродов, которые могут вызвать локальные искажения поля. Причем, эффект повышения напряженности электрического поля на остриях и на выступах электродов приводит к увеличению длины и количества игольчатых доменов.

Возникновение игольчатых доменов в межэлектродном зазоре обусловлено температурными колебаниями, возникающими после осуществления технологического процесса нанесения электродов на поверхность, и не вызвано приложением электрического поля внешнего модулирующего напряжения к электродам, так как домены обнаруживаются также на алюминиевых электродах поляризаторов, где управляющее напряжение не прикладывалось. Внесение дополнительного экранирующего электрода и уменьшение ширины рабочих электродов поможет снизить напряженность пироэлектрического поля в межэлектродном зазоре.

Наличие доменов приводит к существованию электрооптической электрооптической неоднородности в рабочем межэлектродном зазоре вследствие того, что:

а) Игольчатые домены являются областью с электрооптическим эффектом обратного знака и могут вызывать снижение эффективности модуляции за счет чередования доменов с разной полярностью.

б) Игольчатые домены являются оптической неоднородностью показателя преломления, что может приводить к рассеянию и дифракции оптической моды канального волновода.

Литература

1. Gopalan V., Mitchell T. E., and Sicakfus, K. E. Switching kinetics of 180° domains in congruent LiNbO₃ and LiTaO₃ crystals// Solid State Communications. 1998. V. 109. N 2. P. 111–117.
2. Gopalan V. and Mitchell T.E. Wall velocities, switching times, and the stabilization mechanism of 180° domains in congruent LiTaO₃ crystals// Journal of Applied Physics. 1998. V. 83. N 2. P. 941–954.
3. Gopalan V., Mitchell T.E., Furukawa, Y., and Kitamura, K. The role of nonstoichiometry in 180° domain switching of LiNbO₃ crystals// Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. N 16. P. 1981–1983.
4. Soergel E. Visualization of ferroelectric domains in bulk single crystals// Appl. Phys. B. 2005. V. 81. N 6. P. 729–751.



Смирнова Алена Викторовна

Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы №L42712,
направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика,
e-mail: 79213040490@ya.ru



Аксарин Станислав Михайлович

Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.ф.-м.н., доцент,
e-mail: staksar@gmail.com



Стригалеv Владимир Евгеньевич

Год рождения: 1950
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
доцент, к.ф.-м.н.,
e-mail: vstrglv@mail.ru

УДК 535.015

**ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГА ФАЗЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В Ti:LiNbO₃ МОДУЛЯТОРЕ**

А.В. Смирнова, С.М. Аксарин, В.Е. Стригалеv
Научный руководитель – к.ф.-м.н. С.М. Аксарин

Работа выполнена в рамках темы НИР-ФУНД №12445 «Исследование физических механизмов и природы шумов в интегрально-оптических схемах и их влияния на прецизионные оптические измерения».

Аннотация

В работе исследовано влияние пироэлектрического эффекта на волноводные свойства в интегрально-оптических модуляторах на основе Ti:LiNbO₃. Выяснено, что за счет возникающего поля при нагреве или охлаждении наблюдается паразитный сдвиг фазы сигнала. Показано разделение вклада в сдвиг фазы между термо-оптическим, пироэлектрическим и эффектом изменения длины оптического пути за счет термического расширения.

Ключевые слова

Ниобат лития, пироэлектрический эффект, температурные флуктуации, сдвиг фазы, интерферометр Маха-Цендера, регрессионный анализ.

Сегнетоэлектрический кристалл LiNbO₃ (НЛ) обладает рядом полезных оптических и электрооптических свойств (эффект фотоупругости, эффект Погкельса, пьезоэлектрический эффект, нелинейно-оптический эффект), за счет чего ему находят

широкое применение в интегральной оптике в качестве электрооптических модуляторов амплитуды, частоты или фазы оптического излучения [1]. Но одновременно с этим НЛ является сложным кристаллом, в котором наблюдаются кристаллофизические эффекты, например, такой как пироэлектрический эффект (ПЭ). ПЭ в НЛ заключается в том, что при изменении температуры кристалла изменяется его значение спонтанной поляризации, что приводит к нарушению зарядового равновесия [2]. Вследствие температурных флуктуаций и эффекта релаксации конечная величина плотности зарядов становится нестабильной и может приводить к дрейфу фазы светового сигнала в модуляторах на НЛ. Такая проблема может оказаться весьма серьезным препятствием для конструирования высокочувствительных интерферометрических схем, как например волоконно-оптический гироскоп, где требуется обеспечение стабильности фазы [3, 4].

В эксперименте проводилось измерение пироэлектрического сдвига фазы в образце интегрально-оптического фазового модулятора, у которого волновод изготовлен методом диффузии титана в кристалле НЛ X-среза и электродами для обеспечения фазовой модуляции. Для регистрации сдвига фазы был собран волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ) (рис. 1). В одном плече устанавливался испытуемый образец, а во втором аналогичный фазовый модулятор для управления фазой сигнала. Оптическая схема была собрана с согласованием по «быстрой» поляризационной оси всех компонент интерферометра. В качестве источника излучения использовался высокостабильный одночастотный волоконный лазер на длине волны 1550 nm. Фотодетектор подключался к системе DAQ на основе National Instruments cDAQ-9188, позволяющей одновременно считывать сигнал модуляции и фотодетектора, а дополнительный модуль NI 9211 регистрировал сигнал температуры от термопары. Для регулирования процесса нагрева и охлаждения образец закреплялся на элементе Пельтье через термопрокладку. Рядом с образцом на термопрокладке размещался горячий спай термопары, обеспечивая точное измерение температуры прокладки. Для минимизации ошибок при регистрации фазы из-за температурных флуктуаций вся оптическая часть интерферометра помещалась в термобокс, который имеет два изолированных отдела. В первый помещались два разветвителя, разъемы и модулятор. А во второй отдел помещался образец на элементе Пельтье, имеющий термоинтерфейс с оптическим столом для обеспечения возможности стабилизации температуры.

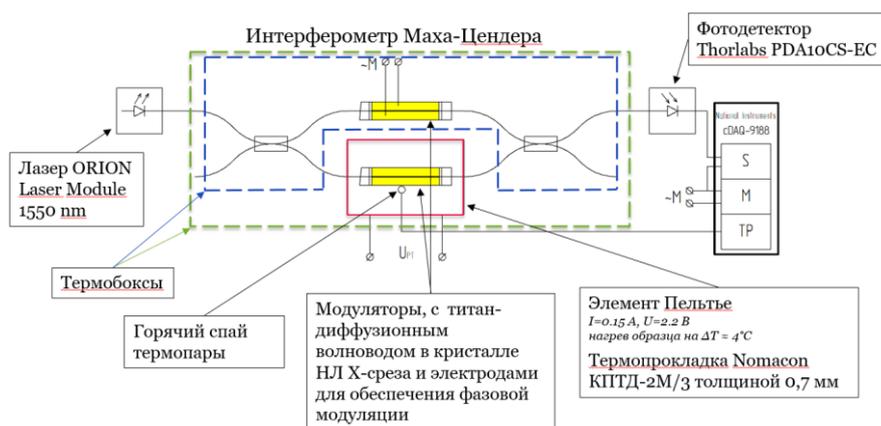


Рис. 1. Схема волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера

Поскольку кинематика нагрева образца становится неочевидной за счет отсутствия данных о параметрах каждого из элементов системы, применен подход к разделению элементов системы на элементарные звенья. Каждое звено несет

информацию о скорости нагрева. В данной системе управляемым объектом является элемент Пельтье, а прием сигнала производится по двум каналам – значения температуры на термопаре и сдвиг фазы. В рамках такого подхода процесс нагрева и реакции НЛ на нагрев можно разбить на блоки (рис. 2). Эти блоки представляют собой элементы динамических звеньев, характеризующие физический процесс преобразования тепла в оптический сдвиг фазы с течением времени. Так, например, процесс нагрева твердого тела можно описать переходной функцией позиционного апериодического звена 1-го порядка. К такому типу звена относится нагрев Пельтье, термопрокладки, образца НЛ и горячего спая термопары. А сдвиг фазы в образце под действием температурного изменения можно описать четырьмя звеньями. Первое представляет собой изменение фазы за счет температурного расширения и эластоупругого эффекта и в точности повторяет характер нагрева кристалла. Остальные три члена (PY1, PY2, PY3) представляют собой дифференцирующие звенья с замедлением, поскольку описывают характер релаксации пирозарядов.

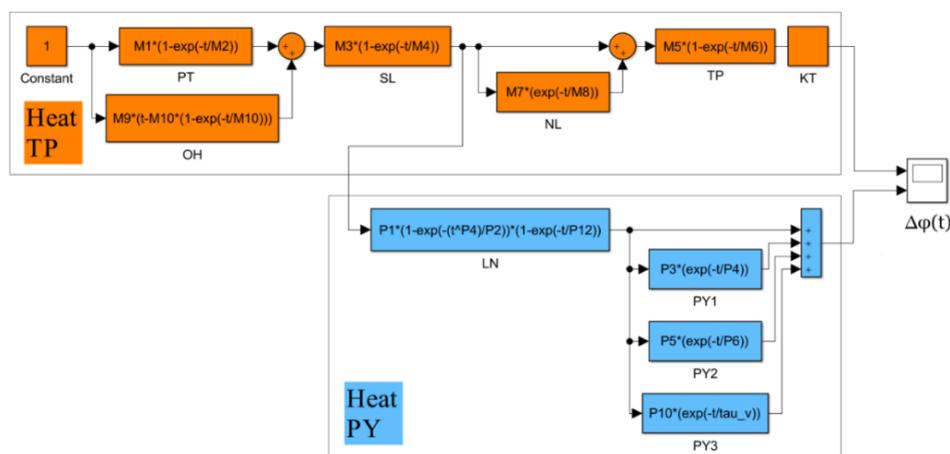


Рис. 2. Блок-схема переходной функции прогрева, измеряемая термопарой и переходной функции изменения фазы

Подбор коэффициентов звеньев производился в программном пакете Matlab методом регрессного анализа по экспериментальным данным с различными комбинациями электрических связей, где были рассмотрены варианты закорачивания (КЗ) электродов модулятора, а также экранирования полярных граней кристалла токопроводящим компаундом (таблица).

Таблица

Подбор коэффициентов звеньев

Конфигурация	Схема
Свободный образец	
Промазаны и закорочены боковины	
Закорочены электроды (КЗ)	

В результате экспериментов с нагревом и отключением нагрева были получены временные характеристики (рис. 3), где красная кривая – профиль изменения температуры кристалла, синяя кривая – сдвиг фазы ИМЦ. Видно, что изменение температуры приводит к некоррелированному изменению фазы. Совместно с термооптическим и эластоупругим эффектом существует эффект, который описывает функцию изменения пироэлектрического сдвига фазы – желтая кривая (рис. 3). По этой причине фазовая кривая не повторяет форму температурной кривой.

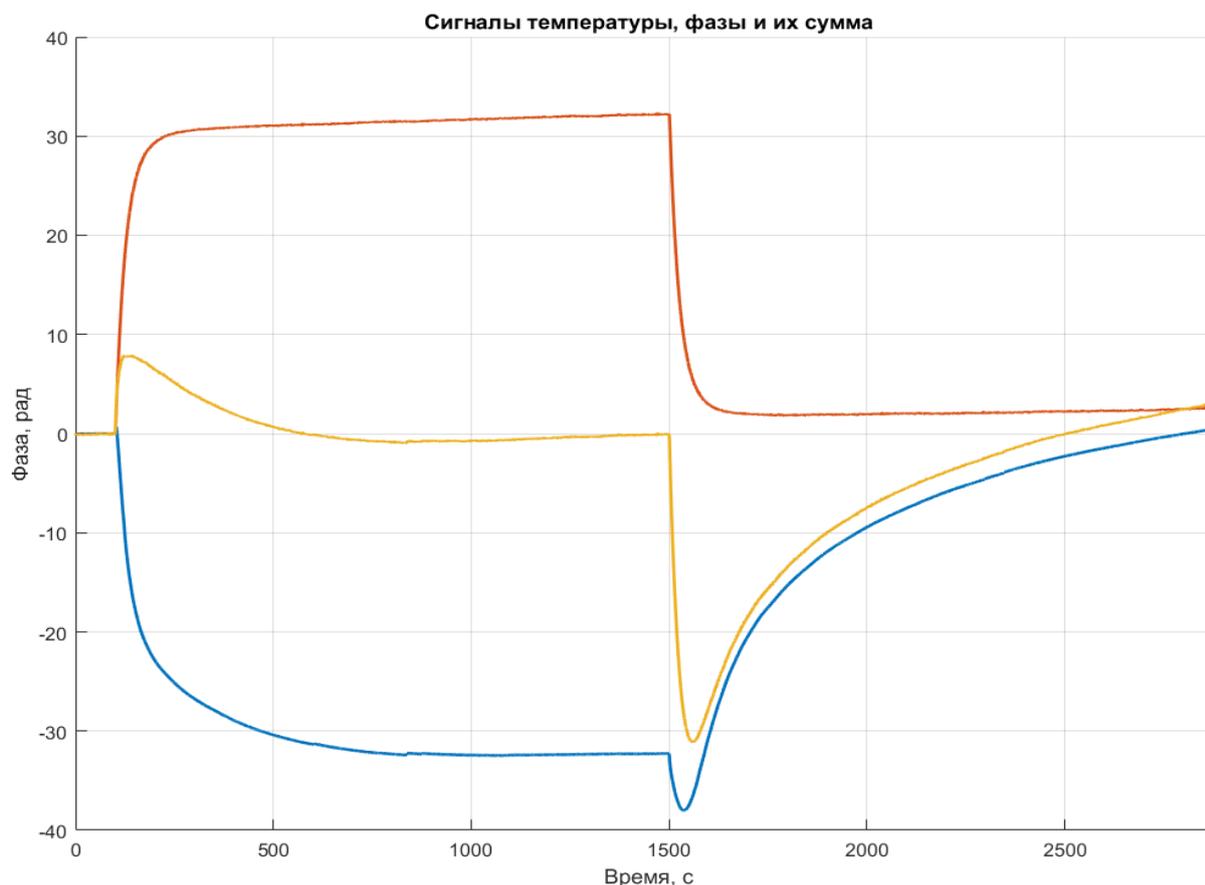


Рис. 3. Вычитание температурного вклада в сдвиг фазы при нагреве и отключении нагрева НЛ

В эксперименте, при нагреве или охлаждении наблюдается сдвиг фазы ИМЦ, причем для случая с КЗ изменение фазы имеет температурную зависимость, близкую к линейной. А для случая разомкнутых электродов (рис. 3) наблюдается аномальное изменение сдвига фазы, характер которого описывается временной характеристикой релаксации зарядов, возникающих на полярных гранях кристалла НЛ. Промазка боковых граней токопроводящим компаундом позволила снизить вклад ПЭ, но влияние этого эффекта осталось ощутимым. Однако один из наиболее эффективных способов по подавлению ПЭ эффекта был достигнут путем повышения проводимости в процессе отжига образца.

Таким образом, были проведены эксперименты по:

- 1) исследованию образца НЛ без отжига конгруэнтного состава в состоянии разомкнутых электродов;
- 2) исследованию образца НЛ после отжига с повышенной проводимостью кислородных октаэдров также при разомкнутых электродах.

На рис. 4 представлены кривые пироэффекта, для образцов после отжига (син.) и до него (желт.). Видно, что после отжига вклад ПЭ уменьшился за счет повышения проводимости кристалла.

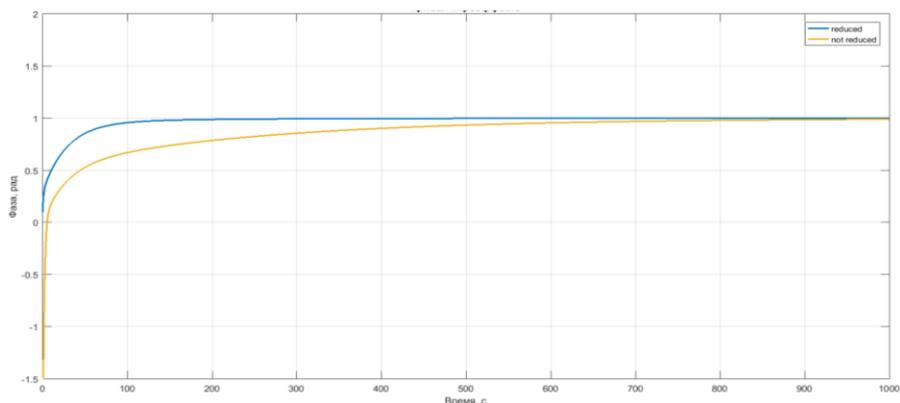


Рис. 4. Кривая пироэлектрического эффекта для образцов с разомкнутыми электродами с отжигом (син.) и без отжига (желт.)

В работе продемонстрирован вклад пироэлектрического эффекта, оказывающего воздействие на сдвиг фазы световой волны в фазовом интегрально оптическом модуляторе Ti:LiNbO_3 . Проанализирована величина пироэлектрического сдвига фазы при нагреве образца при помощи волоконно-оптической схемы Маха-Цендера и показана временная характеристика релаксации заряда. Также рассмотрены способы уменьшения времени релаксации за счет промазывания боковин проводящим компаундом и показано сравнение эффективности подавления пироэлектрического эффекта за счет восстановительного отжига.

Литература

1. Кузьминов Ю.С., Электро-оптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М., «Наука». гл. ред. лиз.-мат. лит. 1987. 264 с.
2. Буш А.А. Пироэлектрический эффект и его применения. Учебное пособие / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)» М. 2005. 212 с.
3. Hervé C. Lefèvre, The Fiber-optic Gyroscope // Artech House, 2014, p. 391.
4. Ponomarev R.S.; Shevtsov D.I., Karnaushkin P.V. «Shutdown» of the Proton Exchange Channel Waveguide in the Phase Modulator under the Influence of the Pyroelectric Effect. // Appl. Sci. 2019. № 9. P. 4585.



Хлынов Руслан Дмитриевич

Год рождения: 1999

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

студент группы № В3405,

направление подготовки: 12.03.02 – Оптехника,

e-mail: super.ryslan3@yandex.ru



Рыжова Виктория Александровна

Год рождения: 1966

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

к.т.н., доцент,

e-mail: victoria_ryz@itmo.ru

УДК 535.513

**КОНТРОЛЬ УРОВНЯ
ГЕМАТОКРИТА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

Р.Д. Хлынов, В.А. Рыжова

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Рыжова

Работа финансируется Министерством науки и высшего образования РФ (грант 08-08).

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические вопросы взаимодействия лазерного излучения с кровью человека и ее форменными элементами. Рассмотрены схемы построения поляриметров и приведены их достоинства и недостатки. Предложена структурная схема четырехканальной поляризационной системы для контроля уровня гематокрита в медицинской диагностике.

Ключевые слова

Поляризационная система, гематокрит, анизотропия рассеяния, вектор Стокса.

Введение

В современных условиях в медицинскую практику активно внедряются оптико-электронные технологии неинвазивного измерения и контроля микрофизических параметров крови. Физической основой применения оптико-электронных методов в исследовании реологических свойств крови являются эффекты, проявляющиеся при взаимодействии электромагнитного излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазона со случайно-неоднородными средами с характерными размерами неоднородностей, сопоставимыми с длиной волны зондирующего излучения [1, 2].

Оптическая анизотропия крови в сочетании с неоднородностью распределения в плазме ее форменных элементов проявляется в поляризационных характеристиках рассеянного излучения и может дать ценную информацию о ее структурных особенностях и физиологическом статусе. Поэтому развитие методов поляриметрии и эллипсометрии рассеянного излучения в неинвазивной диагностике крови является

перспективным направлением и представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Одним из важнейших микрофизических показателей крови является гематокрит, который определяется как процентное соотношение между суммарным объемом эритроцитов и объемом цельной крови. Для его определения также можно успешно использовать поляризационные методы светорассеяния.

В связи с этим целью данной работы является исследование возможности технической реализации поляризационного метода контроля уровня гематокрита крови на основе визуализации и анализа распределения параметров состояния поляризации обратно рассеянного оптического излучения.

Теоретические вопросы

Одной из основных задач практического применения метода эллипсометрии рассеяния при анализе поляризационных свойств крови является установление функциональной связи между параметрами эллипса поляризации рассеянного светового пучка и оптическими характеристиками исследуемой оптической среды [1, 2].

При зондировании крови лазерным излучением в плазме происходит его поглощение, а на эритроцитах – рассеяние. Поглощение сопровождается изменением параметров азимута и эллиптичности, в то время как степень поляризации не изменяется. Рассеяние на эритроцитах в крови является анизотропным, при этом происходит деполяризация излучения, приводящая к изменению степени поляризации.

Поэтому при изменении функции распределения эритроцитов и их концентрации, которая определяется уровнем гематокрита, будет меняться соотношение интенсивностей поляризованной и деполяризованной составляющих излучения, которое можно зарегистрировать и визуализировать.

Известно, что оптическими параметрами рассеивающей среды являются связанный с мнимой частью показателя преломления коэффициент поглощения μ_a , коэффициент рассеяния μ_s и индикатриса рассеяния или ее средний косинус g (или фактор анизотропии рассеяния). Для описания световых полей достаточно знать не сами величины μ_s и g , а их комбинацию – транспортный коэффициент рассеяния μ'_s [1, 2]:

$$\mu'_s = \mu_s(1 - g). \quad (1)$$

На рис. 1 показаны средние значения этих величин в зависимости от гематокрита в диапазоне от 0 до 70% при постоянной скорости сдвига 500 с^{-1} [2].

Представленные на рис. 1 графики демонстрируют практически линейную зависимость коэффициента поглощения μ_a от уровня гематокрита в диапазоне от 0 до 45% (рис. 1а), которая может быть представлена следующим выражением [2]:

$$\mu_a = \left(\frac{HCT}{V_e} \right) \sigma_a, \quad (2)$$

где HCT – уровень гематокрита, V_e – средний объем эритроцита, σ_a – поперечное сечение поглощения.

Зависимости коэффициента μ_s от HCT являются линейными до $HCT < 10\%$ (рис. 1б). При высоких значениях HCT имеют место изменения оптических свойств тканей, что ведет к большим погрешностям определения коэффициента μ_s при большой оптической плотности крови. В пределе $HCT \rightarrow 1$ отн.ед., когда эритроциты слипаются вместе, образуя однородную массу, коэффициент рассеяния крови должен стремиться к нулю. В этом случае используется приближенное выражение [2]:

$$\mu_s = \frac{HCT(1-HCT)}{V_e} \sigma_s, \quad (3)$$

где множитель $(1 - HCT)$ отвечает за подавление рассеяния при $HCT \rightarrow 1$ отн.ед., σ_s – оптическое сечение рассеяния.

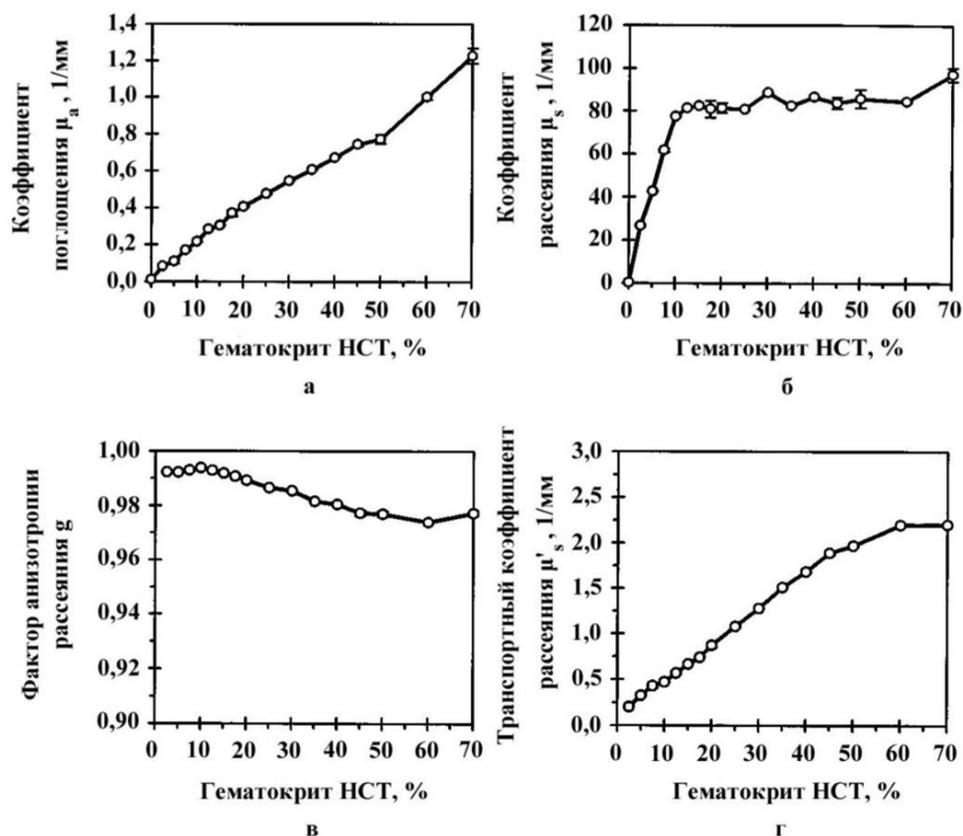


Рис. 1. Средние значения для коэффициентов поглощения μ_a (а), рассеяния μ_s (б), фактора анизотропии g (в) и индикатрисы рассеяния μ'_s (г) [2]

Фактор анизотропии g практически не изменяется в диапазоне 0,994–0,992 (рис. 1в). С другой стороны, при значениях гематокрита выше 10% коэффициент рассеяния μ_s не зависит от концентрации в крови, а фактор анизотропии g снижается до 0,975 при гематокрите $HCT = 70\%$.

Анализ представленных зависимостей показывает, что расчет трех оптических параметров невозможен при высоких уровнях гематокрита, а следовательно, нужно оценивать пониженный коэффициент индикатрисы рассеяния, который определяется транспортным коэффициентом рассеяния μ'_s , согласно формуле (1).

Для параметра μ'_s выявлено линейное увеличение до значения гематокрита 45% (рис. 1г). Далее наблюдался незначительный эффект насыщения, который может быть результатом либо рассеяния, либо образованием скопления эритроцитов.

Таким образом, для контроля клинически актуального диапазона изменения гематокрита от 20% до 75% поляризационным методом необходимо установить связь поляризационных параметров рассеянного излучения с указанными параметрами среды.

Ранее было показано, что матричный формализм Стокса и Мюллера позволяет описать связь параметров состояния поляризации диффузно рассеянного средой поляризованного света с концентрацией и средним размером рассеивающих биологических структур [1, 2].

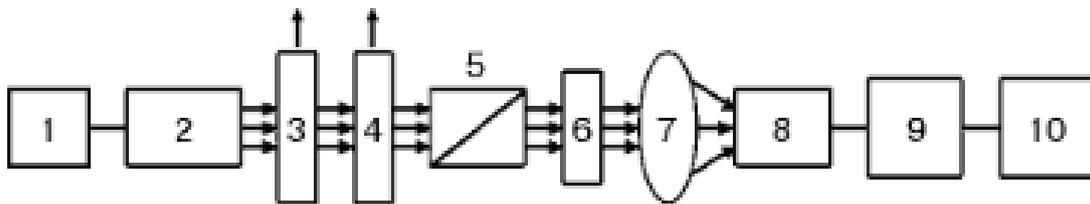
Для измерения параметров вектора Стокса и дальнейшего расчета элементов матрицы Мюллера, которая предоставляет полную информацию о поляризационных свойствах крови, необходимо разработать поляризационную систему по схеме визуального Стокс-поляриметра. Для выбора структуры системы контроля уровня гематокрита было рассмотрено несколько вариантов схем поляриметров.

Оптико-электронные схемы построения поляриметров

Рассмотренные варианты построения схем реализации поляризационных методов можно разделить на три группы:

- схемы с последовательным изменением параметров поляризационных элементов, с применением вращающегося поляризационного элемента или изменения параметров поляризационных элементов конечное число раз;
- схемы с пространственным разделением входного излучения по апертуре;
- схемы с разделением интенсивности входного излучения по амплитуде.

Первый подход к определению вектора Стокса основан на последовательном измерении интенсивности излучения при соответствующем изменении параметров поляризационных элементов поляриметра. Классическая схема поляриметра первого типа представлена на рис. 2 [3]. В схеме используется один фотоприемник, перед которым располагаются один или несколько поляризационных фильтров, параметры которых (ориентацию, величину анизотропии) изменяют заданным образом конечное число раз. В результате получают набор интенсивностей на входе фотоприемника, величины которых пропорциональны элементам вектора Стокса анализируемого излучения.

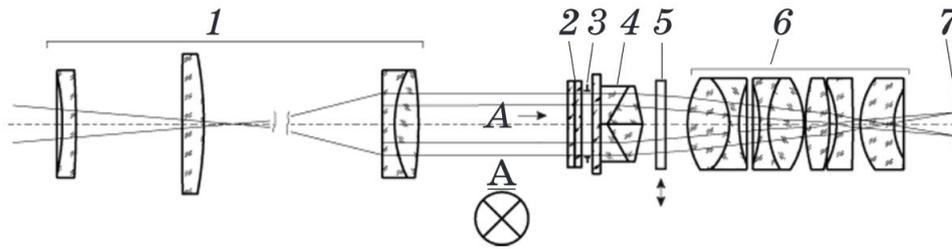


1 – источник тока, 2 – лазерный диод, 3, 4 – четвертьволновые преобразователи,
5 – анализатор, 6 – нейтральный фильтр, 7 – фокусирующая система,
8 – фотоприемник, 9 – измерительная схема, 10 – персональный компьютер

Рис. 2. Блок схема поляриметра первого типа [3]

Преимущества поляриметров первого типа: минимально достижимое число обусловленности характеристической матрицы; существенное уменьшение количества необходимых актов измерения. Недостатки: механические воздействия и сдвиги, приводящие к погрешности, связанной с механическим взаимным смещением оптических элементов; позиционирование элементов; возможное наличие разности фаз; применение поляриметра только в лабораторных условиях.

Поляриметры второго типа основаны на делении апертуры – пространственном делении выходного зрачка оптической системы, вблизи которого устанавливаются поляризационные элементы схемы. Схема построения поляриметров второго типа представлена на рис. 3 [4]. Схема позволяет в широком поле зрения и без ограничений по относительному отверстию системы одновременно проводить измерения параметров вектора Стокса по четырем независимым измерениям.

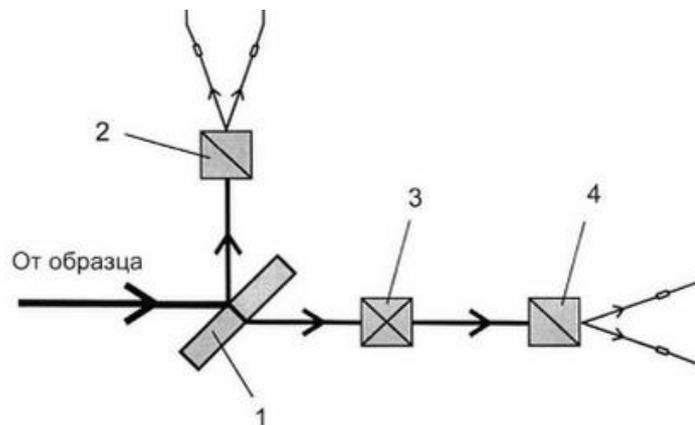


1 – коллиматор, 2 – набор поляризаторов, 3 – плоскость выходного зрачка,
 4 – система клиньев для разветвления изображений, 5 – фильтр, 6 – камерный
 объектив, 7 – плоскость приемника изображений, А – вид на зрачок с установленными
 по секторам четырьмя поляроидными пленками

Рис. 3. Оптическая схема Стокс-поляриметра второго типа [4]

Преимущества поляриметров второго типа: возможность усреднить нестабильность источника излучения и влияние несовершенств преобразователей поляризации поляриметра и учесть их при расчете параметров Стокса. Недостатки: ограниченное быстродействие; потеря информативной параксиальной области с минимальными искажениями; исследование периферийной области и, как следствие, повышенные требования к фокусировке оптической системы и юстировке подвижных узлов.

В поляриметрах третьего типа параметры Стокса исходного пучка поляризованного излучения измеряются разделением интенсивности на четыре канала, в каждом из которых находится неподвижный поляризационный элемент и фотоприемник. Параметры поляризационных элементов подбираются таким образом, что интенсивности на соответствующих фотодетекторах пропорциональны величинам параметров Стокса исходного излучения. Классическая схема, позволяющая измерять четыре параметра вектора Стокса одновременно, представлена на рис. 4 [5].



1 – светоделитель, 2, 4 – призма Волластона, 3 – компенсатор

Рис. 4. Фотополяриметр с делением амплитуды [5]

К преимуществам поляриметров третьего типа относятся: быстрое и одновременное измерение полного набора параметров Стокса; длины оптического пути через блок светоделителя к приемникам оптического излучения идентичны; точная регистрация изображения без искажения; наличие информативной параксиальной области с минимальными искажениями. Недостатком является сложность калибровки оптической схемы. Данная схема представляется наиболее предпочтительной для исследования динамически изменяющегося во времени объекта.

Разработка поляризационной системы

По результатам анализа схем построения Стокс-поляриметров разработана поляризационная система по схеме поляриметров третьего типа на основе пространственного распределения интенсивности входного излучения по амплитуде без вращающихся элементов.

Структурная схема поляризационной системы с возможностью визуализации распределения состояния поляризации рассеянного образцом излучения представлена на рис. 5. Система состоит из передающего блока и четырехканального приемного блока.

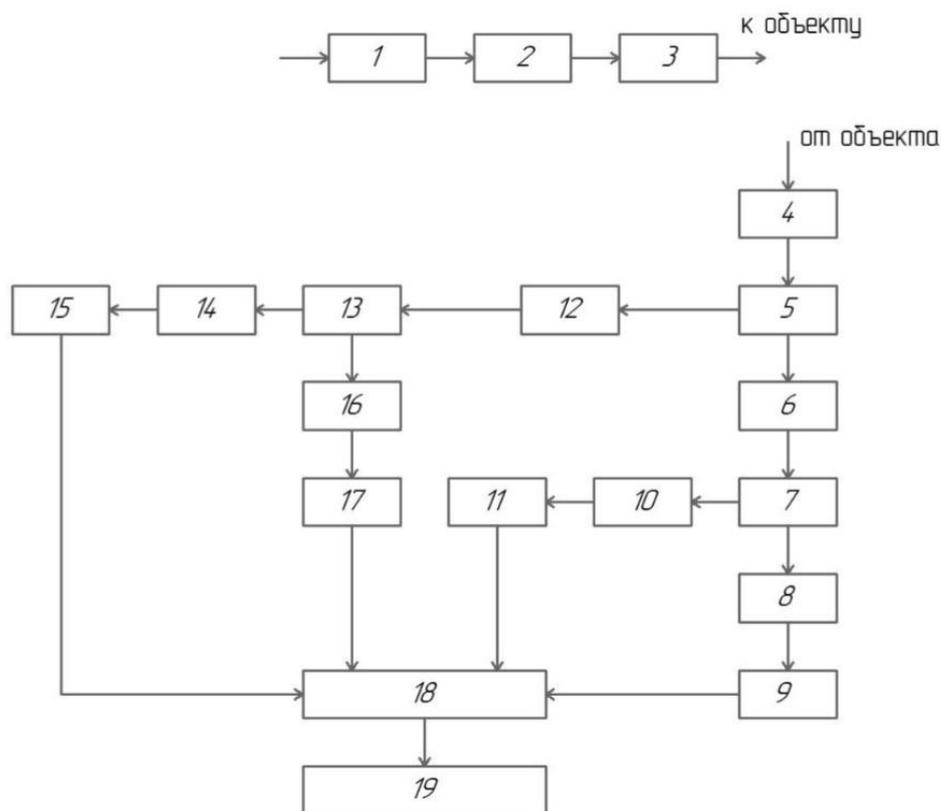


Рис. 5. Структурная схема поляризационной системы

Передающий блок состоит из источника когерентного оптического излучения 1, которое проходит через поляризатор 2 и фазовую пластинку 3 для формирования заданного состояния поляризации зондирующего биоткань излучения. Далее излучение, рассеянное объектом для исследования гематокрита крови, попадает в приемный блок. Оптическая система 4 преобразует распределение яркости обратно рассеянного объектом излучения в распределения облученности на матричных анализаторах фотоприемников 9, 11, 15, 17 четырех приемных каналов. Разделение излучения по интенсивности выполняется светоделительным блоком 5.

Излучение первого канала направляется через полуволновую фазовую пластинку 6 на поляризационный делитель пучка 7, после которого p -поляризованная компонента через компенсационный блок 8 передается на фотоприемник 9, а s -поляризованная компонента проходит через компенсационный блок 10 на фотоприемник 11.

Излучение второго канала проходит через четвертьволновую фазовую пластику 12 на поляризационный делитель пучка 13, после которого p -поляризованная компонента через компенсационный блок 14 передается на фотоприемник 15, а s -поляризованная компонента проходит через компенсационный блок 16 на фотоприемник 17. Для обработки цифровых изображений используется электронный

блок обработки сигналов 18. Далее результат передается на устройство визуализации информации 19.

Разработанная схема позволяет сформировать систему для одновременного измерения элементов векторов Стокса и регистрации изображений распределения параметров поляризации обратно рассеянного кровью излучения без искажений.

Выводы

На основании рассмотренных оптических свойств крови и аналитического обзора существующих технических решений построения поляриметров разработана структурная схема поляризационной системы для контроля уровня гематокрита. Преимущества такой схемы: длины оптического пути через светоделительный блок к матричным фотоприемникам идентичны; каждое из четырех изображений имеет одинаковое увеличение, искажение и частотно-контрастную характеристику по всему полю зрения, что делает возможной точную регистрацию изображения без искажения. Поляризационную систему можно будет использовать в медицине в качестве оперативной и автоматизированной альтернативы традиционным инвазивным приборам и системам измерения уровня гематокрита.

Литература

1. Hien Thi-Thu Pham, Nah Le-Trang Nguyen, Toi-Van Vo, Khon-Chan Huynh, Quoc-HUNG Phan Optical parameters of human blood plasma, collagen, and calfskin based on the Stokes-Mueller technique. *Optical Society of America / Vol. 57, No. 16 / Applied Optics* (2018) <https://doi.org/10.1364/AO.57.004353>.
2. Xuezheng Wang, Jiancheng Lai, and Zhenhua Li. Polarization studies for backscattering of RBC suspension based on Mueller matrix decomposition. *Optical Society of America / Vol. 20, No. 18 / pp. 20771-20782 / OPTICS EXPRESS* (2012) <https://doi.org/10.1364/OE.20.020771>.
3. Кузьков В.П., Недашковский В.Н., Савенков С.Н., Кузьков С.В. Исследование поляризации лазерного передающего модуля для коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником. *Космічна наука і технологія*, Т12, №1, 2006. С. 23–28.
4. Синявский И.И., Иванов Ю.С., Видьмаченко А.П. Концепция построения оптической схемы панорамного Стокс-поляриметра для малых телескопов. *Оптический журнал*. Т.80, №9, 2013. С. 27–32.
5. R.M.A. Azzam Division-of-amplitude photopolarimeter based on conical diffraction from a metallic grating. *Appl. Opt.* 31, 3574-3576 (1992) <https://doi.org/10.1364/AO.31.003574>.

СОДЕРЖАНИЕ

НАПРАВЛЕНИЕ «ФОТОНИКА».....	4
Алавяли А.Т. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.....	5
Арефина И.А., Степаниденко Е.А., Куршанов Д.А., Ушакова Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ КОЛЛОИДНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА.....	12
Ахмеров А.Х. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА СИСТЕМЫ ЭРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН.....	19
Быков Д.И. ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ СВЕТОФИЛЬТРОВ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АНОМАЛОСКОПА.....	26
Годовова А.С., Плотников М.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА СХЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	30
Голобородько Л.И. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ.....	33
Горбачев С.А. ЭФФЕКТ ВОДОРОДНЫХ СВЯЗЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ДИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ.....	38
Куштысева Ю.О., Калинкина О.С. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСФОКУСИРОВКИ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПО ФРТ.....	41
Калугин Е.Э., Алейник А.С., Умнова А.В. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГЕРМЕТИЗАЦИИ АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В УЗЛЕ ГЕРМЕТИЗАЦИИ.....	48

Калугин Е.Э., Виссарионова В.Е., Мухтубаев А.Б. ВОЛНОВОДНЫЕ СВОЙСТВА АЗИТРОПНОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ.....	54
Машина Е.А., Сушенцова М.В. ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОСВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА КУЛЬТИВАЦИИ ПОЧВЫ.....	61
Останин С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПОДВИЖНОСТИ ПОЛИУРЕТАНОВ МЕТОДОМ 2D WISE ЯМР-СПЕКТРОСКОПИИ.....	66
Пихота Н.С. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗНОГО СЫРЬЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ.....	70
Кикилич Н.Е., Моторин Е.А., Погудин Г.К. НАДЁЖНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН.....	75
Родикова Л.С., Коротаев В.В., Тимофеев А.Н. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН В РЕЖИМЕ ВАЛОПОВОРОТА.....	82
Сафонов П.А., Коротаев В.В. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ.....	87
Сиротин А.В., Пахомов А.Н. КРИОСТАТИРОВАНИЕ «ГОРЯЧИХ КУБИТОВ» НА УРОВНЕ В 1,5 К С ПОМОЩЬЮ ГЕЛИЕВОГО СОРБЦИОННОГО РЕФРИЖЕРАТОРА.....	93
Смирнова А.В., Аксарин С.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ИГОЛЬЧАТЫХ ДОМЕНОВ В $Ti:LiNbO_3$ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ.....	97
Смирнова А.В., Аксарин С.М., Стригалева В.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГА ФАЗЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В $Ti:LiNbO_3$ МОДУЛЯТОРЕ.....	102
Хлынов Р.Д., Рыжова В.А. КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ГЕМАТОКРИТА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ МЕТОДОМ.....	107

**АЛЬМАНАХ
НАУЧНЫХ РАБОТ
МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
Университета ИТМО**

Том 4

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Вёрстка

Я.Я. Платунова

Подписано к печати 26.10.2021

Заказ № 4527 от 26.10.2021

Тираж 100 экз.

Печатается в авторской редакции

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16

ISBN 978-5-7577-0649-8



9 785757 706498

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49