

А

АЛЬМАНАХ

НАУЧНЫХ РАБОТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

2019

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**АЛЬМАНАХ
НАУЧНЫХ РАБОТ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
Университета ИТМО**

Том 4



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 4. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 73 с.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редколлегии:

Бугров Владислав Евгеньевич

доктор физико-математических наук, доцент,
директор мегафакультета фотоники Университета ИТМО.

Члены редколлегии:

Кортаев Валерий Викторович

доктор технических наук, профессор факультета прикладной оптики

Успенская Майя Валерьевна

доктор технических наук, профессор факультета прикладной оптики

Вейко Вадим Павлович

доктор технических наук, профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники

Вениаминов Андрей Викторович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник центра
«Информационные оптические технологии»

Белов Павел Александрович

доктор физико-математических наук, декан физико-технического факультета

Гулевич Дмитрий Романович

PhD, физико-математические науки, ведущий научный сотрудник международного
научного центра оптической и квантовой информатики, биофотоники

ISBN 978-5-7577-0606-1

ISBN 978-5-7577-0610-8 (Том 4)



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

© Университет ИТМО, 2019

© Авторы, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные 29 января – 1 февраля 2019 года на XLVIII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематике: фотоника.

Конференция проводится в целях усиления интегрирующей роли университета в области научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники и ознакомления научной общественности с результатами исследований, выполненных в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, программы развития Университета ИТМО на 2009–2018 годы, программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг., Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ, грантов РФФИ, РГНФ, РНФ и Правительства РФ (по постановлению № 220 от 09.04.2010 г.) и по инициативным научно-исследовательским проектам, проводимым учеными, преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами, магистрантами и студентами университета, в том числе в содружестве с предприятиями и организациями Санкт-Петербурга, а также с целью повышения эффективности научно-исследовательской деятельности и ее вклада в повышение качества подготовки специалистов.

**НАПРАВЛЕНИЕ
ФОТОНИКА**



Аверьянов Владимир Андреевич

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В4108

Направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника

e-mail: abuelos@yandex.ru



Васильев Александр Сергеевич

Год рождения: 1988

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

e-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru

УДК 681.785

**КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЧЕЛИНОГО МЕДА**

Аверьянов В.А.

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

В работе были проанализированы основные методы контроля натуральности меда, рассмотрены их преимущества и недостатки. Поставлена задача о возможности применения спектрального анализа меда.

Ключевые слова: мед, оптико-электронный метод, рефрактометр, спектральный анализ, оптическая плотность.

Мед – это натуральный и естественный продукт, обладающий большим количеством уникальных качеств, полезных для здоровья человека. Для получения натурального пчелиного меда требуются большие денежные затраты и много времени, так как – это процесс очень сложный и трудоемкий.

На данный момент в России увеличился приток фальсифицированного меда на рынках и в магазинах. Не всегда контролирующие органы могут отследить качество и натуральность меда из того или иного региона нашей страны. Основным нормативно-правовым документом для определения качества меда является ГОСТ [1].

Целью работы являлось установление наиболее оптимального и простого информативного метода контроля, проведение которого возможно не только в лаборатории, но непосредственно на пасеке, ярмарке и т.д. Немало методов существует для проверки натуральности меда.

Рассмотрим основные оптико-электронные методы контроля меда.

1. Метод определения содержания воды в меде. Одним из распространенных и доступных методов контроля качества меда является рефрактометрический метод. Сущность метода заключается в определении показателя преломления меда. Массовая доля воды откачанного меда по ГОСТу не превышает 21%. Незрелый мед подвержен брожению. Оценить водность меда по внешним признакам невозможно, так как разные сорта меда имеют разную вязкость.

Метод позволяет определить степень зрелости меда, что важно перед откачкой, но не дает понятие о сорте меда, его добавках. Необходимо постоянно производить калибровку

устройства перед измерением. Измерения проводятся в малом диапазоне температур от +18 до +20°C (при измерениях с системой термокомпенсации – от 10°C до 30°C). Возможно измерение содержания сахарозы в растворе, но при концентрации не более 23%. Важно отметить, что при любых измерениях мед должен быть жидким [2].

2. Метод определения массовой доли редуцирующих сахаров и массовой доли сахарозы в меде. В основе метода лежит измерение оптической плотности раствора, полученного после реакции сахара с реактивом, образующим с ним окрашенное соединение. Содержание сахара определяют по калибровочному графику зависимости оптической плотности от концентрации.

Смесь кипятят 1 мин, быстро охлаждают до 25°C и проводят измерения оптической плотности по отношению к дистиллированной воде на фотоколориметре при длине волны 440 нм.

Преимущества метода заключаются в возможности отличить фальсификат по содержанию в нем сахарозы. Однако метод требует приготовления растворов и работы с химически-активными веществами.

3. Определение массовой доли пролина. В ГОСТ введен недавно. Принцип метода основан также на измерении оптической плотности. В методе рассматривается взаимодействие пролина с нингидрином. Плотность полученного раствора измеряют спектрофотометром при длине волны в пределах 500–520 нм после добавления изопропилового спирта. Содержание пролина определяют по калибровочной кривой [3].

Метод позволяет выявить незрелый мед или факт добавления в него сахарной подкормки, но требует больших временных затрат и работы с реактивами.

4. Метод пыльцевого анализа меда. В данном методе изучают пыльцевые зерна в пробах меда при помощи микроскопа. При 800–1000-кратном увеличении микроскопа подсчитывают и регистрируют общее число пыльцевых зерен и число пыльцевых зерен определяемого вида медоноса. Определение пыльцевых зерен проводят по визуальным признакам. Учитывают не менее двухсот пыльцевых зерен [4].

Данный метод позволяет определить сорт меда (ботаническое происхождение), более того, можно установить его географическое происхождение. Выявить содержание ненатуральных добавок в меде с помощью этого метода не представляется возможным.

5. Метод спектрального анализа меда. Наиболее перспективным методом контроля натуральности меда может стать спектральный анализ. Главные особенности – получение моментального результата, отсутствие необходимости готовить химические растворы. Также следует учитывать малые габариты некоторых современных спектрометров, что упрощает их транспортировку и применение в «полевых» условиях.

Известно, что спектральные характеристики фруктозы, сахарозы и натурального меда лежат в средней инфракрасной области. Натуральный мед по своим пиковым значениям на выбранном диапазоне длин волн совпадает с фруктозой, которая является одним из основных веществ, входящих в состав меда [5].

Таким образом, рассмотренные методы позволяют определять натуральность меда по различным компонентам. Однако проведение испытаний для большинства методов требуют много времени и работы с реактивами и сложным оборудованием, что значительно затрудняет проведение экспертизы за пределами лаборатории. Применение спектрального анализа могло бы упростить и ускорить данную процедуру. Постепенно пополняется список методов контроля качества меда. С 2019 года вступил в силу новый ГОСТ о натуральном меде. Поэтому исследование возможности применения спектрального анализа является актуальной задачей. Результатом данного исследования может стать дополнение ГОСТа новым методом контроля о натуральном происхождении меда.

Дальнейшим этапом работы будет исследование кривых спектров поглощения различных сортов меда с целью выявления у них отличительных признаков.

Литература

1. Большакова О.В. Рынок меда: проблемы сбыта и их решение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apiary.su/zhurnal-pchelovodstvo/rynok-myoda-problemy-sbyta-i-ih-reshenie-2/> (дата обращения: 06.01.2019).
2. ГОСТ 31774-2012. Мед. Рефрактометрический метод определения воды. – Введен 01.06.2013. – М.: Стандартиформ, 2018. – 7 с.
3. ГОСТ 32167-2013. Мед. Метод определения сахаров (с поправкой). – Введен 01.01.2019. – М.: Стандартиформ, 2017. – 13 с.
4. Курманов Р.Г. Институт геологии УНЦ РАН, г. Уфа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://beejournal.ru/med/2077-botanicheskoe-i-geograficheskoe-proiskhozhdenie-rossijskogo-meda> (дата обращения: 06.01.2019).
5. Ковшова К.А., Сыпин Е.В., Лисаков С.А. Исследование метода спектрального анализа для определения натуральности меда // Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – № 4(12). – С. 85–88.

**Альхалил Джордж Наим**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
аспирантНаправление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия

e-mail: gorg.kalel@yahoo.com

**Бурункова Юлия Эдуардовна**

Год рождения: 1964

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
к.ф.-м.н., доцент

e-mail: burunj@list.ru

УДК 535.8**PECULIARITIES OF POROUS GLASSES DOPED WITH AS₂S₃ NANOPARTICLES****Alkhalil G.****Supervisor – Associate Professor, Burunkova J.A.**

Preparation and characterization new composite materials based on chalcogenide doped in porous glass is presented. Reversible photobleaching effect (i.e., photoinduced shift of the optical absorption edge to higher energies) was observed, and considered to be nanosized effect.

Keywords: photobleaching, nanocomposites, porous glasses, chalcogenide nanoparticles.

Porous glass (PG) is glass that includes pores in the nanometer or micrometer range, and it is usually prepared by metastable phase separation in borosilicate glasses, followed by liquid extraction of one of the formed phases.

PG is an excellent medium for a large number of optically and electronically active materials due to their high mechanical, thermal and chemical stability, optical transparency, large reactive surface variable manufacturing of pore sizes.

The fact that porous glasses can be produced with different texture parameters made them an ideal material for applications as adsorbents, membranes in chromatography, ion-exchanger, and carrier for catalysts [1–3]. The effect of confinement of different substances like semiconductors, metals, liquid crystals to PG represents another interesting research topic [4].

Recently, composite materials based on chalcogenide glasses (ChG) represent an important and growing class of materials due to their promising physical and optical characteristics, and broad range of applications [5]. Inserting high refractive index chalcogenide glass nanoparticles to the porous glass may increase the modulation characteristics, as well as produce materials with high transparency, optical nonlinearity in the infrared spectral region [6]. The nm size of particles at comparatively low concentrations in a glass matrix ensure small scattering levels in VIS- IR spectral regions.

Additional advantage of such material is the possibility to change the optical parameters of the inserted semiconductor chalcogenide glass particles (optical absorption edge and refractive index) by special illumination and annealing, which means the possibility to stimulate variation of final optical element parameters. The fabrication route of such nanocomposites is presented, and further research is needed to investigate the structural and optical properties. In this work we present the fabrication of As₂S₃ nanoparticles doped in porous glass (refractive index in the VIS-NIR region is near 2.2) to create light-sensitive nanocomposites.

Materials. Chalcogenide glasses As_2S_3 , obtained by direct synthesis of high-purity elements in quartz ampules were used as components for nanocomposite fabrication. The dissolution of chalcogenide glasses was investigated in propylamine (PrA). Small cubic samples of porous glass $1 \times 1 \text{ cm}^2$ with 4mm thickness were used.

Sample preparation. For the fabrication of porous glass, we used Sodium-borosilicate glass of the type DV-1 with the composition $7 \text{ Na}_2\text{O}$, $23 \text{ B}_2\text{O}_3$, 70 SiO_2 , heat-treated at 530°C for 70–72 h, then at 465°C for 3–4 hours. The glasses were corroded in an aqueous HCl solution kept at a constant temperature of 50°C for about 8 days. The glass to solution ratio was 1.6/100 g/ml. After leaching, samples were washed several times with distilled water, and left to dry at room temperature for two days before they were dried at 120°C for 2 h.

According to Meshkovsky [7] the obtained sample must have a pore size about 10 nm and a specific surface area from 10 to $300 \text{ m}^2/\text{g}$.

The first step in our experiments was to fabricate As_2S_3 glass nanoparticles. According to [8], the structure of the ChG in n-propylamine is broken to amorphous fragments with dimensions that are roughly about 2–10 nm large. Small pieces As_2S_3 glass were grinded and dissolved in propylamine. Solutions with different concentration of As_2S_3 (2.7–7.2 g/ml) were prepared. The next step was impregnation of PGs in these solutions for 3–7 days. After impregnation, the samples were taken of the solution and left to air dry for one hour and then they were dried at 120 for 2–4 h.

Experimental results and discussion. After impregnation, the obtained glass samples were homogeneous and transparent, and after annealing for 4 h at $120\text{--}140^\circ\text{C}$, samples with different colors graduated from light yellow to dark brown were obtained depending on the preparation parameters Fig. 1.

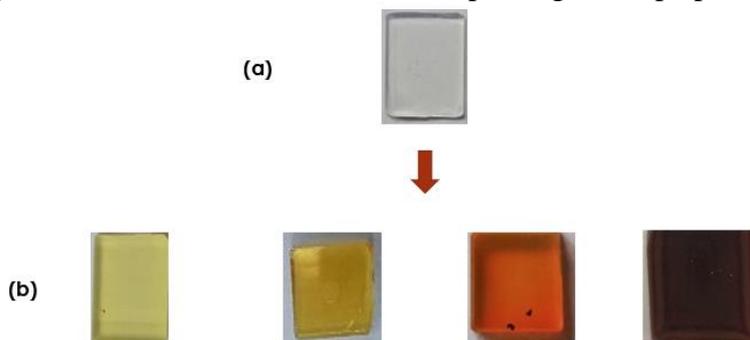


Fig. 1. Porous glass sample before impregnation (a) and after impregnation (b)

The optical properties of the samples were investigated under many cycles of irradiation (with green laser 532 nm KLM-532/h/1000) and annealing, and after each cycle the optical transmission spectra of PG chalcogenide NPs composite were measured in the visible spectral region by standard method using fluorat-02-panorama spectrofluorometer.

It is well known that chalcogenide glasses exhibit light-induced modification of its optical properties [9]. In most cases this modification as a reversible photodarkening (the red shift of the optical absorption edge) [10]. In some cases, however, the opposite effect (photobleaching) is observed [11], but it was found to be irreversible. later It was found that a reversible photobleaching effect appears in chalcogenides thin films with thickness less than 90 nm [12], which is considered to be nanosized effect due to the increase of the surface/volume thickness ratio.

In our samples a reversible photobleaching effect was observed at irradiation with green laser 532 nm and photodarkening after annealing at 150°C for 90 min Fig. 2. Size of the deposited nanoparticles is restricted by the pores size which is in the nanometer range. This explains the observed photobleaching effect as in [12].

However, our experiments were performed in room temperature, unlike [12], were photobleaching can be observed only above a given temperature called the optical bleaching threshold. Further studies of the structural changes, for example Raman studies and DIR, must be done to clarify the origin of this giant photobleaching effect.

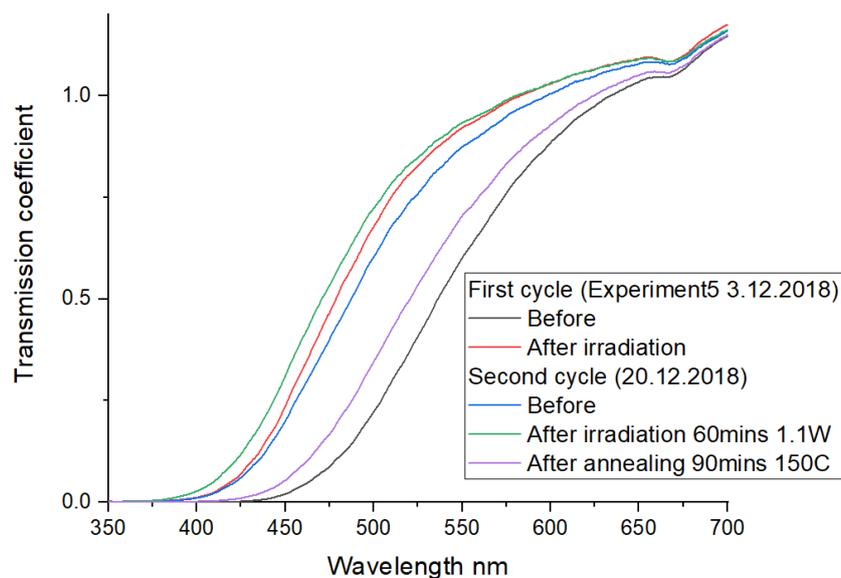


Fig. 2. Optical transmission spectra of porous glass sample doped with As_2S_3 after two cycles of irradiation with green laser 532 nm 1.1W and annealing

Conclusion. The chemical fabrication of chalcogenide nanoparticles doped in porous glasses was presented. Giant reversible photobleaching effect up to 50% was observed at relatively low temperature, which considered to be nanosized effect. Structural investigations and measurements of optical recording parameters will be performed in further research. The next step in our research will be investigate the possibility of recording phase-modulated volume holograms.

References

1. Shen C. et al. Porous glass beads as a new adsorbent to remove sulfur-containing compounds // *Green Chemistry*. – 2012. – V. 14(4). – P. 1009–1015.
2. Schnabel R., Langer P. Controlled-pore glass as a stationary phase in chromatography // *Journal of Chromatography A*. – 1991. – V. 544. – P. 137–146.
3. Christine S. et al. Microwave Assisted Chemoselective Hydrogenation Reactions Incorporating Hydrogen as Reducing Agent // *Chemical Engineering & Technology*. – 2011. – V. 34(3). – P. 445–451.
4. Werner J. et al. Dielectric investigations of the N-SmB transition in a porous glass // *Liquid Crystals*. – 2000. – V. 27(10). – P. 1295–1300.
5. Bockstaller M.R., Thomas E.L. Optical properties of polymer-based photonic nanocomposite materials // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2003. – V. 107(37). – P. 10017–10024.
6. Schnoes M.G. et al. Photopolymer-filled nanoporous glass as a dimensionally stable holographic recording medium // *Optics letters*. – 1999. – V. 24(10). – P. 658–660.
7. Пак В.Н., Гавронская Ю.Ю., Буркат Т.М. Пористые стекла и наноструктурированные материалы на их основе: монография. – СПб.: Изд-во РГПУ им А.И. Герцена, 2013. – 129 с.
8. Zha Y., Waldmann M., Arnold C.B. A review on solution processing of chalcogenide glasses for optical components // *Optical Materials Express*. – 2013. – V. 3(9). – P. 1259–1272.
9. Popescu M.A. *Non-Crystalline Chalcogenides*. – Springer Science & Business Media, 2001. – 378 p.
10. De Neufville J.P., Moss S.C., Ovshinsky S.R. Photostructural transformations in amorphous As_2Se_3 and As_2S_3 films // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1974. – V. 13(2). – P. 191–223.
11. Lyubin V.M. Reversible radiation-induced changes of properties of chalcogenide vitreous semiconductors // *Physics of Disordered Materials*. – 1985. – P. 673–684.
12. Knotek P. et al. Irreversible photobleaching, photorefraction and photoexpansion in GeS_2 amorphous film // *Materials Chemistry and Physics*. – 2010. – V. 119(1). – P. 315–318.



Ахмеров Артём Харисович

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
аспирант

Направление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: akakhmerov@corp.ifmo.ru



Васильев Александр Сергеевич

Год рождения: 1988

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

e-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru

УДК 681.7; 697.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Ахмеров А.Х.

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

Работа выполнена в рамках НИР № 617031 «Исследование и разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

На сегодняшний день система теплоснабжения является неотъемлемой частью инфраструктуры населенных пунктов, в особенности расположенных в областях холодного климата. Постоянное строительство новых объектов вызывает необходимость в расширении существующих тепловых сетей. Все тепловые сооружения нуждаются в постоянном профилактическом контроле, позволяющем предотвратить поломки и избежать чрезвычайных ситуаций. В связи с постоянным увеличением отапливаемых площадей, наиболее целесообразными будут являться методы контроля, позволяющие проверять большие участки теплотрасс в кратчайшие сроки. В работе кратко представлены принципы организации тепловых сетей, современные методы их контроля, а также предложен путь повышения их общей эффективности.

Ключевые слова: тепловые сети, системы мониторинга, инфракрасная техника, аэрофотосъемка, теплопроводы.

Принципы организации тепловых сетей. Наиболее распространенным видом систем теплоснабжения на территории России является водяное отопление. Системы централизованного водяного отопления характеризуются сочетанием трех основных звеньев: источников теплоснабжения (ИТ), тепловых сетей (ТС) и местных систем теплоснабжения (МСТ) отдельных зданий или сооружений. В качестве ИТ могут выступать теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), гидроэлектростанции (ГЭС), котельные, атомные станции теплоснабжения (АСТ) и т.д. [1]. МСТ включают в себя все оборудование, устанавливаемое внутри отапливаемых объектов: радиаторы, внутренние трубы и т.д.

Согласно нормам [2], ТС подразделяются на магистральные и распределительные. Магистральные ТС – это совокупность сооружений, транспортирующих теплоноситель от выходной запорной арматуры (исключая ее) источника теплоты до первой запорной арматуры (включая ее) в тепловых пунктах (ТП), либо до ответвления к индивидуальному ТП.

Распределительные ТС – это совокупность сооружений, транспортирующих теплоноситель от ТП до зданий и сооружений, в том числе от центрального ТП до индивидуального. ТП присоединяют здания к ТС: центральный – для присоединения двух или более зданий, индивидуальный – для присоединения одной постройки.

Прокладка труб осуществляется подземными или воздушными линиями. Вне зависимости от способа и положения прокладки трубопроводов, нормативными документами [3] устанавливаются требования по безопасности (в том числе при опасных природных явлениях и (или) техногенных воздействиях), надежности (в краткосрочной и долгосрочной перспективах), живучести и энергетической эффективности ТС.

Современные методы контроля состояния тепловых сетей. Методы контроля ТС можно условно разделить на несколько видов работ: прогнозирование (моделирование), нагрузочные испытания, инструментальные исследования.

Прогнозирование заключается в моделировании процессов износа ТС и выявлении оптимальных нагрузок и сроков эксплуатации тепловых сооружений для выбора момента замены трубопроводов и других ремонтных работ. Однозначным преимуществом прогнозирования является его массовость: разрабатываемые модели, как правило, универсальны, и позволяют произвести расчеты для неограниченных участков ТС. Главным недостатком прогнозирования является несовершенство этих алгоритмов, проявляющееся в недостоверности результатов расчетов. Среднестатистический срок замены труб в России составляет 17 лет, в то время как нормативный срок службы трубопроводов составляет не менее 25 лет (30 лет с пенополиуретановой изоляцией) для горячей воды [4, 5]. В период плановой замены труб, в большинстве случаев 70% замененных трубопроводов могли бы отработать свой нормативный срок и более [5].

Нагрузочные испытания предназначены для выявления параметров больших участков ТС. Существует четыре вида испытаний: на прочность и герметичность, на расчетную температуру, гидравлические и тепловые [6]. Все виды испытаний применяются для выявления проблемных участков ТС, несоответствующих расчетным параметрам [7]. Основным преимуществом нагрузочных испытаний по сравнению с другими методами является достоверность получаемых результатов. Главным недостатком нагрузочных испытаний является разрушающее воздействие на ТС и малая величина нагрузок, создаваемых при их проведении, по сравнению с нагрузками, возникающими из-за перепадов температуры и других факторов во время отопительного сезона [8].

Инструментальные методы контроля ТС заключаются в использовании специализированных приборов для поиска и изучения проблемных участков трубопровода. Для поиска дефектов на пенополиуретановой изоляции трубопровода используют рефлектометры. Рефлектометры работают следующим образом: прибор испускает короткий зондирующий электрический импульс, перемещающийся по сигнальному проводу внутри изоляции трубы. При столкновении с неоднородностью, вызванной увлажнением или разрывом провода, импульс частично или полностью отражается. Импульсный рефлектометр измеряет временной интервал между отправкой исходного импульса и приемом отраженного, после чего рассчитывает расстояние, на котором обнаружен дефект. Относительная погрешность измерения расстояния составляет не более 0,2% [9]. Также для поиска дефектов может применяться тепловой метод, основанный на измерении температуры грунта вблизи теплотрассы, либо температуры изоляции, и сравнении результата с расчетными значениями. Измерения температуры грунта можно массово производить путем беспилотной авиационной инфракрасной съемки [10, 11]. Данный метод дает наглядные результаты и принципиально прост; главным его недостатком является неавтоматизированный процесс обработки результатов измерений. После того, как дефект найден, необходимо оценить уровень его опасности. Оценку параметров обнаруженного дефекта можно произвести при помощи таких методов неразрушающего контроля, как акустическая томография и бесконтактная магнитная

диагностика, либо при помощи внутритрубной диагностики. Внутритрубная диагностика является самым точным, но и наиболее тяжело осуществимым. Бесконтактная магнитная диагностика обладает сравнительно высокими значениями погрешностей, но не требует какого-либо контакта с трубой, достаточно находиться на расстоянии нескольких метров от нее [12]. Метод акустической томографии производит измерения с точностью, соизмеримой с внутритрубной диагностикой, для его применения не требуется доступ к внутренней части трубы, но необходим контакт с ее изоляцией [13]. Все представленные методы инструментального контроля требуют участия оператора в процессе произведения измерений и обработки полученных данных.

Предлагаемый способ улучшения эффективности существующих методов контроля теплотрасс. Общая протяженность теплотрасс растет с каждым днем, и одним из ключевых требований к средствам их мониторинга является массовость и достоверность. Одним из наиболее массовых и достоверных методов контроля является беспилотная авиационная инфракрасная съемка. Использование подобного метода позволяет в короткие сроки получить изображения больших участков теплотрасс, при этом запечатленные участки могут не быть связанными между собой и относиться к разным ТС. Главным недостатком таких систем на сегодняшний день является отсутствие автоматизации процесса обработки получаемых изображений.

Предлагаемый способ устранения главного недостатка беспилотной авиационной инфракрасной съемки: использовать датчики позиционирования, позволяющие определять координаты беспилотного летательного аппарата в момент съемки; использовать операцию комплексирования изображений для совмещения полученных снимков с картами расположения теплотрасс; автоматизировать обработку получаемых значений температур на участках, относящихся к пролегающим теплотрассам, с целью автоматического подсчета координат аномалий.

Разработка предложенной системы комплексирования изображений позволит автоматизировать и ускорить процесс мониторинга ТС, тем самым снижая общие расходы на поддержание работоспособности ТС.

Литература

1. Основные принципы проектирования систем теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helpiks.org/7-78713.html> (дата обращения: 02.01.2019).
2. ГОСТ 21.705-2016. Система проектной документации для строительства: правила выполнения рабочей документации тепловых сетей. – Введен 01.07.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 22 с.
3. СП 124.13330.2012. Тепловые сети. – Введен 20.08.2012. – М.: Минрегион России, 2012. – 74 с.
4. СП 30.13330.2016. Свод правил. Внутренний водопровод и канализация зданий. – Введен 10.06.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 93 с.
5. Чупин Л.В., Шлапаков В.И. Анализ аварийности тепловых сетей и планирование замены труб в автоматизированной системе управления эксплуатацией тепловых сетей // Новости теплоснабжения. – 2014. – № 11(171). – С. 36–39.
6. Испытание тепловых сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://svoymaster.com/santehnika/ispytanie-teplovyyh-setei.html> (дата обращения: 05.01.2019).
7. ГОСТ Р 53402-2009. Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний. – Введен 01.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2010. – 54 с.
8. Капитанов А.И. Гидравлические испытания тепловых сетей – самое время задуматься! // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 3(127). – С. 21.
9. Портативный цифровой рефлектметр РЕЙС-105М1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kvazar-ufa.com/product284.html> (дата обращения: 06.01.2019).

10. Телевизионная съемка с БПЛА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://unmanned.ru/service/irvideo.html> (дата обращения: 06.01.2019).
11. Как и зачем мы делаем тепловую инфракрасную аэросъемку [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://aerogeo.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=47&Itemid=46&lang=en (дата обращения: 06.01.2019).
12. Уникальная технология и оборудование бесконтактной диагностики трубопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ogiss.ru/uslugi/nauchno-tehnicheskie-gazrobotki-v-obl/> (дата обращения: 28.01.2019).
13. Самойлов Е.В. Акустическая томография и внутритрубная диагностика. Сопоставление результатов // Новости теплоснабжения. – 2016. – № 10(194). – С. 42–44.



Колотаев Федор Сергеевич

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В41623

Направление подготовки: 12.04.01 – Приборостроение

e-mail: f.kolotaev@mail.ru



Бурункова Юлия Эдуардовна

Год рождения: 1964

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
к.ф.-м.н., доцент

e-mail: burunj@list.ru

УДК 54.057

**ФОРМИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ
ОРГАНИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ DAST**

Колотаев Ф.С., Бурункова Ю.Э.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Бурункова Ю.Э.

В работе рассматривалась технология получения полимерного композита, позволяющая получить среду с субмикронными кристаллами DAST красной формы. Были изготовлены растворы и полимерные пленки из нескольких из них. Был снят спектр поглощения полученных пленок.

Ключевые слова: полимерные композиты, субмикронные кристаллы, DAST, нелинейно-оптические кристаллы, терагерцевое излучение.

Свойства нелинейно-оптических (НЛО) материалов активно используются для генерации второй гармоники, электрооптической модуляции, смещения частот, и т.д. [1]. Традиционно в качестве НЛО материалов обычно применяются неорганические кристаллы (LiNbO_3 , LiTaO_3 , KNbO_3 , KDP, ADP, DADP и др.). Однако исследования ряда органических веществ [2], способных формировать молекулярные кристаллы, показали, что подобные материалы имеют высокие значения НЛО и электрооптических характеристик и перспективны для применения. Могут быть получены и использованы непосредственно молекулярные кристаллы, а также на их базе можно синтезировать полимерные НЛО материалы. Полимеры дешевы и обеспечивают легкий процесс производства пленок. Однако их НЛО свойства ограничены максимальной концентрацией хромофор, их пространственным распределением и ориентацией в пленке. С другой стороны, органические кристаллы имеют более хорошие НЛО свойства, но они сложны для производства, особенно в тонких пленках.

Весьма перспективным среди известных органических НЛО кристаллов является trans-4'-(dimethylamino)-N-methyl-4-stilbazolium tosylate (DAST), которая имеет очень большую нелинейно оптическую восприимчивость второго порядка, $\chi^{(2)}=2020\pm 220$ пм/В на $\lambda=1318$ нм, и низкую диэлектрическую проницаемость $\epsilon=5,2$ [3]. Именно поэтому DAST и его производные являются предметом расширенных исследований, начинающихся с оптимизации условий роста объемных и тонких пленок, и заканчивая производством интегрированных оптических элементов, таких как источник генерации и детектирования терагерцевых волн [4].

Целью работы являлось разработка технологии получения полимерного композита с субмикронными кристаллами DAST красной формы.

В работе были использованы следующие материалы: транс-4'-(диметиламино)-н-метил-4-стилбазол-тозилат (DAST, Aldrich, № 514160-5G), полиметилметакрилат (ПММА, Aldrich №18,223-0), изодецилакрилат (Aldrich № 408956, IDA).

DAST-порошок был растворен в этаноле при комнатной температуре. Раствор перемешивался на электромагнитной в течение 3 ч и выдерживался сутки. ПММА был растворен в толуоле при периодическом перемешивании в течение 24 ч. Далее, при перемешивании на электромагнитной мешалке в раствор гептана с IDA был добавлен раствор DAST/этанол. Через сутки в приготовленный раствор был добавлен ПММА/толуол. Получился прозрачный красный раствор. Состав раствора для изготовления полимерного композита, из которого в итоге был изготовлен композит, представлен в таблице.

Таблица. Состав раствора

DAST, г	Этанол, мл	Гептан, мл	ПММА/толуол, г/мл	IDA, г
0,0015	1	0,5	0,0015/1	0,05

Образцы пленки были сделаны методом испарения на стеклянной подложке при $T=60^{\circ}\text{C}$.

Как видно из спектра поглощения DAST-полимерной пленки (рисунок), основной максимум наблюдается при длине волны 480 нм, что соответствует молекулярной форме DAST [5]. Однако также отчетливо наблюдается плечо второго сверх длинноволнового максимума при длине волны примерно 560 нм, положение которого точно не определить из-за наложения этих полос поглощения. Проявление максимума на длине волны 560 нм свидетельствует об образовании красной кристаллической формы DAST в полимерной среде [5].

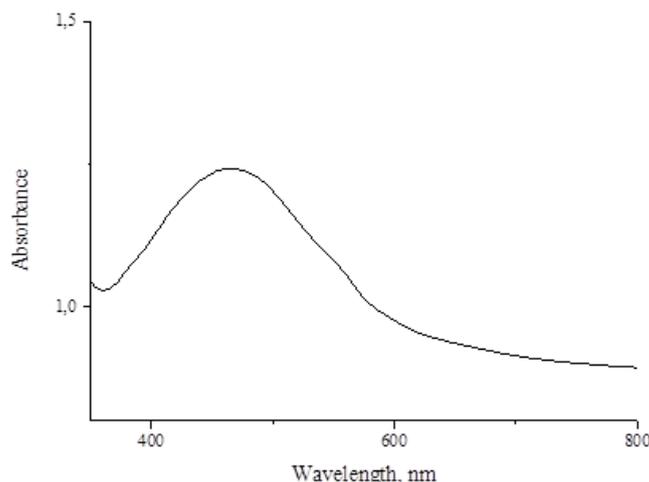


Рисунок. Спектр поглощения полимерной пленки с DAST

В результате работы была разработана технология получения полимерного пленочного композита с субмикронными кристаллами DAST красной формы. Анализ спектра поглощения пленки подтверждает образование красной кристаллической формы DAST в полученном композите.

Литература

1. Prabhu S.G., Mohan Rao P. Growth and characterization of a promising nonlinear optical organic crystal // Journal of Crystal Growth. – 2000.
2. Balogh L., Tomalia D.A. Poly(amidoamine) dendrimer-templated nanocomposites. 1. Synthesis of zero valent copper nanoclusters // J. Am. Chem. Soc. – 1998. – V. 120. – P. 7355–7356.
3. Ruiz B., Jazbinsek M., Gunter P. Crystal Growth of DAST // Cryst. Growth Des. – 2008. – V. 8(11). – P. 4173–4184.
4. Jazbinsek M., Mutter L., Gunter P. Photonic applications with the organic nonlinear optical crystal DAST // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2008. – V. 14(5). – P. 1298–1311.
5. Bhowmik A.K., Xu J., Thakur M. Polarized optical absorption and photoluminescence measurements in single-crystal thin films of 48-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate // Appl. Phys. Lett. – 1999. – V. 75. – P. 3291–3293.



Ле Куок Фам

Год рождения: 1990

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
аспирант

Направление подготовки: 18.06.01 – Химическая технология

e-mail: quosphampro@gmail.com



Успенская Майя Валерьевна

Год рождения: 1970

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,

д.т.н., профессор

e-mail: mv_uspenskaya@mail.ru

УДК 678.073:678.742.3

**САМОАРМИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ
ПОЛИПРОПИЛЕНА**

Ле Куок Фам, Успенская М.В.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.

Полипропилен является самым распространенным полимером, который характеризуется низкой плотностью, высокой прочностью на растяжение и сжатие. Самоармированные полимерные композиты относятся к классу композитов, в которых матрица и армирование происходят из одного и того же полимера. Основные факторы, влияющие на подготовку самоармированных полимерных композитов: кристаллизация, полиморфизм, сополимеры, переохлаждение, перегрев, и термопластичный эластомер. В настоящее время основными способами получения самоармированных полимерных композитов являются: горячее компактирование, прессование чередующихся слоев и литье под давлением.

Ключевые слова: самоармированные полимерные композиты, полипропилен, кристаллизация, полиморфизм, переохлаждение, перегрев, компактирование.

Самоармированные полимерные композиты (СПК) на основе полипропилена (ПП) имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными ПП композитами, поскольку материалы на их основе обладают большей жесткостью и механической прочностью. Армирующим агентом в СПК является волокно или лента, а матрица – аморфный или полукристаллический полимер той же природы. Основной задачей при изготовлении СПК является расширение диапазона температуры обработки материала, т.е. разности температур плавления наполнителя и самой полимерной матрицы. Для расширения этого температурного диапазона необходимо либо уменьшать температуру плавления полимерной матрицы или увеличивать температуру фазового перехода армированного наполнителя. В настоящее время существует несколько методов получения СПК на основе ПП, такие как горячее компактирование и горячее прессование чередующихся слоев, совместная экструзия, литье под давлением и т.д. [1–5].

Увеличение диапазона температуры обработки можно получить путем использования особенностей структуры ПП, а также посредством выбора подходящих методов и условий проведения эксперимента.

Далее перечислены основные подходы увеличения диапазона температуры обработки при изготовлении СПК [1, 3].

Факторы, влияющие на получение СПК на основе ПП

1. Кристалличность и полиморфизм. Все полукристаллические полимеры содержат области с различной долей кристалличности, которые характеризуются разными температурами плавления, что приводит к расширению диапазона температуры обработки СПК методом горячего компактирования [1, 6].

Аналогично, к расширению температурного диапазона приводит и наличие полиморфизма – существования различных кристаллических модификаций у полимера одного химического строения. Так, Для ПП по типу молекулярной структуры можно выделить три основных типа: изотактический, синдиотактический и атактический. Изотактический ПП существует в четырех различных кристаллических модификациях (α , β , γ , δ) с различными параметрами ячейки кристалла (моноклинная, гексагональная, триклинная и тригональная соответственно) из-за различной упаковки цепей [1]. Известно, что температура плавления формы β -ПП на 25°C ниже, чем у формы α -ПП [7]. Именно поэтому, в работе [8] при изготовлении СПК α -ПП форма использовалась в качестве армированного наполнителя, а форма β -ПП – матрицы.

2. Модификация полимерной матрицы. В результате процесса сополимеризации, макромолекулярная цепь становится менее регулярной. Как следствие, образовавшиеся кристаллы менее совершенны, что приводит к понижению температуры плавления материала по сравнению с соответствующим гомополимером. Разница температуры плавления между сополимером и гомополимером на основе ПП может достигать более 30°C, что является достаточным для получения СПК [1, 9].

3. Переохлаждение. Под переохлаждением понимается охлаждение вещества ниже температуры фазового перехода. Кристаллизация полимера может происходить при температуре ниже температуры плавления. Поэтому применение переохлажденного расплава при обработке СПК заключается в том, что волокно может быть введено в жидкую матрицу при температуре, значительно ниже температуры плавления матрицы, и волокна, добавленные в матрицу, не будут плавиться.

Однако ПП матрица обладает большой способностью к переохлаждению. Диапазон обработки представляет собой не разницу температур плавления между матрицей и волокнами, а разницу между температурой начала кристаллизации матрицы и температурой начала плавления волокон. Это явление дает широкий диапазон температуры обработки, более 50°C. Следует заметить, что переохлажденный расплав более нестабилен, когда температура расплава близка к температуре начала кристаллизации. В соответствии с результатами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) было определено, что температура переохлаждения наблюдалась выше 145°C, что намного выше, чем температура начала кристаллизации, но намного ниже, чем температура плавления [1, 3, 10–13].

4. Перевод армирующих волокон в напряженное состояние. Данный метод заключается в предварительном переводе высокоориентированных кристаллических полимерных волокон в напряженное состояние. Перегрев полимерного материала может привести к повышению температуры плавления путем возникновения напряжения системы. Например, температура плавления напряженных полипропиленовых волокон примерно на 20°C выше, чем ненапряженных полипропиленовых волокон.

Методы подготовки СПК на основе ПП. Для получения СПК, как уже упоминалось выше, используют следующие методы: горячее компактирование, горячее прессование чередующихся слоев, совместная экструзия, литье под давлением и их комбинации [3, 8, 11].

1. Горячее компактирование. Суть метода заключается в том, что во время горячего компактирования, волокна/ленты уплотняются при температуре в пределах диапазона плавления, точнее, вблизи начала плавления волокон/лент. Под действием температуры и давления, определенная часть поверхности каждого волокна/ленты плавится, а при охлаждении затвердевает и связывает структуру вместе [14–16]. Схема описанного

процесса представлена на рис. 1. Большое количество публикаций посвящено получению СПК на основе ПП методом горячего компактирования [14–21]. Недостатком данного метода является небольшой температурный диапазон (примерно 5°C), что приводит к значительным трудностям получения материалов на основе ПП.

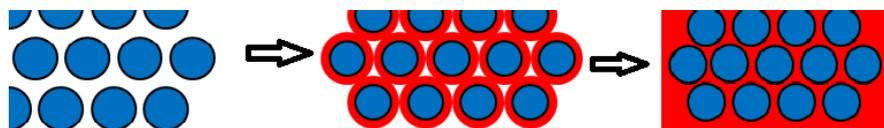


Рис. 1. Схема процесса горячего компактирования для ориентированных полимерных волокон. Ориентированная фаза (армирование) показана синим цветом, а расплавленная и перекристаллизованная матричная фаза (матрица) – красным [22]

Технология горячего компактирования имеет несколько недостатков, таких как, например, длительный цикл изготовления и получение материалов только простых форм.

2. Горячее прессование чередующихся слоев. Данный метод заключается в расположении армирующих слоев между матричными пленками полимера с последующим горячим прессованием. Под воздействием тепла и давления, матрица имеет более низкую температуру плавления и проникает в армирующие слои. Схема процесса показана на рис. 2.

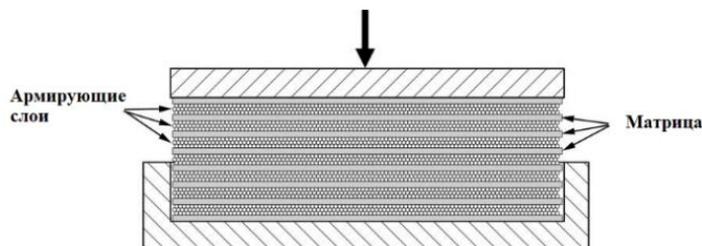


Рис. 2. Схема получения СПК посредством горячего прессования чередующихся слоев [6, 23]

3. Совместная экструзия. Технология совместной экструзии использует совместную экструзию двух типов полимерных лент (например, статистический сополимер ПП/гомополимер ПП) с различными температурами плавления, холодную вытяжку лент для повышения механических свойств и, наконец, консолидацию лент. Данный метод относится к получению бикомпонентных лент, включающих внешний слой (оболочку) и сердцевину. Во время процесса, ориентированные полимерные ленты могут быть переведены в напряженное состояние для повышения температуры плавления. Использование лент с тонким поверхностным слоем может привести к созданию композитов с большими объемными долями армирования. Совместная экструдированная лента имеет оболочечную структуру, состоящую из сердечника из гомополимера ПП, окруженного тонкой оболочкой из сополимера ПП. Схема процесса приведена на рис. 3.

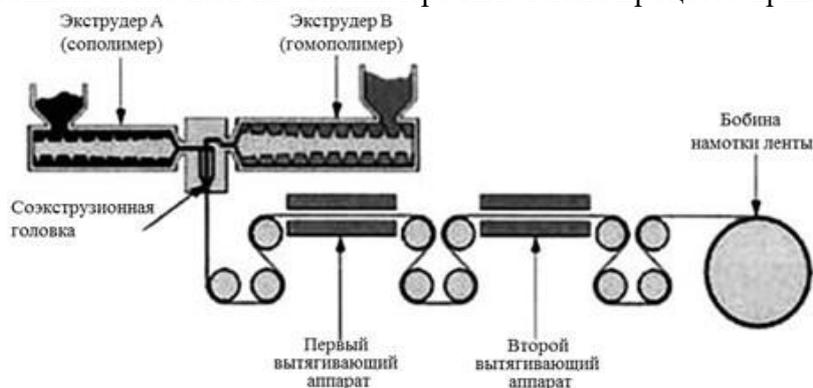


Рис. 3. Схема непрерывной ленточной совместной экструзии и процесса производства ориентированных полимерных лент, обладающих высокой степенью молекулярной ориентации [24]

Преимуществами этого процесса являются: увеличенный диапазон обработки, примерно на 20–40°C, высокая объемная доля армирования (90%) и превосходное сцепление между лентами [4]. Существуют исследования для получения СПК на основе ПП с однонаправленными лентами [9, 25] и с сетчатыми тканями [26].

4. Литье под давлением. Литье под давлением широко используется в области переработки полимеров, однако, традиционное литье под давлением не может быть использовано для производства СПК [27].

Образец СПК на основе ПП можно получить методом литья под давлением с использованием гранул полимера в качестве матрицы и сетчатой ткани в качестве армированного наполнителя. При серийном производстве СПК необходимо использовать машину с винтовым впрыском.

Свойства СПК на основе ПП. При получении СПК на основе ПП наблюдается улучшение механических свойств за счет большего контакта между наполнителем и матрицей. СПК на основе ПП имеет низкую плотность, поэтому по сравнению с полимерными композитами, армированными стекловолокнами, полученный самоармированный материал становится значительно легче. СПК эффективны и с точки зрения их абсолютных механических и физических свойств. По сравнению с неармированным ПП, СПК заметно жесток и обладает более высокой прочностью и ударной вязкостью при низких температурах. Более того, самоармирование вызывает в полимерном композите следующие изменения: повышение температуры стеклования и плавления, улучшение термостойкости. Также волокнистая композитная структура позволяет регулировать анизотропное и положительное тепловое расширение. Одновременно с общим улучшением механических свойств повышается износостойкость поверхности композита против истирания. По сравнению со стеклопластиком и другими полипропиленами, армированными волокнами, у других полимеров выдающимися характеристиками являются исключительно высокая ударная вязкость и устойчивость к перфорации.

Применение. СПК обладает высокой жесткостью и низкой плотностью и приводит к широкому применению в производстве строительных, автомобильных и потребительских товаров. Обладая превосходной устойчивостью к динамическим нагрузкам, СПК на основе ПП используются для изготовления спортивных товаров, предохранительных касок, кожухов и т.п. Еще одним перспективным направлением является применение СПК в аудиооборудовании в качестве звукопоглощающих материалов. В настоящее время количество компаний, производящих товарные марки СПК, невелико. Основные коммерчески доступные материалы СПК на основе ПП являются: PURE[®], Curv[®], Torodon[®], Armordon[®] [28–30].

Вывод. В настоящее время к разработке и применению СПК на основе ПП уделяют большое внимание. Процесс получения самоармированных композитов имеет ряд преимуществ, таких как, невысокая температура и низкое давление, простота оборудования. СПК на основе ПП характеризуются низкой плотностью, высокой ударопрочностью, и поэтому имеют специальное применение. Уникальные свойства СПК на основе ПП, такие как: способность к вторичной переработке, экономичность материала и т.п., приводят к ускоренному развитию в этой области.

Литература

1. Karger-Kocsis J., Bárány T., Single-polymer composites (СПКs): Status and future trends // Compos. Sci. Technol. – 2014. – V. 92(3). – P. 77–94.
2. Loos J., Schimanski T. Morphological investigation of polypropylene single fiber reinforced polypropylene model composites // Polymer. – 2001. – V. 42(8). – P. 3827–3834.

3. Wang J. Polypropylene Single-Polymer Composites // Polypropylene-Based Biocomposites and Bionanocomposites. – 2018. – P. 177–246.
4. Matabola K.P., De Vries A.R., Moolman F.S., Luyt A.S. Single polymer composites: a review // Journal of Materials Science. – 2009. – V. 44(23). – P. 6213–6222.
5. Agrawal B. Single Polymer Composite made of polypropylene fabric and matrix // Polym. Adv. Technol. – 2013. – V. 24. – 1 p.
6. Żenkiewicz M., Moraczewski K., Rytlewski P., Stepczyńska M., Żuk T. Characteristic and applications of single polymer composites // Polimery. – 2015. – № 1. – 3 p.
7. Bárány T., Izer A., Karger-Kocsis J. Impact resistance of all-polypropylene composites composed of alpha and beta modifications // Polymer Testing. – 2009. – V. 28(2). – P. 176–182.
8. Karger-Kocsis J., Siengchin S. Single-Polymer Composites: Concepts, Realization and Outlook: Review // KMUTNB: IJAST. – 2014. – V. 7. – № 1. – P. 1–9.
9. Alcock B., Cabrera N.O., Barkoula N.-M., Loos J., Peijs T. The mechanical properties of unidirectional all-polypropylene composites // Composites: Part A. – 2006. – V. 37. – P. 716–726.
10. Dai P., Zhang W., Pan Y., Chen J., Wang Y., Yao D. Processing of single polymer composites with undercooled polymer melt // Composites Part B: Engineering. – 2011. – V. 42(5). – P. 1144–1150.
11. Севастьянов Д.В., Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Самоармированные полимерные композиты – классификация, получение, механические свойства и применение (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017. – № 4(52). – С. 104–118.
12. Kmetty Á., Bárány T., Karger-Kocsis J. Injection moulded all-polypropylene composites composed of polypropylene fibre and polypropylene based thermoplastic elastomer // Composites Science and Technology. – 2012. – V. 73. – P. 72–80.
13. Ward I.M., Hine P.J. The science and technology of hot compaction // Polymer. – 2004. – V. 45(5). – P. 1413–1427.
14. Hine P.J., Ward I.M., Olley R.H., Bassett D.C. The hot compaction of high modulus melt-spun polyethylene fibres // Journal of Materials Science. – 1993. – V. 28(2). – P. 316–324.
15. Hine P.J., Ward I.M., Jordan N.D., Bassett D.C. The hot compaction behaviour of woven oriented polypropylene fibres and tapes. I. Mechanical properties // Polymer. – 2003. – V. 44(4). – P. 1117–1131.
16. Jordan N.D., Bassett D.C., Olley R.H., Hine P.J., Ward I.M. The hot compaction behaviour of woven oriented polypropylene fibres and tapes. II. Morphology of cloths before and after compaction // Polymer. – 2003. – V. 44(4). – P. 1133–1143.
17. Kabeel M.A., Bassett D.C., Olley R.H., Hine P.J., Ward I.M. Compaction of high-modulus melt-spun polyethylene fibres at temperatures above and below the optimum // Journal of Materials Science. – 1994. – V. 29(18). – P. 4694–4699.
18. Abo El-Maaty M.I., Bassett D.C., Olley R.H., Hine P.J., Ward I.M. The hot compaction of polypropylene fibres // Journal of Materials Science. – 1996. – V. 31(5). – P. 1157–1163.
19. Hine P.J., Bonner M., Brew B., Ward I.M. Hot compacted polypropylene sheet // Plastics. – 1998. – V. 27(4). – P. 167–171.
20. Prosser W., Hine P.J., Ward I.M. Investigation into thermoformability of hot compacted polypropylene sheet // Plastics, Rubber and Composites. – 2000. – V. 29(8). – P. 401–410.
21. Hine P.J., Ward I.M. The hot compaction of woven polypropylene tapes // Journal of materials science. – 1998. – V. 33. – P. 2725–2733.
22. Hine P.J., Bonner M., Ward I.M., Swolfs Y., Verpoest I., Mierzwa A. The hivocomp project: carbon fibre/PA12 hybrid single polymer composites // The 19th international conference on composite materials. – 2013. – P. 7408–7416.
23. Kmetty Á., Bárány T., Karger-Kocsis J. Self-reinforced polymeric materials: A review // Progress in Polymer Science. – 2010. – V. 35(10). – P. 1288–1310.
24. Alcock B., Cabrera N.O., Barkoula N.-M., Loos J., Peijs T. Interfacial properties of highly oriented coextruded polypropylene tapes for the creation of recyclable all-polypropylene composites // Journal of Applied Polymer Science. – 2007. – V. 104(1). – P. 118–129.

25. Banik K., Abraham T.N., Karger-Kocsis J. Flexural Creep Behavior of Unidirectional and Cross-Ply All-Poly(propylene) (PURE) Composites // *Macromol. Mater. Eng.* – 2007. – V. 292. – P. 1280–1288.
26. Alcock B., Cabrera N.O., Barkoula N.M., Spoelstra A.B., Loos J., Peijs A.A.J.M. The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites // *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2007. – V. 38(1). – P. 147–161.
27. Wang J., Mao Q., Chen J. Preparation of polypropylene single-polymer composites by injection molding // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2013. – V. 130(3). – P. 2176–2183.
28. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ditweaving.com> (дата обращения: 06.01.2019).
29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.curvonline.com> (дата обращения: 06.01.2019).
30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.armordon.com/gb/en/products/torodon> (дата обращения: 06.01.2019).



Мельникова Маргарита Валерьевна

Год рождения: 1987

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В41081

Направление подготовки: 12.04.02 – Оптико-электронные цифровые
системы

e-mail: marti@unoanimo.ru



Васильев Александр Сергеевич

Год рождения: 1988

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

e-mail: a_s_vasilev@corp.ifmo.ru

УДК 528.8.04

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ**

Мельникова М.В.

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

Работа выполнена в рамках НИР № 617031 «Исследование и разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

В работе проведен информационный поиск и анализ методов и систем исследования поверхности лесных массивов, рассмотрены оптические свойства растительности и способы базирования оптико-электронных систем при дистанционном мониторинге лесных массивов.

Ключевые слова: экологический мониторинг, беспилотные летательные аппараты, лидары, спутниковое зондирование, лесной массив, многоспектральные системы, дистанционное зондирование.

Введение. К традиционным методам экологического мониторинга леса относятся наземные наблюдения, обходы, замеры участков, что является трудоемкой задачей. Различные методы с использованием оптико-электронных комплексов позволяют проводить исследования больших площадей более оперативно и с необходимой степенью детализации. Благодаря этому можно эффективно решать многие вопросы в сфере экологического мониторинга леса: картография, оценка экологической обстановки, оценка состояния городских лесов и зеленых зон, оценка пирогенной трансформации экосистем, последствий вырубок и последствий поражения вредителями, предотвращение лесных пожаров, инвентаризация лесов, учет лесного фонда.

Для Российской Федерации решение этих задач особенно актуально, так как площадь лесов составляет значительную часть от всей площади территории – 45,4%. Лес является ценным ресурсом для многих отраслей промышленности, кроме того, патологические изменения в лесных фитоценозах влекут за собой изменения в экосистемах и отражают климатические изменения.

Постановка задачи. Оптические свойства лесной растительности позволяют успешно применять оптические методы, а также оптико-электронные системы на их основе, для определения видового состава, анализа состояния лесного покрова.

Выделяют четыре типа поверхностей растительных образований [1]:

1. хвойные породы в зимний период;
2. хвойные породы в летний период;
3. лиственные породы и густые травянистые покровы в летний период;
4. лесные насаждения и травянистые покровы в осенний период.

Спектральные свойства всех типов определяются содержанием в листе (хвое) хлорофилла, что влияет на способность поглощать, отражать и пропускать солнечную энергию в определенных диапазонах [2]. На рисунке представлены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) для различных типов растительности [1].

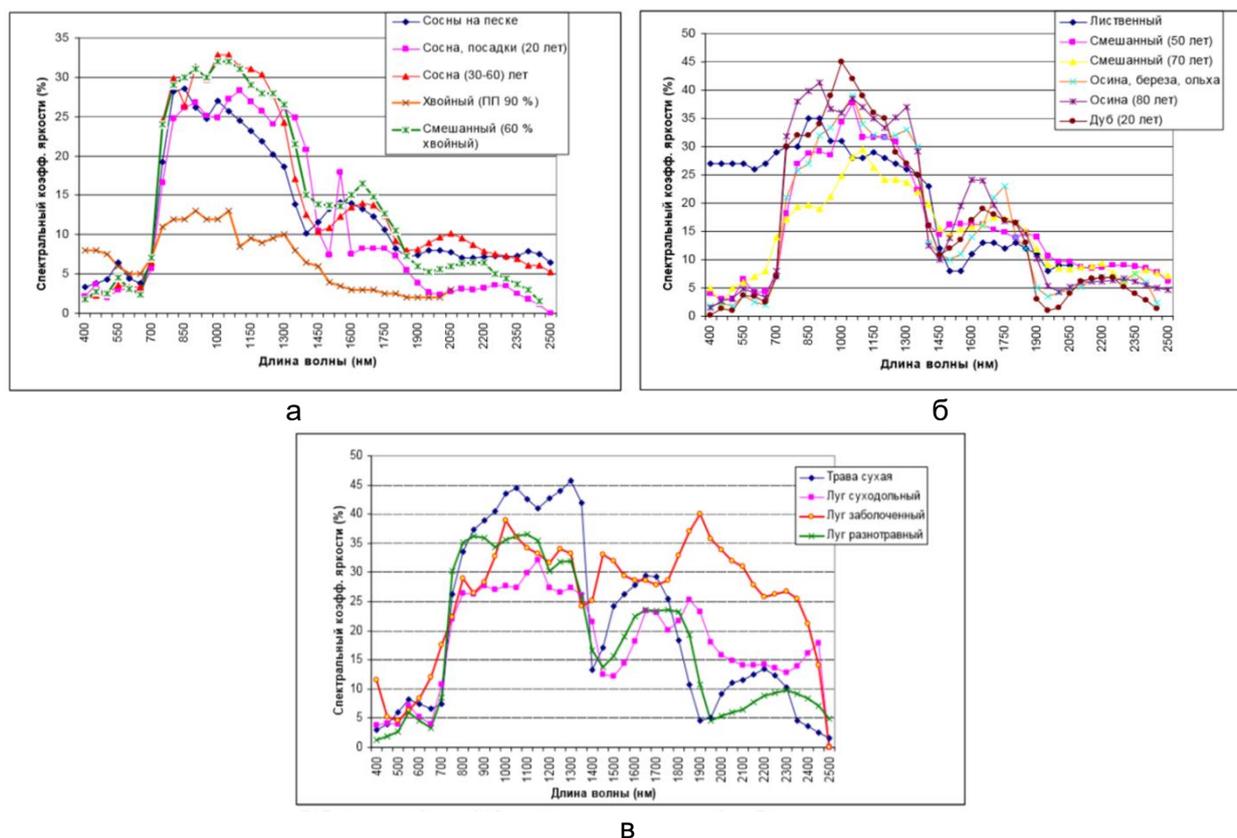


Рисунок. Коэффициенты спектральной яркости хвойной растительности (а), лиственной (б) и луговой (в) растительности

Из рисунка видно, что КСЯ разных типов растительных сообществ имеют свои особенности в видимом и инфракрасном диапазоне (ИК). Совместно с такими критериями, как текстурные особенности изображения и высота произрастания, это позволяет идентифицировать лесной массив по видовому составу, что, в свою очередь, решает задачи лесного экологического мониторинга, рассмотренные выше.

Результаты. Дистанционное зондирование поверхности лесного массива представляет собой сбор информации о территории и состоянии леса посредством неконтактной съемки аппаратурой, базирующейся на различных платформах. В зависимости от базирования можно выделить следующие методы мониторинга: спутниковые, авиационные, наземные. Авиационные, в свою очередь, можно разделить на пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (БЛА). Сравнительная характеристика приведена в табл. 1.

Учитывая оптические свойства растительности, для исследования и мониторинга целесообразно применять оптико-электронные системы (ОЭС) видимого и ИК-диапазона, фото- и видеокамеры высокого разрешения, многоспектральные и лидарные системы.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов мониторинга лесных массивов

Методы	Достоинства	Недостатки
Спутниковые	автоматизированный сбор данных, большие базы данных, широкая полоса обзора	высокая стоимость, малая оперативность, сложности с исследованием малых площадей
Авиационные	длительные полеты на большие дистанции, грузоподъемность, устойчивость	высокая стоимость и сложность организации полетов
БЛА	возможность пролета на малой высоте, независимость от графиков авиационного движения, низкая стоимость	ограниченный радиус действия радиоканала
Наземные	возможность использования вышек сотовых операторов, автотранспорта	полоса обзора ограничена расположением вышки или проходимость автотранспорта

Многоспектральные системы представляют собой ОЭС с несколькими спектральными каналами, благодаря которым формируется многомерное пространственно-спектральное изображение. Каждый элемент такого изображения несет информацию не только о пространственном изображении местности на плоскости, но и о частоте принятого излучения [3].

В мониторинге лесных массивов также широко используются телевизионные ОЭС, преимущественно цифровые камеры высокого разрешения, а также IP-камеры для наземных систем [4].

Лидарные системы представляют собой активные ОЭС с лазером в качестве источника излучения. Система посылает периодические импульсы вдоль траектории движения измерительной платформы, полученный отраженный сигнал позволяет посредством специальных алгоритмов обработки сформировать изображение исследуемой поверхности [5].

Достоинства и недостатки различных ОЭС представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика ОЭС для исследования и мониторинга лесных массивов

ОЭС	Достоинства	Недостатки
Многоспектральные	высокая точность, большое разнообразие систем и конфигураций	сложность обработки изображений для детектирования объектов
Телевизионные	низкая стоимость, простота обслуживания, малые габариты	сложность автоматизации процесса распознавания объектов
Лидары	высокая точность, производительность, работа в ночное время	высокая стоимость, зависимость от состояния атмосферы, хрупкость системы

С учетом достоинств и недостатков методов мониторинга, а также оптических свойств поверхности лесных массивов, предлагается использовать многоспектральную ОЭС, сочетающую в себе несколько каналов в видимом и ИК спектральных диапазонах, базирующуюся на беспилотном летательном аппарате. Данный комплекс позволит определять видовой состав лесной растительности (хвойные, лиственные деревья, опавшая листва, хвоя, травянистые растения).

Заключение. В ходе работы проведен информационный поиск и анализ оптических методов и систем, используемых для исследования поверхности лесных массивов. Для решения основных задач экологического мониторинга наиболее целесообразным является

выбор многоспектральной системы, совмещающей в себе каналы в видимом и ИК-диапазонах, базирующейся на БЛД. В дальнейшем планируется разработка схемы многоспектрального оптико-электронного комплекса, которая будет дополнена лазерным дальномером, для учета высот лесного полога и более точного определения видового состава лесной растительности.

Литература

1. Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф. Спектрометрирование ландшафтов. Учебное пособие для студентов. – М.: Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010. – 120 с.
2. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии / Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
3. Мальцев Г.Н., Козинцев В.И., Данилкин А.П. Космические системы и технологии многоспектрального дистанционного зондирования Земли // Информация и Космос. – 2010. – № 1. – С. 148–158.
4. Васильев А.С. Исследование и разработка многоспектральной оптико-электронной системы комплексирования изображений для обнаружения и мониторинга лесных пожаров: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – СПб., 2015.
5. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л. и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.



Нгуен Дык Тунг

Год рождения: 1988

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
аспирант

Направление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: tungduc88@gmail.com



Лебедько Евгений Георгиевич

Год рождения: 1941

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
д.т.н., профессор

e-mail: eleb@rambler.ru

УДК 535:631

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ВСЕПОГОДНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ ДО МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Нгуен Д.Т.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Лебедько Е.Г.

Проанализированы помехи обратного рассеяния в условиях тумана и дымки различной плотности. С учетом того, что коэффициент отражения от морской поверхности не более 4% предложено осуществлять измерения по спаду помехи обратного рассеяния. Определен диапазон измеряемых высот и дана оценка погрешности измерения в зависимости от передаточной функции приемно-усилительного тракта в условиях инерционного и безынерционного приема. Определена энергетическая компенсация потери при заданной точности измерения. Разработана структурная схема импульсного лазерного высотомера, которая дает возможность измерения малых высот до морской поверхности практически в любых метеорологических условиях.

Ключевые слова: морская поверхность, помеха обратного рассеяния, всепогодный импульсный лазерный высотомер, инерционный прием, дисперсия оценки времени запаздывания, полосы пропускания.

Применение импульсных лазерных высотомеров малых высот над морской поверхностью сопряжено с низкой вероятностью приема отраженных сигналов от морской поверхности в силу того, что отражающая поверхность представляется собой множество элементарных зеркальных отражателей, случайно ориентированных в пространстве. При этом коэффициент отражения этих элементарных отражателей к нормальному падению излучения составляет величину 0,02–0,04. Естественно, что для надежной фиксации отраженного сигнала в таких условиях потребуется порядка 100 зондирований морской поверхности [1, 2].

Новый метод измерения высоты до морской поверхности в условиях тумана и сильной дымки. В условиях тумана над морской поверхностью считается использование лазерных высотомеров невозможным. При тумане возникает достаточно большая по величине помеха обратного рассеяния, которая обрывается по времени, соответствующем расстоянию до морской поверхности. В этом случае можно определить высоту до морской поверхности при каждом зондирующем импульсе, фиксируя временное положение спада сигнала обратного рассеяния.

Сущность нового метода основана на измерении временного интервала между временными положениями спада излучаемого сигнала и спада помехи обратного рассеяния.

На рис. 1 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие принцип определения высоты до морской поверхности в условиях тумана и сильной дымки.

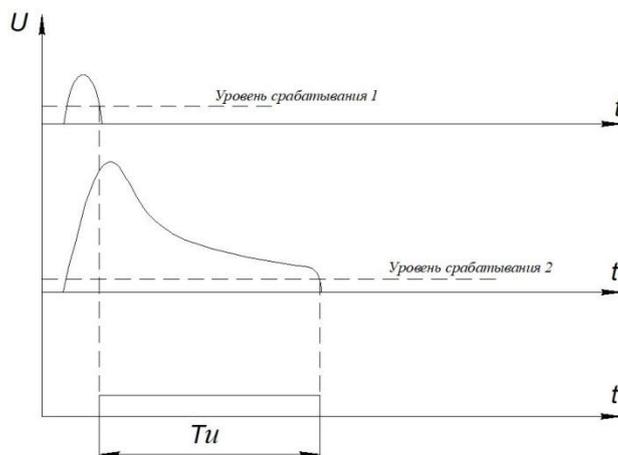


Рис. 1. Временные диаграммы, иллюстрирующие принцип определения высоты до морской поверхности в условиях тумана и сильной дымки

Всепогодный импульсный лазерный высотомер для измерения малых высот над морской поверхностью. Естественно, что для измерения малых высот над морской поверхностью приемная система импульсного лазерного высотомера должна состоять из двух каналов: канала обычного измерения расстояний, в котором используется схема отключения съема информации о дистанции до поверхности моря при отраженных сигналах, меньших уровня срабатывания, и канала, включаемого по достижению помехи обратного рассеяния некоторого уровня. В этом канале осуществляется фиксация временного положения сигнала по его спаду.

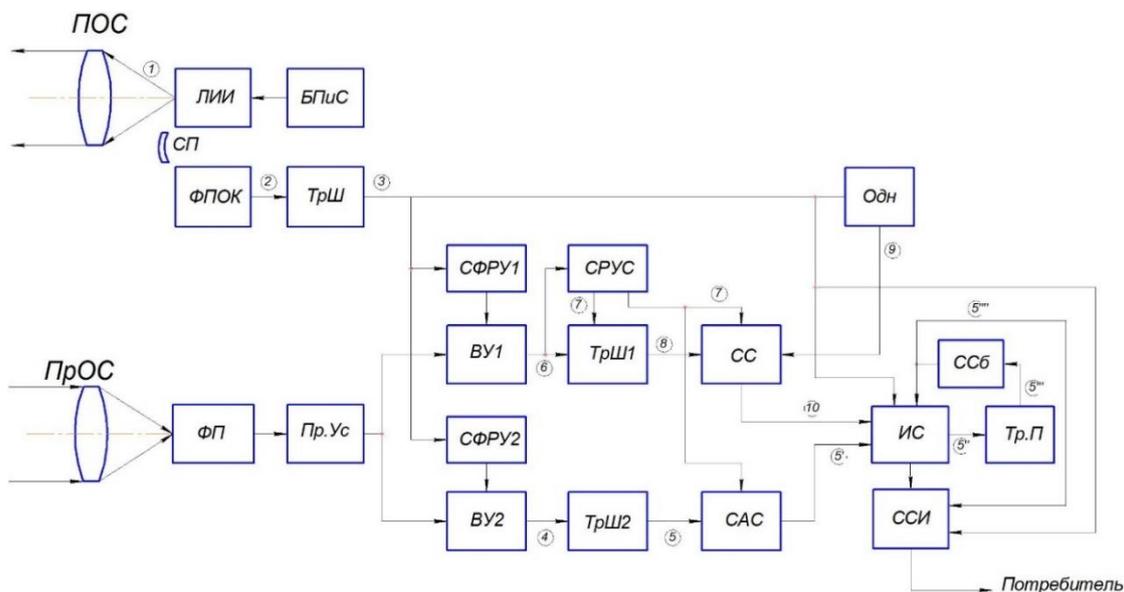


Рис. 2. Структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера для измерения малых высот над морской поверхностью: БПИС – блок питания и синхронизации; ВУ – видеоусилитель; ИС – измерительная схема; ЛИИ – лазерный источник импульсного излучения; Одн – одновибратор; ПОС – передающая оптическая система; ПрОС – приемная оптическая система; ПрУс – предварительный усилитель; ССб – схема сброса; САС – схема антисовпадения; СП – светопровод; СРУС – схема регулировки уровня срабатывания порогового устройства; СС – схема совпадения; ССИ – схема съема информации о высоте; СФРУ – схема функциональной регулировки усиления; Тр.П – триггер переполнения; ТрШ – триггер Шмитта; ФП – фотоприемник приемной системы; ФПОК – фотоприемник опорного канала

На основании изложенного предлагается для измерения малых высот над морской поверхностью при любых метеорологических условиях структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера, приведенная на рис. 2.

Лазерный источник формирует зондирующие импульсы. Посредством СП часть энергии отводится к ФПОК. ТрШ формирует прямоугольный импульс, длительность которого соответствует длительности зондирующего сигнала. Фронтом этого импульса запускаются СФРУ1 и СФРУ2, а спадом запускается ИС. Одн формирует импульс, длительность которого соответствует заданной требуемой рабочей дистанцией. Этот импульс открывает СС.

СРУС порогового устройства выполняет две функции:

- формирует сигнал для открытия СС, и закрытия САС;
- формирует сигнал регулировки уровня срабатывания порогового устройства для фиксации спада помехи обратного рассеяния.

Схемы СФРУ1, СФРУ2 формируют напряжения, обратно-пропорциональные помехи обратного рассеяния по величинам, соответствующим наличию слабой дымки и сильной дымки.

При чистой атмосфере или слабой дымке при наличии отраженного сигнала срабатывает ТрШ2, спад выходного импульса от ТрШ2 поступает через открытую САС в ИС.

Через определенный промежуток времени происходит передача с ССИ информации потребителю. При отсутствии принимаемого отраженного от морской поверхности сигнала, счетчик ИС переполняется, срабатывает Тр.П, сигнал с которого запускает ССб, счетчик обнуляется, ИС приходит в исходное состояние и блокируется команда на съем информации потребителю.

ТрШ1 – формирует прямоугольные импульсы, длительность которого соответствует длительности помехи обратного рассеяния от ее возникновения до спада, соответствующего контакту с морской поверхностью. Спад этого импульса соответствует окончанию измеряемого временного интервала. Таким образом, в условиях тумана при каждом импульсе излучения осуществляется измерение высоты.

Анализ потенциальной погрешности высотомера. При рассмотрении точности измерений основными погрешностями являются шумовая, динамическая и методическая. Первая погрешность обусловлена сдвигом отсчетной точки под действием шума, вторая – изменением величины сигнала и крутизны спада его, и третья – методом измерения временного интервала.

Так как помехи обратного рассеяния определяются состоянием атмосферы и мощностью излучаемого сигнала, то при заданной плотности тумана или дымки динамической погрешностью можно пренебречь за исключением измерений на максимальных дистанциях.

При построении импульсных лазерных высотомеров используются в качестве фотоприемника фотодиоды или лавинные фотодиоды. При этом в первом случае, при простоте построения электрической схемы и температурной стабилизации, необходимо учитывать инерционность входной цепи и связанные с этим энергетические и точностные потери, а при использовании лавинных фотодиодов с использованием дополнительных схем стабилизации можно рассматривать прием сигналов как безынерционный.

При безынерционном приеме дисперсия оценки временного положения сигнала при его фиксации по спаду определяется из уравнения [3]

$$m_1 \{Y(t_0)\} + (t - t_0^*) \frac{dm_1 \{Y(t_0)\}}{dt} + Y^0(t_0) = Y_n, \quad (1)$$

где $m_1 \{Y(t_0)\}$ – математическое ожидание функции оптимального выходного эффекта; $Y^0(t_0)$ – отклонение функции от математического ожидания; Y_n – уровень фиксации.

Исходя из условия несмещенной оценки, дисперсия ее при фиксации по спаду в соответствии с (1) будет определяться зависимостью

$$\sigma_{\phi}^2 = - \frac{\frac{G}{2\pi_0} \int_0^{\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega}{\left[\frac{j}{\pi_0} \int_0^{\infty} \omega |S(j\omega)|^2 d\omega \right]^2}. \quad (2)$$

Воспользуемся гауссовой спектральной функцией $S(j\omega)$ принимаемого сигнала, учитывая, что форма сигнала заданной энергии и величины незначительно влияет на условия обнаружения и погрешность оценки времени запаздывания [4]. При этом будет интересовать зависимость дисперсии ошибки при масштабном изменении ширины полосы пропускания приемно-усилительного тракта. Тогда из (2) получим

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{\sigma_{\text{ш}}^2 \tau^2 (1+n^2)}{a^2 8\sqrt{2\pi n}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2 = \frac{G}{\tau}$ – дисперсия шумов на выходе приемно-усилительного тракта; a – величина сигнала; τ – длительность сигнала; n – масштабный коэффициент изменения ширины полосы пропускания ($n < 1$ – расширение полосы пропускания). На рис. 3 представлен график изменения средней квадратичной погрешности фиксации по спаду сигнала η от величины n относительно аналогичной погрешности при оптимальной оценке по максимуму правдоподобия.

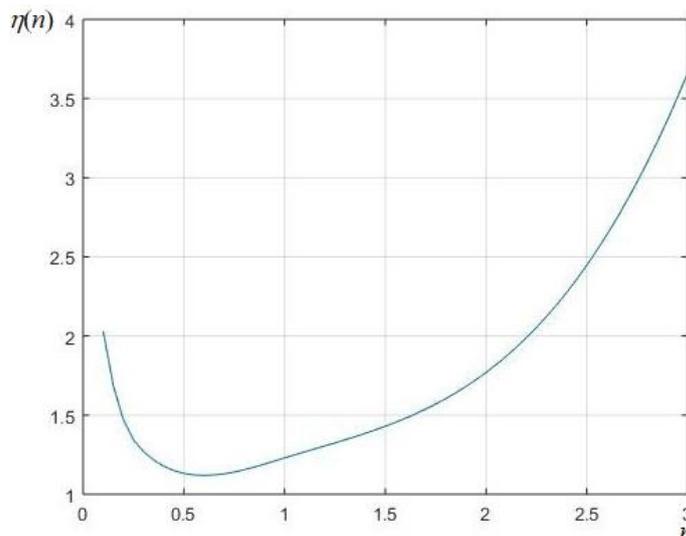


Рис. 3. Изменение средней квадратичной погрешности от ширины полосы пропускания

При этом минимальная дисперсия погрешности фиксации по спаду сигнала будет иметь место при расширении полосы пропускания приемно-усилительного тракта 1,73 раза. В этом случае средняя квадратичная погрешность фиксации, тем не менее, будет в 1,12 раза выше по отношению к оптимальной (оценка по максимуму правдоподобия). При этом энергетические потери не превысят 10%.

Использование в качестве фотоприемников фотодиодов приводит к необходимости учета инерционности входной цепи вследствие различного частотного преобразования шумов входной цепи и усилительного тракта. При этом в качестве показателя инерционности приема можно рассматривать величину

$$v = \left(\frac{2\pi m \gamma^2}{1+m} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где $\gamma = \frac{T}{\tau}$ – параметр инерционности; T – постоянная времени входной цепи $T=R_n C_\phi$

(R_n – сопротивление нагрузки фотодиода; C_ϕ – емкость p - n -перехода фотодиода); $m = \frac{G_2}{G_1}$, G_1 ,

G_2 – величины энергетических спектров шумов входной цепи и усилительного устройства. Здесь эти величины могут быть рассчитаны согласно известным соотношениям

$$G_1 = 2eI + \frac{4kT^0}{R_n} \text{ и } G_2 = 2eI_A,$$

где e – заряд электрона; I – среднее значение тока, протекающего через p - n -переход фотодиода; k – постоянная Больцмана; T^0 – температура среды; I_A – рабочая точка первого каскада усиления.

Инерционность входной цепи существенно сказывается не только на условия обнаружения сигнала, но и на точность измерения, вследствие существенного уменьшения ширины полосы пропускания приемно-усилительного тракта при оптимальной фильтрации. Естественно, что при фиксации по его спаду погрешность измерения времени запаздывания еще увеличивается из-за отступления от условий оптимальной оценки. Следует отметить, что средняя квадратичная погрешность оценки времени запаздывания в условиях инерционного приема в зависимости от показателя инерционности входной цепи может превышать аналогичную погрешность при безынерционном приеме более чем в 15 раз [5].

Это имеет место при оптимальном приеме. Безусловно, что в условиях оптимального приема с учетом того, что ширина полосы пропускания приемно-усилительного тракта существенно меньше, чем при безынерционном приеме, спад принимаемого сигнала получает меньшую крутизну, что увеличивает шумовую погрешность.

Для снижения погрешности фиксации, как и при безынерционном приеме необходимо увеличить ширину полосы пропускания приемно-усилительного тракта. В этом случае желательно оценить энергетические и точностные характеристики высотомера.

В условиях инерционности входной цепи энергетический спектр шумов, приведенных к входу, имеет вид [4]

$$G(\omega) = G_1 (1 + m + mT^2\omega^2). \quad (4)$$

При этом оптимальная передаточная функция приемно-усилительного тракта с позиции обнаружения и оценки параметров будет определяться зависимостью

$$K(j\omega) = \frac{hS^*(j\omega)}{G_1(1 + m + m\omega^2 T^2)} = K_1(j\omega)K_2(j\omega), \quad (5)$$

где $S^*(j\omega)$ – комплексно-сопряженная спектральная функция сигнала; $S(j\omega)$ – будем считать, что таким сигналом, условно, является излучаемый сигнал; $K_1(j\omega)$ – передаточная функция входной цепи; $K_2(j\omega)$ – передаточная функция усилительного устройства.

При масштабном расширении полосы пропускания приемно-усилительного тракта в n раз величина отношения сигнала к шуму будет определяться зависимостью

$$\mu = \frac{\operatorname{Re} \left[\frac{1}{\pi} \int_0^\infty S(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \right]}{\left[\frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left\{ G_1 + \frac{G_2}{|K_1(j\omega)|^2} \right\} |K(j\omega)|^2 e^{j\omega t_0} d\omega \right]^{\frac{1}{2}}}.$$

Используя вышеприведенные предпосылки о спектральной функции принимаемого сигнала, получим

$$\mu = \frac{a_{\text{вх}} \left(\frac{2}{\pi G_1} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \frac{|S(j\omega)| |S(jn\omega)|}{1+m+m(n\omega T)^2} d\omega}{\left\{ \int_0^{\infty} \frac{(1+m+m\omega^2 T^2) |S(jn\omega)|^2}{[1+m+m(n\omega T)^2]^2} d\omega \right\}^{\frac{1}{2}}} = \frac{a_{\text{вх}} \left(\frac{2}{\pi G_1} \right)^{\frac{1}{2}} J_1(T, n)}{(1+m)J_2(T, n) + mT^2 J_3(T, n)}, \quad (6)$$

где $J_1(T, n) = \int_0^{\infty} \frac{|S(j\omega)| |S(jn\omega)|}{1+m+m(n\omega T)^2} d\omega$, $J_2(T, n) = \frac{1}{n} J_2(T)$, $J_3(T, n) = \frac{1}{n^3} J_3(T)$,

$$J_2(T) = \frac{\pi\tau}{\sqrt{2}v^2(1+m)^2} \left[\frac{\sqrt{\pi}v^2}{2} \left(1 + \frac{2}{v^2} \right) H\left(\frac{1}{v}\right) + 1 \right], \quad J_3(T) = \frac{\sqrt{2}\pi^2}{v^4\tau(1+m)^2} \left[\frac{\sqrt{\pi}v^2}{2} \left(1 + \frac{2}{v^2} \right) H\left(\frac{1}{v}\right) - 1 \right],$$

$H(x) = x[1 - \text{erf}(x)] \exp(x^2)$ – дополнительный интеграл вероятностей [6],

$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция Крампса.

Энергетические потери вследствие инерционности входной цепи составят 10% и 20% соответственно при $v = 0,5$ и $v = 2,0$.

Расчеты по формуле (6) показывают, что расширение полосы пропускания приемно-усилительного тракта в 1,73 раза (что соответствует $n=0,577$) приводит к дополнительным энергетическим потерям при $v = 0,5$ на 20% и $v = 2,0$ на 40%.

Среднюю квадратичную погрешность фиксации по спаду сигнала в условиях инерционного приема для оптимальной фильтрации с учетом оговоренных допущений можно представить соотношением

$$\sigma_{\phi}(T) = \left\{ \frac{1,25v^2\tau G_1(1+m)}{2\pi a^2 \sqrt{2} \left[1 - \sqrt{\pi} H\left(\frac{1}{v}\right) \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Расчеты по формуле (7) показывают, что в условиях оптимальной фильтрации средняя квадратичная погрешность фиксации временного положения по спаду сигнала при инерционном приеме для v , равных 0,5 и 2,0, будет соответственно больше, чем при безынерционном приеме в 1,3 и 2,5 раза. При расширении полосы пропускания в 1,73 раза следует ожидать, несмотря на увеличение крутизны спада, более существенный рост погрешности из-за подъема энергетического спектра шума. Естественно, в этом случае нет необходимости расширять полосу пропускания, при которой может уменьшиться погрешность измерения.

Заключение. В настоящей работе предложен новый метод измерения высоты до морской поверхности в условиях тумана и сильной дымки. Разработана структурная схема всепогодного импульсного лазерного высотомера малых высот до морской поверхности, обеспечивающая измерение дистанции как в чистой атмосфере, так и в условиях дымки и тумана.

Проведенный анализ способности обнаружения показал, что в условиях тумана и дымки можно осуществлять измерение высот до морской поверхности в диапазоне 10–70 м. Анализ погрешностей измерения показал, что для вероятности ложной тревоги 10^{-4} на высотах от 10 до 40 м и мощности излучения в импульсе 50 Вт средняя квадратичная погрешность измерения определяется главным образом шумовой составляющей: при использовании лавинных фотодиодов не превышает $\pm 2,2$ м, при применении современных фотодиодов – $\pm 2,4$ м.

Литература

1. Лебедько Е.Г., Покровский Ю.П., Порфирьев Л.Ф., Симовский Р.А., Иванов В.И. Вероятностные характеристики отражения импульсных сигналов от взволнованной водной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. – 1976. – Т. 19. – № 6. – С. 109–113.
2. Нгуен Д.Т., Нгуен В., Лебедько Е.Г. Особенности проектирования бортового импульсного лазерного высотомера до морской поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 9. – С. 745–750.
3. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигналов. – М.: Сов радио, 1970. – 334 с.
4. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации. Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2014. – 368 с.
5. Лебедько Е.Г., Порфирьев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. – Л.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
6. Абрамовица М., Стигана И. Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. – 548 с.

**Пихота Нина Сергеевна**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В4108Направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника

e-mail: pihota1997@yandex.ru

**Коняхин Игорь Алексеевич**

Год рождения: 1953

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
д.т.н., профессор

e-mail: igor@grv.ifmo.ru

УДК 681.7.08

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ АНАМОРФОТНОГО КОМПОНЕНТА****Пихота Н.С.****Научный руководитель – д.т.н., профессор Коняхин И.А.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 617031 «Исследование и разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

В настоящее время оптоэлектронные углоизмерительные приборы широко используются для измерения угловых и линейных перемещений. Их преимуществом является высокая точность результатов благодаря автоматизированному процессу получения измеренных значений. В работе обсуждался новый метод измерения угла скручивания протяженных объектов в условиях ограничения поперечного габарита оптического тракта с использованием автоколлиматора с отражателем в виде комбинации анаморфотной системы и ретрорефлектора.

Ключевые слова: анаморфотная призма, автоколлиматор, измерение угла скручивания, ретрорефлектор, радиотелескоп.

Для решения многих прикладных задач необходим контроль изменения углового положения объектов относительно изначальных значений. Контрольно-измерительная аппаратура необходима для контроля геометрических параметров элементов и их пространственного положения, измерения деформации отдельных элементов и конструкции в целом. Бесконтактные оптоэлектронные средства измерения являются наиболее эффективными для этих целей, благодаря отсутствию необходимости поддержания электронной связи в точке контроля [1].

Угловая пространственная ориентация тестируемого объекта определяется тремя координатами. К ним относятся угол скручивания (угол поворота относительно линии обзора объекта) и коллимационные углы. Для бесконтактного измерения углов используется автоколлиматор. Его преимущество состоит в высокой точности получаемых результатов, благодаря автоматизированному процессу снятия отсчета, а также высокой чувствительности автоколлимационного метода к незначительным поворотам контрольного элемента. Контрольный элемент располагается в точке наибольших деформаций и может представлять собой комбинацию оптических элементов, способных вернуть луч обратно в объектив

автоколлиматора. Контрольный элемент действует как преобразователь углов поворота контролируемого объекта в угловые отклонения отраженных пучков [2].

Выходя из объектива автоколлиматора, пучок лучей будет параллелен оптической оси. Для измерения угла скручивания протяженных объектов в условиях ограничения поперечного габарита оптического тракта необходимо использовать контрольный элемент, который позволит сохранить параллельность осей пучка автоколлиматора и отраженного пучка.

Перспективно использовать измерительную систему для определения значения угла скручивания, которая основана на трансформации оптических изображений, а именно, явлении анаморфирования [3]. Контрольный элемент состоит из ретрорефлектора и установленного перед ним по ходу луча телескопического анаморфотного компонента. Анаморфотный компонент расширяет или сжимает падающий коллимированный пучок в меридиональной плоскости. В результате масштаб формируемого изображения изменяется (увеличивается или уменьшается) вдоль одной из осей. Преимуществами использования контрольного элемента, состоящего из комбинации анаморфотного компонента и ретрорефлектора, являются малые поперечные габариты оптических элементов и возможность работы при переменной дистанции, что является следствием параллельности осей падающего и отраженного от контрольного элемента пучков.

Фактически, большинство преломляющих призм производят некоторое изменение увеличения поперечного размера между входным и выходным пучком. Проблема состоит в том, чтобы определить требуемую величину увеличения и выбрать направление выходного пучка для предполагаемого применения.

Клиновидная призма обычно имеет угол вершины от 2 до 20° и часто используется для управления лучом. Если одна поверхность призмы имеет отражающее покрытие, то может быть создан тонкий анаморфотный расширитель луча (рис. 1, а). Понятно, что любую призму, предназначенную для анаморфотного сжатия, можно использовать в качестве расширителя путем изменения направления ввода пучка на обратное. Однако выходной луч в этом случае ортогонален входному лучу, следовательно, данный вид призмы не подходит для использования в качестве анаморфотного компонента в автоколлимационной системе измерения угла скручивания протяженного объекта в условиях ограничения поперечного габарита оптического тракта.

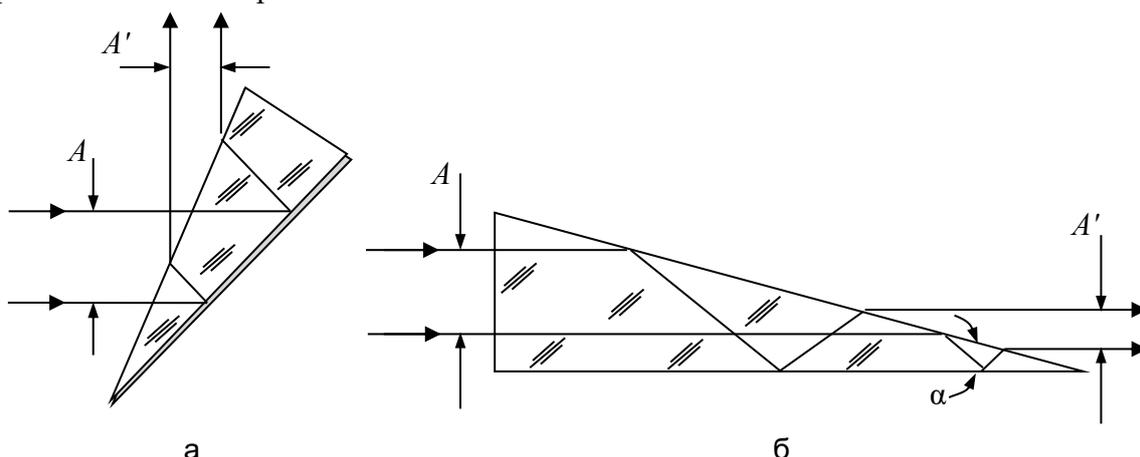


Рис. 1. Клиновидная призма с отражающим покрытием (а); призма, сжимающая пучок, с соосным выходом (б)

На рис. 1, б, представлена призма, сжимающая пучок, с соосным выходом. Проходя через призму, пучок испытывает два преломления и два внутренних отражения. Расчетными параметрами являются: угол вершины α , коэффициент преломления призмы n и коэффициент сжатия пучка $MAG = \frac{A'}{A}$, где A – размер входного пучка; A' – размер выходного пучка. Проблема использования такой призмы состоит в трудоемкости изготовления, так как для

получения необходимого увеличения MAG потребуется использовать призму с нестандартным показателем преломления n и, соответственно, необходима варка специального стекла.

Удобный метод для получения переменного увеличения MAG состоит в использовании пары идентичных призм с воздушным зазором (рис. 2). Изменяя углы наклона призм φ_a и φ_b можно варьировать анаморфтное увеличение MAG от $2\times$ до $6\times$. Обычно используются призмы с антиотражающим покрытием.

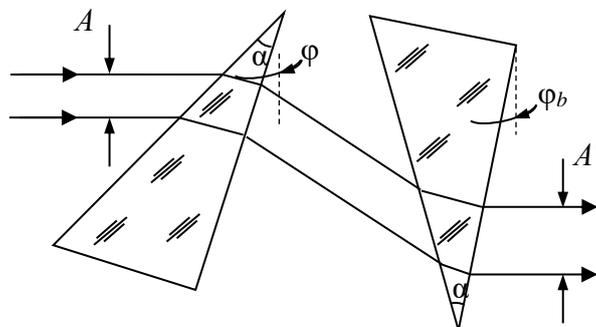


Рис. 2. Анаморфтная система на основе идентичных призм с воздушным зазором

Таким образом, для измерения угла скручивания протяженных объектов в условиях ограничения поперечного габарита оптического тракта эффективнее всего будет использование оптико-электронного углоизмерительного средства с автоколлиматором благодаря его автоматизации и высокой чувствительности системы к незначительным поворотам контрольного элемента. В качестве контрольного элемента предлагается использование комбинации ретрорефлектора и анаморфтной пары клиновидных призм, преимуществами которой являются малые поперечные габариты оптических элементов и возможность работы при переменной дистанции в условиях ограничения поперечного габарита оптического тракта автоколлиматор-отражатель.

Литература

1. Merson A.D., Konyakhin I.A. Investigation of the possibility of constructing a three-coordinate anamorphic system for measuring the parameters of angular spatial orientation // Journal of Optical Technology. – 2009. – № 76(10). – P. 23–25.
2. Konyakhin I., Timofeev A., Usik A., Zhukov D. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope // Proc. SPIE. – 2011. – № 8082. – P. 80823R.
3. Vanderwerf D. Applied prismatic and reflective optics. – Bellingham&Washington SPIE Press monograph, 2010. – 303 p.



Поскребышева Ольга Олеговна

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В4280

Направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика

e-mail: olgaposkrebysheva211@gmail.com



Лекус Елена Юрьевна

Год рождения: 1976

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

e-mail: e.Lekus@corp.ifmo.ru

УДК 159.937.523

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТА НА ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ
ИНТЕРЬЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА**

Поскребышева О.О.

Научный руководитель – к.культур.н. Лекус Е.Ю.

В работе проведен поиск способов установления и описания взаимосвязи распределения света в интерьерном пространстве и эмоционального восприятия этого помещения человеком. Для достижения поставленной цели были проанализированы зарубежные исследования в данной сфере, и проведен предварительный эксперимент по определению статичных параметров для дальнейших экспериментов.

Ключевые слова: эмоциональное восприятие, атмосфера, освещение, цветовая температура, яркость.

Широкий спектр характеристик освещения, доступных при проектировании, требует всестороннего и качественного понимания того, какое воздействие на эмоциональное восприятие пространства человеком будет оказывать выбираемый тип освещения.

Освещение обладает различными характеристиками, которые можно представить в виде трех групп: свойства источников света, свойства светового потока и свойства взаимодействия света со средой. Понимание оказываемого освещением воздействия формируется из знаний о том, какое влияние оказывает каждая отдельная характеристика в каждой из трех указанных групп.

В работе было принято решение остановиться на изучении распределения света в пространстве как характеристике освещения, описываемой через свойства и источника света, и светового потока, и взаимодействия света со средой.

При этом важно отметить отсутствие экспериментально подтвержденных закономерностей между распределением света в пространстве и эмоциональным восприятием пространства человеком.

В английской литературе для описания эмоционального восприятия пространства используются термины «perceived atmosphere», «spatial atmosphere», «emotional perception», которые в русском языке не имеют общепотребительного эквивалента. Иначе говоря, в отечественной профессиональной лексике не существует четкой дефиниции этого понятия, что, в свою очередь, сказывается на качестве диалога между специалистами смежных со световым дизайном областей, между заказчиком и дизайнером, а также создает определенные трудности при проектировании новой среды и оценке качеств уже существующей.

Как следствие, при отсутствии конкретного устоявшегося понятия отсутствует и терминология, позволяющая описывать эмоциональное восприятие пространства общепринятым образом и проводить сопоставления с данными из англоязычной научной литературы.

В работе представлена попытка нахождения способов установления и описания взаимосвязи распределения света в интерьере и эмоционального восприятия этого помещения человеком.

В последнее время в сфере светового проектирования уделяется особое внимание проблеме изучения характера воздействия освещения на человека.

Влияние света на эмоциональное восприятие пространства, и, в частности, интерьера – это одно из активно развивающихся сегодня направлений исследований. Это обусловлено тем, что люди сейчас значительную часть суток проводят в среде с искусственным освещением, которое становится все разнообразнее, как с точки зрения спектральных характеристик, так и с точки зрения композиции. Тот факт, что свет, как правило, или заполняет все пространство интерьера, или акцентирует отдельные его участки и элементы, позволяет говорить о возможном значительном воздействии света на эмоциональное восприятие пространства, наряду с функциональным назначением помещения, интерьером и его цветовой гаммой. Причем в зарубежных исследованиях данный вопрос изучается довольно давно, с все возрастающей активностью, в то время как среди отечественных работ эта тема только начинает развиваться. Как и в любой области, требующей описания и изучения, в данном направлении в англоязычной среде был сформирован ряд специальных понятий и терминов, который, однако, не имеет распространения и адаптации в русском языке.

При этом исследование эмоционального восприятия носит качественный характер и предполагает работу с субъективными данными, получаемыми в процессе беседы с респондентами или в ходе анкетирования. Поэтому для проведения подобных исследований в русскоязычной среде представляется актуальной разработка отечественной профессиональной терминологии в данной области или корректное заимствование уже существующей терминологии из английского языка. Положительным моментом адаптации англоязычной терминологии к русскому языку является возможность в дальнейшем сопоставлять результаты зарубежных и отечественных исследований эмоционального восприятия пространства человеком.

Tim Edensor [1] использует термин «atmosphere» для описания эмоционального восприятия пространства человеком. Данное понятие в английском языке имеет также определение «характер, чувство, или настроение места или ситуации».

Если рассматривать эмоциональное восприятие пространства, то оно формируется под влиянием внутренних (субъективных или личностных) и внешних (объективных) факторов, последние из которых могут быть как природного, так и антропогенного характера. Однако понятие «эмоционального восприятия» подразумевает фокусировку внимания только на человеке и самом процессе его субъективного восприятия среды, т.е. преимущественно на внутренних факторах. В то же время, если рассматривать само пространство через призму этих двух категорий факторов, то использование понятия «atmosphere», т.е. «атмосфера пространства» представляется целесообразным и обоснованным, поскольку оно позволяет фокусировать внимание на среде и одновременно на ее субъективном восприятии человеком. Таким образом, данное понятие наиболее полно описывает свойства среды, воспринимаемой человеком.

Для понятия «atmosphere» Vogels [2] были выведены термины, которые определяют характеристики данного понятия как для интерьера, так и для экстерьера. Эта терминология не ориентирована именно на световую среду, но в одной из работ De Vries and Vogels экспериментально доказали связь освещения и описываемого восприятия.

Тот же термин применяется M. Stokkermans [3], T.A.M. van Eyr [4] в научных работах, посвященных изучению эмоционального восприятия интерьерного пространства и его взаимосвязи с характером освещения.

В связи с широкой распространенностью и высокой степенью корректности данной терминологии она была выбрана для перевода на русский язык с целью использования в анкетах, которые будут предложены респондентам во время экспериментов, проводимых автором данной работы с целью установления взаимосвязи между распределением света в интерьере и эмоциональным восприятием данного помещения.

Влияние внешних и внутренних факторов на воспринимаемую атмосферу происходит следующим образом. Внешние – объективные – факторы формируют атмосферу места, ими можно управлять. Однако восприниматься одна и та же атмосфера разными людьми будет по-разному, поскольку именно субъективные или внутренние, личностные факторы определяют конечное эмоциональное восприятие и оценку.

Атмосфера места – это его комплексная характеристика, складывающаяся из совокупности множества составляющих: размеров помещения, его заполненности различными объектами, освещенности, звуков, происходящих в нем действий, и т.д., а также особенности субъективного восприятия пространства и субъективного опыта. Большое количество элементов, участвующих в формировании атмосферы места, предполагает выделение наиболее существенных из них для решения проблемы, обозначенной в данной работе – описания эмоционального восприятия пространства.

Среди внешних факторов, формирующих атмосферу, наиболее распространенными и оказывающими наибольшее воздействие на эмоциональное восприятие пространства человеком являются следующие: время суток, климат, погода, образ места, функции места, происходящие в нем события и действия, геометрия пространства, спектральные характеристики, распределение света. По такому же признаку – наибольшей распространенности и силе влияния – можно выделить ряд внутренних факторов: физические и общекультурные особенности восприятия, личный опыт, ожидания, настроение, физические ощущения, взаимодействия с другими людьми, возраст.

Как уже говорилось ранее, особенность внутренних, субъективных факторов заключается в том, что проектировщик не способен изменить их, он может только их учитывать при проектировании световой среды. Поэтому для изучения воздействия освещения на атмосферу и ее эмоциональное восприятие были выбраны три таких фактора – общекультурные особенности восприятия, личный опыт и возраст. На их основе можно выделить четыре социальные группы, между которыми предполагается возможность различия в восприятии атмосферы интерьера. В данном случае общекультурные особенности восприятия выступают как константа, поскольку в данном исследовании были задействованы представители Российской Федерации. Отметим, что существует аналогичный зарубежный опыт. Так, например, в исследовании Х.У. Liu [5] сравнивались особенности эмоционального восприятия пространства голландцев и китайцев. Результат исследования показал различия в предпочтениях цветовой температуры освещения, что позволяет обозначить общекультурные особенности восприятия как важный фактор, влияющий на формирование атмосферы.

Таким образом, четыре выделенные группы выглядят следующим образом. Первая группа: профессиональная деятельность связана с дизайном, искусством или разработкой освещения; возраст 18–25 лет, студент. Вторая группа: профессиональная деятельность связана с дизайном, искусством или разработкой освещения; возраст 26 и более лет, работает. Третья группа: профессиональная деятельность не имеет связей с дизайном, искусством или разработкой освещения; возраст 18–25 лет, студент. И четвертая группа: профессиональная деятельность не имеет связей с дизайном, искусством или разработкой освещения; возраст 26 и более лет, работает.

Данное разделение по социальным группам позволит проверить наличие различий в эмоциональном восприятии освещения между людьми разного возраста, а также установить корреляцию между профессиональной деятельностью в сфере дизайна и особенностями эмоционального восприятия.

Взаимосвязь освещения и создаваемой им атмосферы сейчас активно изучается в направлении спектральных характеристик света. Причем, как правило, в каждой отдельной работе рассматривается комплекс из 2–3-х совместно действующих характеристик. Среди них можно выделить в первую очередь цветовую температуру и яркость, как свойства, присущие практически любому источнику света. Возможно, это же является причиной, по которой они нередко изучаются в паре. Кроме того, исследуется спектральный состав света и интенсивность, сравнивается направленный и рассеянный свет, а также рассматривается динамичное изменение тех или иных параметров освещения.

В то же время такое свойство освещения, как распределения света в пространстве, чаще всего рассматривается с точки зрения воздействия на восприятие пространственных характеристик освещения. Скорее всего, это обусловлено тем фактом, что спектральные характеристики описывают весь свет, заполняющий пространство, и таким образом, не привязаны к четкой структуре. В то время как распределение света в пространстве достаточно жестко привязано к геометрии самого помещения, и таким образом, само по себе ближе к пространственным свойствам интерьера. Помимо этого, распределение света в пространстве рассматривается при изучении поведения человека, его реакций и управления его вниманием, что также тесно связано с геометрической составляющей пространства.

Такое положение вещей делает интересным рассмотрение распределения света в пространстве с точки зрения его влияния на атмосферу в помещении. Поэтому из внешних факторов, формирующих атмосферу, были выделены: спектральный состав и геометрия помещения – как статичные, но важные для оценки результатов исследования параметры освещения. В качестве же изменяемой в экспериментах характеристики взято именно распределения света в пространстве.

Если рассматривать само распределение света в пространстве более детально, то следует сказать, что эта характеристика освещения комплексно формируется из расположения источников света, направлением и конфигурацией светового потока, создаваемой композицией освещенных зон.

Также важно отметить, что для изучения распределения света, в процессе эксперимента требуется устанавливать статичные спектральные характеристики освещения, которые при этом, в свою очередь, оказывают влияние на эмоциональное восприятие пространства. Поэтому для получения наиболее чистого результата эксперимента необходимо подобрать такие значения спектральных характеристик, при которых создаваемое ими освещение будет наиболее эмоционально нейтральным. Таким образом, результаты эксперимента будут в большей степени зависеть от изменяемых параметров – распределения света в пространстве, и в меньшей – от статичных.

Цветовая температура и яркость были выбраны как присущие любым источникам света. Для определения их значений, при которых освещение было бы наиболее нейтральным, был проведен эксперимент. В качестве нейтрального здесь принимается освещение, наименее нагруженное образной составляющей.

Также для уменьшения эффекта воздействия на атмосферу неизучаемых факторов, для проведения эксперимента было выбрано небольшое помещение площадью 9 м² с белыми стенами и потолком, с закрытым окном, через который практически не проникал естественный свет и с минимальной обстановкой. Такое помещение практически лишено элементов, придающих ему образную и эмоциональную нагрузку.

В ходе эксперимента респондентам демонстрировалось 8 сценариев освещения, с разной цветовой температурой и яркостью источника. Всего было использовано 4 значения цветовой температуры: 2700, 3100, 4000 и 5000 К. Яркость источника была представлена двумя значениями: 3600 и 6200 кд/м². Респондентам предоставили по 8 одинаковых бланков анкет, которые они заполняли во время каждого сценария, свободно перемещаясь по комнате. При смене сценариев респондентам было предложено закрывать глаза, чтобы уменьшить эффект

сравнивания и в то же время избежать необходимости каждый раз покидать помещение и заходить в него вновь.

Бланки анкет содержали 10 пар слов с противоположной образной окраской. Респондентам предлагалось выбрать, какому слову из пары больше соответствует атмосфера в помещении, причем степень соответствия была представлена в виде шкалы с пятью делениями. Таким образом, предполагалось, что выбор третьего деления соответствует нейтральному значению в пределах каждой пары понятий.

В результате эксперимента было установлено, что наиболее нейтральным оказался сценарий освещения с цветовой температурой 3100 К и яркостью источника 3600 кд/м².

По результатам данного исследования нет возможности установить именно атмосферу в помещении при выбранном типе освещения, так как анкета составлена из понятий, позволяющих выявить нейтральность за счет образов, но при этом не позволяющих дать эмоциональную оценку пространства и освещения. Это было сделано по двум причинам: во-первых, образные ассоциации могут дать более точный результат при поиске освещения, наименее нагруженного образной составляющей; во-вторых, те же респонденты, которые участвовали в данном эксперименте, будут приглашены к участию в следующем, и таким образом, новый список терминов исключит возможности ассоциации сценариев освещения из второго эксперимента с условиями первого.

Данная работа является начальным этапом исследования влияния распределения света в пространстве на эмоциональное восприятие интерьера. На этом этапе были определены понятие «атмосфера», как наиболее соответствующее теме работы, и специальная терминология, которая также была переведена на русский язык. Это позволяет составить бланк анкеты для проведения серии основных экспериментов в дальнейшем таким образом, чтобы полученные результаты можно было корректно систематизировать и сравнивать с англоязычными исследованиями.

Также были экспериментально определены значения цветовой температуры и яркости источника, которые будут выставлены в статичном состоянии у источников света, используемых в дальнейших экспериментах.

Таким образом, следующими шагами исследования будет проведение ряда основных экспериментов по выявлению взаимосвязи распределения света и эмоционального восприятия пространства.

Литература

1. Edensor T. Light design and atmosphere // *Visual Communication*. – 2015. – V. 14(3). – P. 331–350.
2. Vogels I. Atmosphere Metrics // *Probing Experience: From Assessment of User Emotions and Behaviour to Development of Products*. – 2008. – P. 25–41.
3. Stokkermans M., Vogels I., Kort Y., Heynderickx I. Relation between the perceived atmosphere of a lit environment and perceptual attributes of light // *Lighting Res. Technol.* – 2017. – P. 1–15.
4. Van Erp T.A.M. The effects of lighting characteristics on atmosphere perception [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.518.7252&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 06.01.2019).
5. Liu X.Y., Luo M.R., Li H. A study of atmosphere perceptions in a living room // *Lighting Res. Technol.* – 2014. – P. 1–14.

**Святлович Екатерина Владимировна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
студент группы № В4280Направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика

e-mail: svyatlovich.ekaterina@gmail.com

**Лекус Елена Юрьевна**

Год рождения: 1976

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,

к.культур.н., доцент

e-mail: e.Lekus@corp.ifmo.ru

УДК 535-5**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ
ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ СООТНОШЕНИИ ЯРКОСТЕЙ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ****Святлович Е.В.****Научный руководитель – к.культур.н. Лекус Е.Ю.**

В работе рассмотрено влияние различных соотношений яркости в первичном, вторичном и третичном поле зрения при изменяющихся условиях освещения рабочего пространства (естественный, искусственный и комбинированный свет) на работоспособность человека. Исследование осуществлялось при помощи измерения яркости и освещенности, а также тестирования контрольной группы. После обработки полученных данных были сделаны выводы об условиях, которые сравнительно наилучшим образом подходят для условий рабочего освещения в офисе.

Ключевые слова: естественное освещение, работоспособность, офисные пространства, усталость, поле зрения, соотношение яркостей.

Современный человек проводит на работе от 8 до 12 ч в сутки. В настоящее время более 50% рабочих мест – это различные вариации офисных пространств [1]. В них люди выполняют задачи разного типа, такие как телефонные и личные переговоры, ведение письменных записей, устные собеседования и другие. На сегодняшний день наиболее распространенная офисная трудовая активность – работа за компьютером [2]. Этот вид деятельности у многих сотрудников офисов занимает большую часть рабочего времени. Растущая многозадачность, требования к высокой оперативности выполняемых работ, увеличение информационных потоков в совокупности приводят к ухудшению психоэмоционального состояния человека, в свою очередь ведущее к снижению работоспособности [3].

В большинстве случаев, при спаде рабочей деятельности сотрудника, руководители стремятся различными способами исправить данную ситуацию – при помощи мотивационных или же взыскательных методов. Однако чаще всего работодатели борются не с причиной возникновения усталости, а с ее последствиями.

Тем не менее, существуют примеры прогрессивных компаний, которые решают проблему «изнутри» различными способами, в том числе экспериментируют с интерьерными решениями кабинетов и обустраивают релаксационные пространства, способные расслабить сотрудников после трудового дня [4].

Так, в сентябре 2011 года корпорации Google и Facebook пошли навстречу своим сотрудникам, жаловавшимся на проблемы с позвоночником из-за сидячей работы, и предложили им трудиться стоя. Решением стали высокие столы, переносящие монитор на уровень глаз, а для тех, кого утомлял восьмичасовой день, проведенный на ногах, были спроектированы табуреты формата барных стульев [5]. Альтернативный метод организации рабочего помещения представила компания Philips, сделавшая упор не на изменение рабочего места, а на иной взгляд сотрудника на существующее пространство – каждый получил возможность выбрать рабочее место в зависимости от планов на день. В ходе этого эксперимента офис был поделен на зоны для индивидуальной и совместной работы, отдыха, встреч и совещаний, где каждая рабочая область обладала уникальным дизайном и световым решением [6]. Бизнес-школа «Сколково» пошла дальше, возведя в здании «живую стену» для большего поступления кислорода в офисное пространство, поскольку исследования доказали, что биофильный дизайн на рабочем месте повышает работоспособность и комфортное состояние сотрудников [7].

Согласно исследованиям американских ученых, на продуктивность работников влияет целый набор параметров офисного пространства. Например, в США был выявлен «синдром больного здания» – комплекс архитектурных проблем, связанных с вентиляцией, акустикой, дневным освещением, электрикой и влажностью. Эти данные побудили исследователей заняться выявлением и устранением существующих проблем, а также составлением рекомендаций для офисной архитектуры в будущем [8].

Вследствие этого альтернативным способом решения проблемы снижения продуктивности является фокусировка на физических параметрах пространства, а не на изменении рабочей зоны. Следует отметить, что рассмотрение всех факторов одновременно (вентиляция, акустика, дневное освещение, электрика, влажность) не может вести к объективной оценке ситуации снижения уровня продуктивности в целом. Причина – взаимосвязь элементов и влияние их друг на друга. Поэтому первым шагом в решении рассматриваемой проблематики является отдельное изучение каждого из этих параметров для их дальнейшей оптимальной комбинации.

Исследование предполагает нахождение причины изменений, которая, согласно гипотезе, кроется в нарушении баланса естественного и искусственного освещения. В связи с экологическими проблемами в мире стоит вопрос о том, как уменьшить потребление энергии в системе освещения, в то же время исследования естественного света дали основание использовать его как один из методов повышения энергоэффективности, широко применяемого в архитектуре. Однако рассматривая естественное освещение, авторы говорят не только о его использовании в целях экономии энергетических затрат, но и о функции регулирования психоэмоционального состояния человека. Солнечный свет – ресурс, который является для человека самовосполняемой энергией извне, его можно использовать как автономно, так и комбинируя с искусственным освещением.

Наиболее распространенное определение качества офисного освещения (как естественного, так и искусственного) – оценка показателей путем измерения средней горизонтальной освещенности на столе [9]. Эта метрика была разработана в то время, когда типичной офисной задачей было аналоговое чтение или письмо. Однако в компьютеризированных офисах наиболее распространенной визуальной задачей сейчас является просмотр вертикально-установленного самосветящегося экрана, что кардинально меняет зрительную задачу работника [10]. Это, в свою очередь, ведет к изменению поля зрения, а также неконтролируемым соотношениям по яркости между горизонтальной поверхностью и вертикальной, что оказывает влияние на работоспособность в зависимости от конфигурации помещения и расположения рабочего стола в пространстве офиса. В случае наличия оконных проемов естественный свет также играет существенную роль, влияя на эффективность работы.

На сегодняшний день многие европейские страны стремятся к внедрению естественного света в рабочую среду [11]. Однако чаще всего подобными исследованиями занимаются города, в которых количество естественного света значительно больше, по сравнению с теми городами, которые находятся в северном полушарии, например, такими как Санкт-Петербург [12]. Северная столица является единственным в своем роде городом-миллионником, находящемся в природно-климатических условиях с пониженным уровнем поступления естественного света [13]. Здесь, также как и по всему миру, растет тенденция строительства рабочих пространств, имеющих панорамное остекление, увеличивающее поступление солнечных лучей внутрь [14]. Но согласно статистике, в Петербурге количество солнечных дней в году колеблется между 31 и 62, что зачастую увеличивает использование искусственного освещения в дневное время в сочетании с естественным. В связи с этим важно понять, способно ли данное архитектурное решение обеспечить достаточное для полноценной деятельности поступление естественного света, ведет ли это к увеличению концентрации работников, а в итоге, и к позитивному изменению их психоэмоционального состояния и продуктивности [15].

В своем исследовании авторы поднимают вопросы прямой зависимости между количеством поступающего на рабочее место естественного света, его соотношения по яркости поля зрения с искусственным светом и продуктивностью работы человека. В ходе исследования стояли задачи рассмотрения конкретных рабочих пространств, типичных для офисной деятельности в Санкт-Петербурге, измерение их световых характеристик с помощью спектроколориметра. На основании этого была выявлена зависимость между коэффициентом естественного освещения в офисных помещениях и динамикой изменения продуктивности работы испытуемых.

Использование рабочих тестов обусловлено наглядным результатом эксперимента – стандартизированным по объему, времени и условиям выполнения рабочих заданий, представляющего собой по содержанию отдельные элементы рабочей деятельности. В эксперименте применяется методика Шульте, которая была выбрана по причине ее универсальности для обследования лиц разных возрастов, а также популярности и объективности ее использования для определения устойчивости внимания и динамики работоспособности.

Методика «Таблицы Шульте» позволяет определить устойчивость внимания и динамику работоспособности.

Эффективность работы (ЭР) вычисляется по формуле:

$$\text{ЭР} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5) / 5,$$

где T_i – время работы с i -ой таблицей.

«Кривая истощаемости (утомляемости)» показывает устойчивость внимания и динамику работоспособности. Чем меньше колебания построенного графика, тем выше устойчивость внимания. Если колебания графика высокие, человеку сложно долго концентрировать внимание на чем-то одном, он будет чаще отвлекаться или допускать ошибки.

Степень вработываемости (ВР) вычисляется по формуле:

$$\text{ВР} = T_1 / \text{ЭР}.$$

Результат меньше 1,0 – показатель хорошей вработываемости, соответственно, чем выше 1,0 данный показатель, тем больше испытуемому требуется подготовка к основной работе.

Психическая устойчивость (выносливость) вычисляется по формуле:

$$\text{ПУ} = T_4 / \text{ЭР}.$$

Показатель результата меньше 1,0 говорит о хорошей психической устойчивости, соответственно, чем выше данный показатель, тем хуже психическая устойчивость испытуемого к выполнению заданий.

Для статистической обработки зависимой выборки (зависимые выборки содержат результаты, полученные на одной и той же группе испытуемых, но в разные моменты времени) используется T -критерий Вилкоксона, который применяется для сопоставления показателей,

измеренных в двух разных условиях на одной и той же выборке испытуемых. Он позволяет установить не только направленность изменений, но и их выраженность: является ли сдвиг показателей в каком-то одном направлении более интенсивным, чем в другом.

Целью проводимого эксперимента являлось определение устойчивости внимания и динамики работоспособности человека в зависимости от различных яркостных соотношений в поле зрения, либо для зданий с большим количеством естественного освещения. Для ее достижения был поставлен ряд задач, таких как:

- измерение яркости и освещенности естественного, искусственного и комбинированного освещения для первичного, вторичного и третичного поля зрения в экспериментальном пространстве;
- соотнесение полученных результатов с нормативными документами (СП и МКО) и тестирование фокус-группы на предмет работоспособности в условиях различных соотношений яркости в поле зрения.

Описание эксперимента. Участниками эксперимента были волонтеры – мужчины и женщины в возрасте от 18 до 30 лет, студенты Университета ИТМО. Общее количество испытуемых составило 10 человек. Все испытуемые подписали добровольное согласие на участие в исследовании. Эксперимент проходил в лаборатории, общий метраж которой 18 м². Аудитория имеет один источник поступления естественного света – вертикальный светопроем (его площадь составляет около 30% стены).

Для измерения экспериментальных данных освещенности и яркости был использован спектроколориметр ТКА-ВД/02. С помощью таблиц Шульте было проведено тестирование на выявление концентрации внимания.

Стимулами, воздействующими на испытуемых в данное исследование, были естественное освещение, поступающее через окно и искусственное (4 встраиваемых светильника, имеющих размеры 60×60 см, на 6 люминесцентных лампах) (рис. 1).

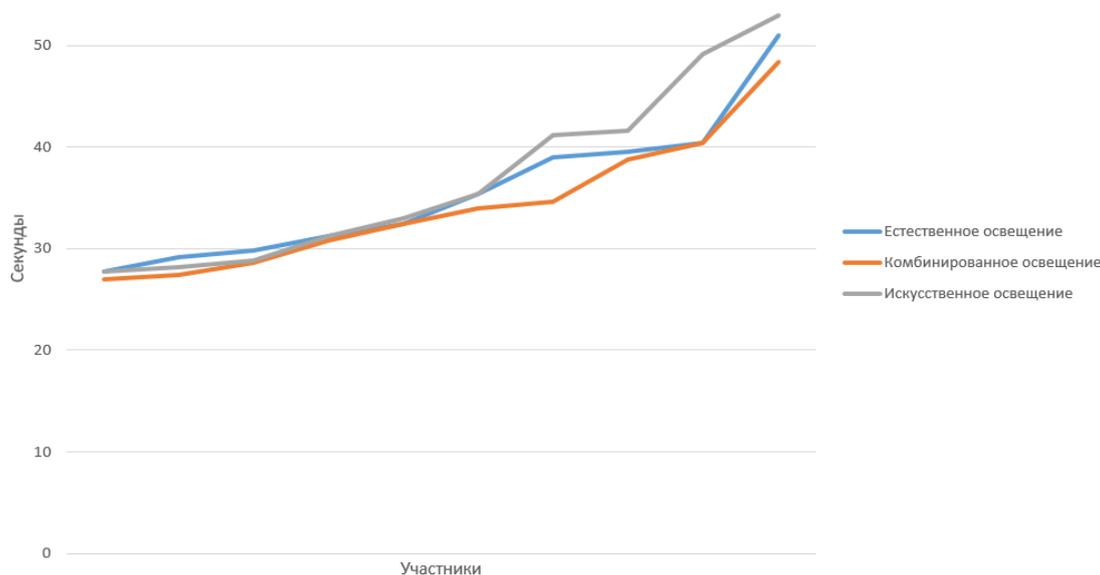


Рис. 1. График кривой истощаемости по результатам эффективности работы

Последовательность проведения эксперимента пошагово заключалась в том, что каждый участник решал задание теста на выявление концентрации при разных типах освещения (естественное, искусственное, комбинированное). Данное тестирование проводилось во временной промежуток между 15:00 и 16:00.

Степень вработываемости. С уменьшением количества естественного света уменьшается степень вработываемости человека в представленную задачу (рис. 2).

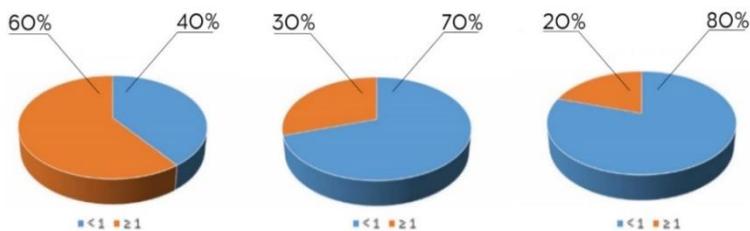


Рис. 2. Сравнительные диаграммы результатов степени вработываемости

Психическая устойчивость. Наивысшая психическая устойчивость отмечается в условиях комбинированного освещения (рис. 3).

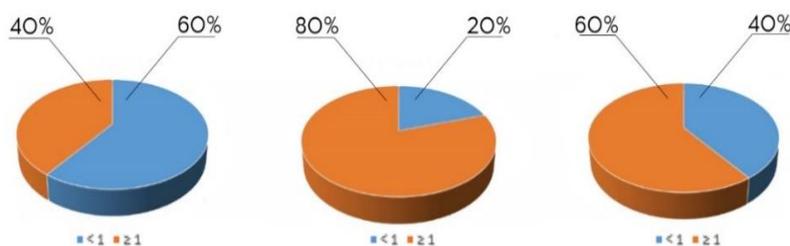


Рис. 3. Диаграммы результатов психической устойчивости

Анализ по критерию Вилкоксона выявил существенную разницу между воздействием комбинированного освещения и в чистом виде естественного, искусственного на эффективную работу испытуемых. Соответственно, опираясь на предыдущие исследования в области естественного освещения, можно предположить, что правильная комбинация естественного и искусственного освещения в определенных полях зрения повышает работоспособность человека в офисном пространстве.

Сравнение воздействия по критерию Вилкоксона естественного, комбинированного и искусственного освещения на эффективную работу испытуемых по методу Шульте выявило, что показатели комбинированного освещения не превышают значений естественного и искусственного, что подтверждает гипотезу исследования.

Эксперимент подтвердил, что значимые составляющие работоспособности (такие как уровни усталости, вработываемости и психической устойчивости) связаны со зрительным дискомфортом. Ввиду изменения вида работы с информацией, предполагающей использование вертикальных поверхностей, в дальнейшем исследовании будет рассмотрена система освещения иного метода расчета и коллаборации естественного света с искусственным (использование датчиков, рассчитывающих светотехнические параметры в первичном, вторичном и третичном полях зрения, учитывающих соотношение яркостей на горизонтальной и вертикальной плоскостях).

Полученные данные могут быть рассмотрены как основание для составления рекомендаций для архитекторов при проектировании бизнес-центров, коворкингов и иных офисных пространств.

Литература

1. Teicholz E. Technology for Facility Managers: The Impact of Cutting-Edge Technology on Facility Management // International Facilities Management Association (IFMA). – 2019. – P. 191–228.
2. Vimalanathan K., Babu R. The effect of indoor office environment on the work performance, health and well-being of office workers // Journal of Environmental Health Science & Engineering. – 2014. – V. 12. – P. 113.
3. Haynes B.P. The impact of office layout on productivity // Journal of Facilities Management. – 2008. – V. 6(3). – P. 189–201.

4. Организация рабочего места и мотивация сотрудников в офисе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compline-ufa.ru/ergonomika-ofisa> (дата обращения: 16.10.2018).
5. Работа за компьютером стоя в компании Facebook и Google [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ergostol.ru/blog/rabota-za-kompyuterom-stoya-v-kompanii-facebook-i-google/> (дата обращения: 16.10.2018).
6. Необычный офис компании Philips: без определенного места работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://loveorium.ru/arxitektura/ofis-kompanii-philips.html> (дата обращения: 16.10.2018).
7. Sanchez J.A., Ikaga T., Sanchez S.V. Quantitative improvement in workplace performance through biophilic design: A pilot experiment case study // *Energy & Buildings*. – 2018. – V. 177. – P. 316–328.
8. Heschong L. Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment (Technical Report) // California Energy Commission. – 2003. – P. 2–4.
9. Chraibi S., Crommentuijn L., Rosemann A. Influence of wall luminance and uniformity on preferred task illuminance // *Building and Environment*. – 2017. – P. 24–35.
10. Dogan T., Park Y.C. A critical review of daylighting metrics for residential architecture and a new metric for cold and temperate climates // *Lighting Res. Technol.* – 2019. – V. 51. – P. 206–230.
11. Bunjongjit S., Ngaopitakkul A. Feasibility Study and Impact of Daylight on Illumination Control for Energy-Saving Lighting Systems // *Sustainability*. – 2018. – V. 10(11). – P. 4075.
12. Ergan S., Radwan A., Zou Z., Tseng H.A., Han X. Quantifying Human Experience in Architectural Spaces with Integrated Virtual Reality and Body Sensor Networks // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2018. – V. 33(2). – P. 04018062.
13. Список самых северных поселений в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_самых_северных_поселений_в_мире (дата обращения: 22.10.2018).
14. Vogler A., Jorgensen J. Windows to the World, Doors to Space: The Psychology of Space Architecture // *Leonardo Music Journal*. – 2006. – V. 38(5). – P. 390–399.
15. Климат Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.online812.ru/2009/12/04/014/pda.html> (дата обращения: 20.10.2018).

**Снетков Пётр Петрович**

Год рождения: 1990

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
аспирантНаправление подготовки: 18.06.01 – Химические технологии

e-mail: ppsnetkov@corp.ifmo.ru

Нигматуллина Рамиля Ильнуровна

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики, студент группы № В4266

Направление подготовки: 19.04.01 – Биотехнология

e-mail: ramilya.9595@mail.ru

**Успенская Майя Валерьевна**

Год рождения: 1970

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,
д.т.н., профессор

e-mail: mv_ustpenskaya@mail.ru

УДК 547.995.15:620.3

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОВОЛОКОН НА ОСНОВЕ ГИАЛУРОНОВОЙ
КИСЛОТЫ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ****Снетков П.П., Нигматуллина Р.И., Успенская М.В.****Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.**

Методом электроформования впервые были получены и исследованы нановолокна на основе гиалуроновой кислоты с использованием бинарной смеси растворителей: вода – диметилсульфоксид. Подобраны некоторые рецептурные и технологические параметры процесса. Показано, что оптимальным соотношением растворителей вода – диметилсульфоксид является 60:40 до 40:60, при этом диаметр волокон варьируется в пределах 50–400 нм в зависимости от технологических параметров процесса электроформования.

Ключевые слова: биополимер, гиалуроновая кислота, нановолокно, полимер-носитель, электроспиннинг, электроформование.

Применение нановолокон с каждым годом получает все большее распространение благодаря их высокому значению удельной поверхности и повышенной пористости. Материалы на основе нановолокон могут использоваться в различных отраслях науки и техники, начиная от систем фильтрации, заканчивая материалами для тканевой инженерии.

В настоящее время существует четыре основных способа получения нановолокон из растворов полимеров: вытягивание, метод нанопильер, метод электроформования (электроспиннинг) и магнитоспиннинг [1].

Одним из наиболее перспективных способов получения нановолокон из растворов полимеров является процесс электроформования. Этот метод обладает технологической простотой, высокой эффективностью, гибкостью процесса, разнообразием получаемой продукции, и позволяет масштабировать процесс от небольшой лабораторной установки вплоть до промышленного многометрового конвейера. За счет варьирования технологических

параметров процесса электроформования можно получать нановолокна различной степени пористости и упорядоченности [2].

Электроформование – это процесс, который приводит к формированию нановолокон в результате действия электростатических сил на электрически заряженную струю полимерного раствора [3]. Помимо растворов, при определенных условиях можно использовать также и расплавы полимеров.

Первый патент на метод получения волокон в электростатическом поле был выдан в США в 1902 г. [4], однако, в то время он не получил такого широкого распространения. Интерес к электроформованию стал появляться позднее, и количество публикаций по данной тематике ежегодно увеличивается в геометрической прогрессии.

Разработкой теоретических основ, рецептур прядильных растворов, а также приборов, прежде всего, занимаются ведущие научно-исследовательские лаборатории и институты США, Южной Кореи, Японии, Швейцарии, Китая. При этом промышленно выпускается несколько моделей лабораторных и промышленных установок для разработки и производства нетканых полимерных материалов методом электроформования [1].

Процесс электроформования микро- и нановолокон является прототипом метода электрогидродинамического распыления жидкостей, в котором раствор, обладающий низкой электропроводностью, подается в дозирующее сопло (фильеру, иглу), находящееся под высоким электрическим напряжением (до нескольких десятков киловольт), и, тем самым, распыляется силами отталкивания одноименных электрических зарядов на мелкие капли. Эти капли прицельно осаждаются на коллекторе (заряженном электроде) [5]. При этом можно получить как покрытия, так и отдельные микро- и наночастицы.

На рис. 1 представлена схема процесса электроформования.



Рис. 1. Принципиальная схема процесса электроформования

На процесс электроформования влияет множество параметров, которые условно можно разделить на три группы: характеристики раствора, технологические параметры и условия окружающей среды (табл. 1).

Таблица 1. Определяющие параметры процесса электроформования

Параметры раствора	Технологические параметры	Параметры окружающей среды
Вязкость	Напряжение	Температура
Концентрация	Тип коллектора (электрода)	Давление

Параметры раствора	Технологические параметры	Параметры окружающей среды
Молекулярная масса полимера	Расстояние между иглой и коллектором	Влажность
Электропроводность	Скорость подачи раствора	
Поверхностное натяжение	Частота вращения коллектора	
	Типоразмер иглы	

Изменение хотя бы одного параметра приводит к изменению всего процесса в целом, и, соответственно, свойств получаемых нановолокон. Именно поэтому для каждой отдельной системы полимер-растворитель необходимо определять оптимальные параметры получения нановолокон с заданными эксплуатационными характеристиками. Наиболее изученными объектами являются полимерные системы на основе полиакрилонитрила и полистирола.

К «сложным» полимерам относятся наиболее востребованные в настоящее время в медицине биополимеры: гиалуроновая кислота, хитозан, коллаген, фиброин шелка, спидроин и т.п. Их ограниченная растворимость в летучих органических растворителях существенно затрудняет, а, в некоторых случаях делает невозможным процесс получения нановолокон методом электроформования.

В настоящей работе авторами были получены и исследованы характеристики нановолокон гиалуроновой кислоты. Молекула гиалуроновой кислоты – это анионный, линейный гетерополисахарид, построенный из регулярно чередующихся остатков D-глюкуроновой кислоты и N-ацетил-D-глюкозамина. Аминосахар в молекуле гиалуроновой кислоты соединен с D-глюкуроновой кислотой β -(1→4)-гликозидной связью, а глюкуроновая кислота с аминосахаром соединена β -(1→3) гликозидной связью [6].

Структурная формула гиалуроновой кислоты приведена на рис. 2.

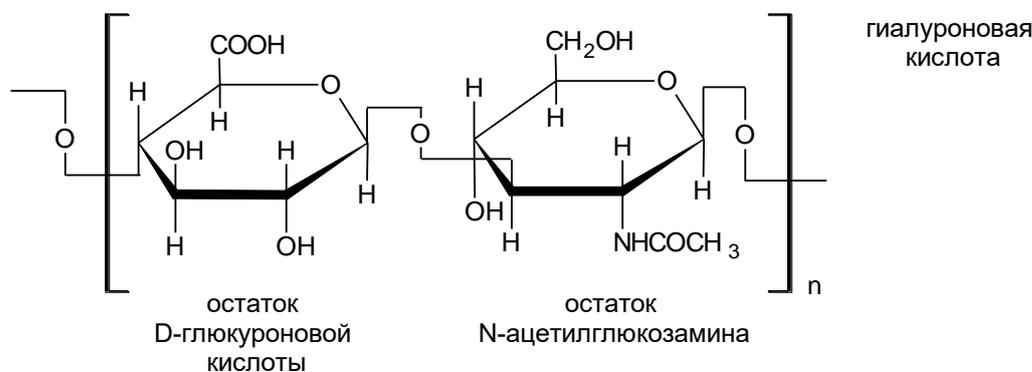


Рис. 2. Структурная формула гиалуроновой кислоты

Растворение всего 1 г полимера в 100 мл воды приводит к образованию высоковязкого раствора, который, однако, может быть легко приведен в движение посредством приложенного давления/напряжения. Таким образом, например, вязкие растворы гиалуроновой кислоты вводятся через тонкую иглу в полость сустава при лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата [7].

Помимо этого, благодаря наличию функциональных групп, растворы даже малой концентрации обладают повышенной электропроводностью, что вместе с высоким поверхностным натяжением раствора и низкой скоростью испарения воды значительно ухудшает электропрядомость раствора.

Отсутствие растворимости гиалуроновой кислоты в летучих органических растворителях подталкивает исследователей использовать многокомпонентные растворители, а также полимеры-носители, такие как поливиниловый спирт (ПВС) и полиэтиленоксид (ПЭО). В табл. 2 приведены примеры рецептов прядильных растворов, разработанных до настоящего времени.

Таблица 2. Рецептуры прядильных растворов на основе гиалуроновой кислоты (ГК)

Полимер(ы), концентрация	ММ ГК, МДа	Растворитель	Ссылка
ГК (0,8–1,2%)	1	H ₂ O:HCOOH:DMFA (25:50:25)	[8]
ГК (1,5–3,0%)	2	NaOH:DMFA (4:1) NH ₄ OH:DMFA (2:1, 2:3)	[9]
ГК (7,0–10,0%) ГК + коллаген (Σ 10%)	0,68	NaOH; NaOH:DMFA	[10]
ГК (0,1–0,3%); ПЭО (12%)	0,6–1,1	H ₂ O (дист.)	[11]
ПЭО:ГК (Σ 8,0%)	0,0087	CH ₃ COOH (50%)	[12]
ПЭО (5,0%); ГК (0,2%)	1–2	H ₂ O (дист.)	[13]
Тиолированная ГК (2,0%) ПЭО (0,5–2,0%)	1,5	DMEM	[12]
ГК (6,0%); ПВС (10,0%)	0,057	H ₂ O (дист.)	[15]

Примечание: DMEM – модифицированная по способу Дульбекко среда Игла.

При анализе рецептов прядильных растворов были выявлены следующие недостатки:

- использование в составе раствора органических кислот приводит к потере молекулярной массы гиалуроновой кислоты: даже небольшая добавка органической или неорганической кислоты к раствору «запускает» механизм деполимеризации [14]. Это существенно снижает «время жизни» прядильного раствора, а также требует проведения дополнительной нейтрализации полученных волокон;
- использование полимеров-носителей, ПЭО или ПВС, в количествах, превышающих гиалуроновую кислоту, сводит к минимуму биологическую активность последней;
- DMFA не допускается применять в составе биомедицинских материалов – остаточное количество данного растворителя может негативно влиять на процесс заживления, например, ран, язв и т.п.

Учитывая недостатки разработанных ранее растворов, в качестве соразтворителя был выбран апротонный растворитель, который применяется в медицине в качестве самостоятельного противовоспалительного и местного анестезирующего средства – диметилсульфоксид (ДМСО). Даже в случае неполного испарения его из полученных волокон, он не окажет негативного эффекта на обрабатываемую рану. Стоит отметить, что ДМСО был впервые использован авторами в качестве соразтворителя гиалуроновой кислоты.

Проведенные эксперименты показали явную зависимость процесса электроспиннинга от соотношения воды и диметилсульфоксида. Так, при соотношении воды и ДМСО 100:0 наблюдается лишь процесс электрогидродинамического распыления с образованием частиц диаметром от 50 до 600 нм.

Микрофотография таких частиц представлена на рис. 3, а.

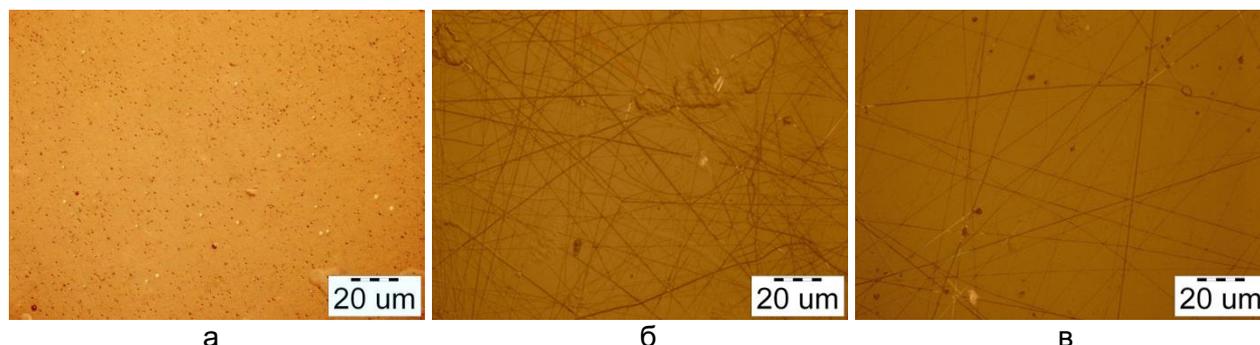


Рис. 3. Микрофотография частиц из гиалуроновой кислоты (а); волокна при напряжении 22 кВ (б) и 30 кВ (в)

При дальнейшем увеличении содержания ДМСО в смеси растворителей, процесс смещается от электрогидродинамического распыления в сторону электроформования. Наиболее стабильный процесс наблюдался при соотношении воды и ДМСО в пределах от 60:40 до 40:60. Дальнейшее повышение содержания ДМСО не существенно влияло, при остальных прочих равных условиях, на размер и качество получаемого нановолокна. Поэтому увеличение доли ДМСО в бинарной смеси растворителей более 60% было нецелесообразным.

На рис. 3, б, в, представлены микрофотографии волокон, полученных из 1,9% раствора гиалуроновой кислоты при соотношении ДМСО и воды 50:50.

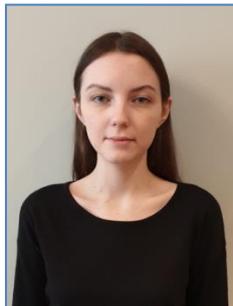
Повышение приложенного напряжения с 22 кВ до 30 кВ, как видно из рис. 3, б, в, приводит к получению нановолокон ГК с минимальным количеством дефектов и диаметром от 50 до 400 нм [15, 16].

Таким образом, использование в качестве системы растворителей воды и ДМСО дало возможность получения нановолокна из гиалуроновой кислоты без добавления модифицирующих полимеров (ПВС и ПЭО) и использования кислых и щелочных растворов, а также без применения ДМФА, что позволит создать биоматериалы с улучшенным комплексом эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Прокопчук Н.Р., Шашок Ж.С., Прищепенко, Д.В., Меламед В.Д. Электроформование нановолокон из раствора хитозана (обзор) // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 36–56.
2. Перепелкин К.Е. Физико-химические основы процессов формования химических волокон. – М.: Химия, 1976. – 320 с.
3. Матвеев А.Т., Афанасов И.М. Получение нановолокон методом электроформования: Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» / Под ред. В.В. Авдеева, А.Ю. Алентьева, Б.И. Лазорьяк, О.Н. Шорниковой. – М.: Изд-во МГУ. 2010. – 83 с.
4. Patent US 705691. Method of dispersing fluids / William James Morton. Declared 20.02.1900. Published 29.07.1902.
5. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Под редакцией проф. В.Н. Кириченко. – М.: ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 2001. – 231 с.
6. Радаева И.Ф., Костина Г.А., Змиевский А.В. Гиалуроновая кислота: биологическая роль, строение, синтез, выделение, очистка и применение (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 1997. – Т. 33. – № 2. – С. 133–137.
7. Necas J., Bartosikova L., Brauner P., Kolar J. Hyaluronic acid (hyaluronan): a review // Veterinarni Medicina. – 2008. – V. 53. – № 8. – P. 397–411.
8. Liu Y. et al. Effects of solution properties and electric field on the electrospinning of hyaluronic acid // Carbohydrate Polymers. – 2011. – V. 83. – № 2. – P. 1001–1015.
9. Brenner K. et al. Electrospinning of hyaluronic acid nanofibers from aqueous ammonium solutions // Carbohydrate Polymers. – 2012. – V. 87. – № 1. – P. 926–929.
10. Kim T. et al. Macroporous and nanofibrous hyaluronic acid/collagen hybrid scaffold fabricated by concurrent electrospinning and deposition/leaching of salt particles // Acta Biomaterialia. – 2008. – V. 4. – № 6. – P. 1611–1619.
11. Ahire J. et al. Polyethylene oxide (PEO)-hyaluronic acid (HA) nanofibers with kanamycin inhibits the growth of *Listeria monocytogenes* // Biomedicine & Pharmacotherapy. – 2017. – V. 86. – P. 143–148.
12. Chen G. et al. Preparation, characterization, and application of PEO/HA core shell nanofibers based on electric field induced phase separation during electrospinning // Polymer. – 2016. – V. 83. – P. 12–19.

13. Chanda A. et al. Electrospun chitosan/polycaprolactone-hyaluronic acid bilayered scaffold for potential wound healing applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2018. – V. 116. – P. 774–785.
14. Ji Y. et al. Electrospun three-dimensional hyaluronic acid nanofibrous scaffolds // *Biomaterials*. – 2006. – № 27. – P. 3782–3792.
15. Séon-Lutz M. et al. Electrospinning in water and in situ crosslinking of hyaluronic acid / cyclodextrin nanofibers: Towards wound dressing with controlled drug release // *Carbohydrate Polymers*. – 2019. – V. 207. – P. 276–287.
16. Хабаров В.Н., Бойков П.Я., Селянин М.А. Гиалуроновая кислота: получение, свойства, применение в биологии и медицине. – М.: Практическая медицина, 2012. – 224 с.

**Дудко Юлия Юрьевна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и
оптоэлектроники, студент группы № L41701Направление подготовки: 16.04.01 – Функциональные материалы
оптоэлектроники

e-mail: juliadudko96@gmail.com

**Липницкая Светлана Николаевна**

Год рождения: 1987

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и
оптоэлектроники, к.т.н., ассистент

e-mail: snlipnitskaya@corp.ifmo.ru

УДК 535.3**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОРАССЕЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ
СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ****Дудко Ю.Ю., Липницкая С.Н.****Научный руководитель – к.т.н. Липницкая С.Н.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

Работа посвящена моделированию светодиодного устройства в программном пакете ZEMAX и исследованию светорассеяния в оптических покрытиях. Основной целью проводимого исследования являлась оценка влияния показателя преломления материала оптического покрытия и характеристик люминофора на потери оптической мощности в светодиодном устройстве.

Ключевые слова: светодиод, люминофор, оптическое покрытие, светорассеяние.

Современные технологии полупроводникового освещения обладают большим потенциалом для замены устройств общего освещения на мощные белые светодиоды. Одним из наиболее многообещающих методов изготовления белого светодиода является совмещение синего светодиодного чипа с оптическим покрытием, содержащим люминофор. Этот метод обеспечивает высокую светоотдачу и хорошую цветопередачу [1].

Исследования, направленные на изучение потерь мощности в светодиодных устройствах, представляют большой интерес и являются важной задачей в области источников света [2].

В программном пакете ZEMAX была разработана модель светодиодного модуля «чип-на-плате», который использует в качестве источника света светодиод на основе GaN [3], излучающий в синем спектре (рисунок).

Конструкция светодиодного модуля «чип-на-плате» представляет собой подложку, на которой расположен светодиодный чип, покрытый слоем прозрачного материала, который может содержать люминофор. Параметры расчетной модели светодиодного модуля приведены ниже.

Источник излучения (светодиодный чип) представляет собой параллелепипед из материала с показателем преломления $n=2,49$ для длины волны 450 нм, внутри которого расположена излучающая площадка. Размеры светодиодного чипа 0,5×0,5×0,25 мм. Размеры

излучающей площадки $0,5 \times 0,5$ мм, распределение интенсивности излучения определялось законом Ламберта, мощность излучения 0,5 Вт, длина волны излучения 450 нм, количество лучей для расчета 10^6 .

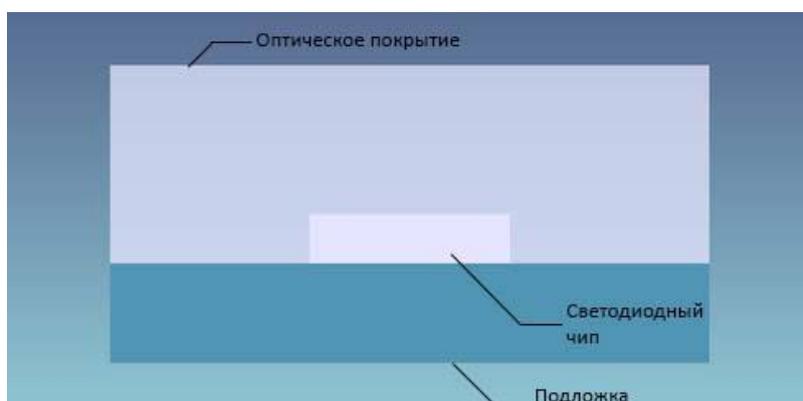


Рисунок. Расчетная модель светодиодного модуля

Размеры подложки $1,5 \times 1,5 \times 0,5$ мм. Рассеяние света на поверхности подложки задавалось АВg моделью поверхностного рассеивания (параметры модели: $A=0,01$, $B=0,015$, $g=2$), поглощение 5%, что соответствует реальным подложкам, используемым в производстве [4].

Размеры оптического покрытия $1,5 \times 1,5 \times 1$ мм. Показатель преломления оптического покрытия варьировался в расчетах n_{sample} : 1,52, 1,58, 1,68, 1,82 (здесь и далее значения показателей преломления приведены для длины волны излучения 450 нм). Такие значения показателя преломления обусловлены разнообразием материалов, которые можно использовать в качестве оптического покрытия [5, 6]. Это могут быть как силиконовые эластомеры с показателями преломления 1,4–1,55, так и покровные стекла, показатель преломления которых выше – 1,6–1,8.

Параметры люминофора: средний размер частиц люминофора 5 мкм, концентрация частиц люминофора $2 \cdot 10^8$ см⁻³, показатель преломления частиц люминофора $n_{phosphor}=1,85$ (соответствует показателю преломления люминофора на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG)). Моделирование рассеяния на частицах люминофора производилось в рамках модели рассеяния Ми [7].

Далее была проведена оценка потерь мощности излучения с помощью полярного детектора. Результаты приведены в таблице.

Таблица. Полученные результаты

№	n_{sample}	ΔU_{loss} , без использования люминофора	ΔU_{loss} в случае использования люминофора
1	1,52	79%	82,46%
2	1,58	79,6%	80,98%
3	1,68	80,36%	76,6%
4	1,82	81,14%	70,5%

Потери мощности излучения светодиода определялись по следующей формуле:

$$\Delta U_{loss} = \frac{U_{chip} - U_{COB}}{U_{chip}} \cdot 100\%,$$

где U_{chip} – общая оптическая мощность лучей, излучаемых светодиодным чипом (задаваемая в начале расчета); U_{COB} – общая оптическая мощность лучей, покинувших светодиодный модуль (фиксируемая сферическим детектором).

Результаты проделанных расчетов позволяют сделать ряд выводов. На выходную мощность излучения светодиодного устройства влияют следующие факторы: показатель преломления материала покрытия и добавление частиц люминофора в это покрытие.

Для светодиодного устройства, оптическое покрытие которого не содержит люминофор, потери мощности излучения увеличиваются при увеличении показателя преломления материала покрытия. Для случая, когда оптическое покрытие содержит частицы люминофора, ситуация обратная – при увеличении показателя преломления материала покрытия потери мощности уменьшаются.

Анализируя использованную модель светодиодного устройства можно сказать, что на вывод излучения влияет несколько механизмов: полное внутреннее отражение (ПВО) на границах «светодиодный чип/оптическое покрытие», «оптическое покрытие/воздух» и, в случае наличия частиц люминофора, рассеяние на границе «оптическое покрытие/частицы люминофора». Эти механизмы влияют на то, что свет не покидает устройство, а попадает на поверхность чипа или подложки, где частично поглощается.

Из полученных результатов видно, что в случае отсутствия люминофора большее влияние на потери мощности оказывает ПВО на границе «оптическое покрытие/воздух», так как при увеличении показателя преломления материала оптического покрытия угол ПВО на границе «оптическое покрытие/воздух» уменьшается, что приводит к уменьшению выводимого излучения, с другой стороны увеличивается угол ПВО на границе «светодиодный чип/оптическое покрытие», что должно приводить к уменьшению потерь. Для уменьшения потерь в данном случае целесообразно использовать линзы на поверхности светодиодного устройства.

В случае присутствия люминофора большее влияние на потери мощности оказывает рассеяние на границе «оптическое покрытие/частицы люминофора», и при приближении значения показателя преломления покрытия к значению показателя преломления частиц люминофора потери мощности уменьшаются.

Таким образом, в результате проведения работы была разработана расчетная модель светодиодного устройства с варьируемыми параметрами и исследовано влияние светорассеяния на потери мощности. Полученные результаты расчетов показали, что потери мощности излучения светодиода значительно зависят от показателя преломления материала оптического покрытия. Дальнейшие расчеты будут посвящены изучению влияния параметров люминофора (размера частиц и концентрации) и формы оптического покрытия на потери мощности в светодиодном устройстве.

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: Физматлитгиз, 2008. – 83 с.
2. Lipnitskaya S.N., Mynbaev K.D., Bougrov V.E., Kovsh A.R., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E. Effects of light scattering in optical coatings on energy losses in LED devices // *Technical Physics Letters*. – 2013. – V. 39. – № 12. – P. 1074–1077.
3. Туркин А.Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // *Компоненты и технологии*. – 2011. – № 5. – С. 6–10.
4. Липницкая С.Н., Мынбаев К.Д., Никулина Л.А., Бугров В.Е., Ковш А.Р., Одноблюдов М.А., Романов А.Е. Повышение эффективности вывода света из светодиодных модулей «CHIP-ON-BOARD» // *Оптический журнал*. – 2013. – Т. 80. – № 12. – С. 45–52.
5. Raukas M., Wei G., Bergenek K., Kelso J., Zink N., Zheng Y., Hannah M., Stough M., Wirth R., Linkov A., Jermann F., Eisert D. Luminescent ceramics for LED conversion // *Proceed. of SPIE*. – 2011. – V. 7954. – P. 795415.
6. Shvaleva M.A., Nikulina L.A., Aseev V.A., Mynbaev K.D., Bougrov V.E., Kovsh A.R., Odnoblyudov M.A., Nikonov N.V., Romanov A.E. Ce³⁺: YAG Doped Glass-Ceramics For White Light-Emitting Diode // *Optical Review, IET*. – 2014. – V. 21. – № 5. – P. 683–686.
7. Horvath H. Gustav Mie and the scattering and absorption of light by particles: Historic developments and basics // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2009. – V. 110. – № 11. – P. 787–799.



Щедрина Надежда Николаевна

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы № L3316

Направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника и лазерные технологии

e-mail: schdrina.nadezda@gmail.com



Москвин Михаил Константинович

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
инженер

e-mail: mkmoskvina@corp.ifmo.ru



Лутошина Дарья Сергеевна

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы № L3316

Направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника и лазерные технологии

e-mail: ld3282@mail.ru

Одинцова Галина Викторовна

Год рождения: 1988

Университет ИТМО, факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н., ассистент

e-mail: gvodintsova@corp.ifmo.ru

УДК 544.032.65

**ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ЦВЕТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДРАГОЦЕННЫХ
МЕТАЛЛОВ**

Щедрина Н.Н., Москвин М.К., Лутошина Д.С.

Научный руководитель – к.т.н. Одинцова Г.В.

В работе предложено использование волоконного лазера наносекундной длительности для окрашивания поверхности серебряного сплава 925 пробы за счет эффекта плазмонного резонанса в лазерно индуцированных наночастицах $Ag-Ag_xO$. Формирование наночастиц $Ag-Ag_xO$ на подложках из серебра, обладающих плазмонными свойствами, проводилось за счет лазерного воздействия в воздушной среде. Были определены спектры отражения в видимом диапазоне, и рассчитаны цветовые координаты поверхности серебра после лазерной обработки. Также были промоделированы спектры отражения поверхности серебра с наночастицами $Ag-Ag_xO$, сформированными из парогазовой фазы в результате лазерной абляции с учетом полученных экспериментальных данных по размеру, концентрации и распределению наночастиц серебра.

Ключевые слова: наносекундные лазерные импульсы, лазерное окрашивание, драгоценные металлы, наночастицы серебра, плазмонный резонанс, лазерная маркировка.

В настоящее время серебро является одним из самых популярных и доступных драгоценных металлов, широко используемых для изготовления ювелирных изделий. Существует множество способов декорирования ювелирных украшений. При этом цвет изделия играет немаловажную роль для визуальной оценки его привлекательности.

Известны различные способы нанесения цветного изображения на драгоценные металлы, такие как оксидирование [1], гальванические покрытия [2], горячие и холодные цветные эмали [3], создание цветной патины путем погружения в различные химические вещества [4, 5] и другие. Однако они обладают рядом недостатков: недолговечность и хрупкость покрытий, невозможность нанесения изображений с высоким разрешением, неэкологичность некоторых методов, а часто и высокая стоимость изготовления.

Окрашивание драгоценных металлов с помощью лазерного воздействия перспективно, поскольку этот метод позволяет с высокой точностью контролировать оптические свойства поверхности материалов. Для изменения оптических свойств и, следовательно, цвета металлов, обычно используются два основных механизма: интерференция света в тонком оксидном слое, образованном на поверхности с помощью лазерного нагрева, и дифракция света на периодических поверхностных структурах, образованных интерференцией лазерного излучения с поверхностной электромагнитной волной. Использование первого механизма для окрашивания драгоценных металлов проблематично из-за низкого взаимодействия с кислородом. Ранее уже был предложен метод цветного окрашивания серебра и золота путем лазерного окисления титановой пленки, локально перенесенной на поверхность металла [6]. Однако реализация этой технологии требует использования дополнительных расходных материалов и нескольких этапов обработки и установки. Изменение отражения драгоценных металлов путем формирования поверхностных периодических структур также возможен, однако, образующиеся цвета сильно зависят от угла падения света.

Известно, что наночастицы (НЧ) драгоценных металлов обладают сильными резонансными взаимодействиями в диапазоне видимых волн, за счет данного эффекта на поверхности металла могут быть получены яркие цвета. При лазерном нагревании поверхности металла выше температуры испарения формируются сферические наночастицы, оседающие из парового облака на обрабатываемую поверхность.

В данной работе предлагалось использование волоконного лазера наносекундной длительностью импульсов в качестве инструмента для контроля оптических свойств поверхности серебра в видимом диапазоне за счет эффекта плазмонного резонанса в лазерно-синтезированных наночастицах.

В работе использовалась полированная серебряная пластина 925 пробы. Проведение эксперимента осуществлялось с помощью установки на базе иттербиевого волоконного лазера с наносекундной длительностью импульсов.

В результате изменения параметров лазерного воздействия, таких как плотность мощности I , количество импульсов в точке вдоль осей $x(N_x)$ и $y(N_y)$, была найдена технологическая зона на поверхности серебра, где возможно образование НЧ нужного размера (рис. 1). Для охарактеризования полученных цветов, были измерены спектры отражения в видимом диапазоне, и посчитаны цветовые координаты в системе XY (рис. 2). Как видно на спектрах отражения, с увеличением N_x , N_y минимумы спектров отражения смещаются к инфракрасной области. Такая же тенденция сохраняется с увеличением плотности мощности лазера. Из полученных палитр было выбрано несколько цветов (S_1 , S_5 , S_7 и S_{10}) для последующих наблюдений.

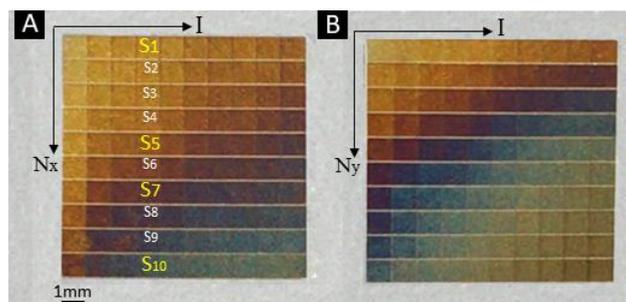


Рис. 1. Цветовая палитра, полученная на поверхности серебра

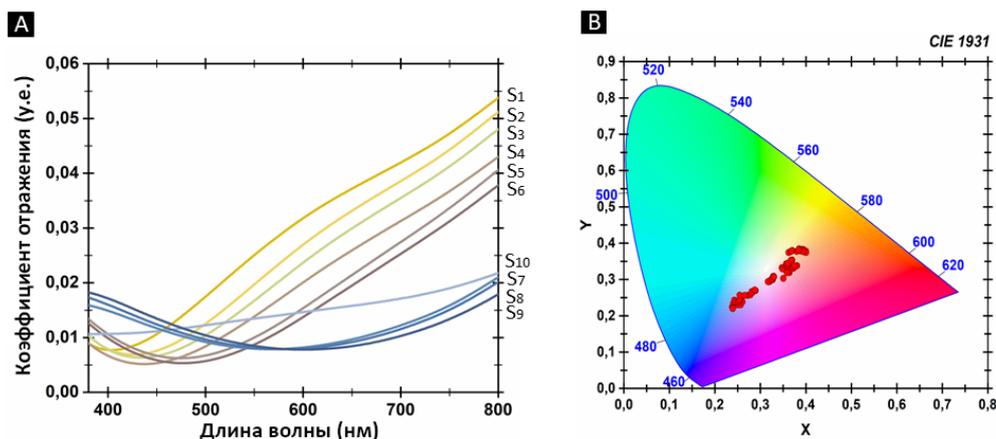


Рис. 2. Колориметрические характеристики образцов: спектры отражения серебра (от S1 до S10) после лазерного воздействия (A), соответствующие цветные координаты, отмеченные на CIE XY диаграмме (B)

Анализ полученных СЭМ-снимков (рис. 3) различных обработанных областей показал, что размер образованных НЧ лежит в диапазоне от 10 ± 5 нм до 50 ± 8 нм. Анализ также показал, что разные цвета характеризуются четко определенными диапазонами размеров частиц. Таким образом, видно, что размер увеличивается с увеличением Nx . Форма и размер образованных НЧ связаны с параметрами лазерного воздействия и характеристиками окружающей среды. Так, например, для более низких значений Nx НЧ имеют в основном сферическую форму. С ростом Nx увеличивается средний размер НЧ. При достижении больших значений Nx НЧ начинают агломерировать и асферическую форму.

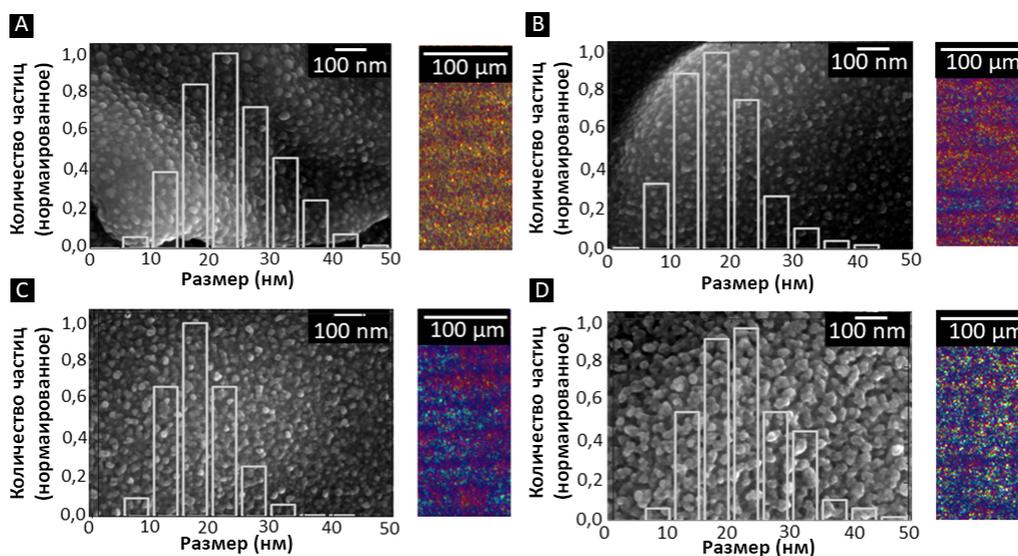


Рис. 3. Морфология полученных цветов на образцах S1 (A), S5 (B), S7 (C), S10 (D): оптические микрофотографии, СЭМ-фотографии и гистограммы распределения размеров: $2r(S1)=15 \pm 6$ нм, $2r(S5)=18 \pm 7$ нм, $2r(S7)=24 \pm 5$ нм, $2r(S10)=43 \pm 10$ нм

Чтобы лучше объяснить полученные результаты, выполнено моделирование с использованием теории Ми в решении уравнения Бургеммана, которое показало наиболее точное совпадение с экспериментальными данными.

При моделировании предполагаемый слой практически полностью представлял собой конгломерацию наночастиц серебра с незначительными и редкими воздушными порами между ними. В результате было получено, что ширина провала спектра определяется радиусом наночастиц. Наличие большого числа наночастиц с различными радиусами приводит к усреднению спектральных характеристик и уширению пика поглощения.

И аналитическое моделирование, и экспериментальные результаты демонстрируют, что минимумы спектров отражения смещаются в красный цвет с увеличением размера НЧ, что является подтверждением выдвинутой гипотезы (рис. 4).

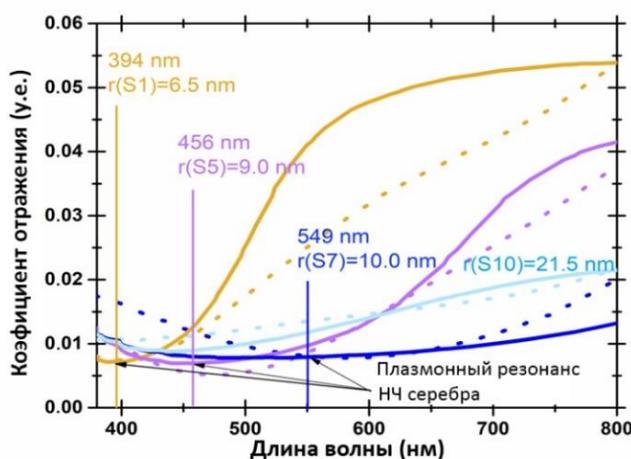


Рис. 4. Спектры отражения серебряной подложки, покрытой НЧ с радиусами $r(S1)=6,5$ нм, $r(S5)=9$ нм, $r(S7)=10$ нм, $r(S10)=21,5$ нм: пунктирная линия – экспериментальная, сплошная линия – смоделированная

В результате проделанной работы было осуществлено лазерное окрашивание серебряной пластины путем получения поверхностного плазмонного резонанса в лазерноиндуцированных НЧ.

Параметры лазерного воздействия сильно влияют на размер получаемых частиц и, таким образом, на результирующий цвет поверхности. Обнаружено, что с ростом интенсивности или N_x , N_y средний размер НЧ увеличивается, что в конечном итоге приводит к агломерации НЧ и изменению их формы. Получена зависимость цвета от размера, подтвержденная моделированием. Таким образом, оптические свойства серебряных подложек могут быть изменены путем подбора параметров лазерной обработки.

Разработанная технология окрашивания драгоценных металлов может быть использована для промышленного применения благодаря высоким показателям производительности.

Литература

1. Duprez D., Cavani F. (Eds.). Handbook of Advanced Methods and processes in oxidation catalysis: from laboratory to industry. – Imperial College Press, 2014. – 1035 p.
2. Murray H. Insoluble anodes for precious metal plating // Met. Finish. – 1995. – V. 93. – № 9. – P. 94.
3. Werge-Hartley J. Enamelling on precious metals. – Crowood Press, 2011. – 176 p.
4. Untracht O. Jewelry Concepts & Technology. – Doubleday, 1982. – 840 p.
5. Hughes R., Rowe M. The coloring, bronzing and patination of metals // Bibliography. – 1983. – P. 361–372.
6. Veiko V., Odintsova G., Vlasova E., Andreeva Y., Krivonosov A., Ageev E., Gorbunova E. Laser coloration of titanium films: New development for jewelry and decoration // Opt. Laser Technol. – 2017. – V. 93. – P. 9–13.



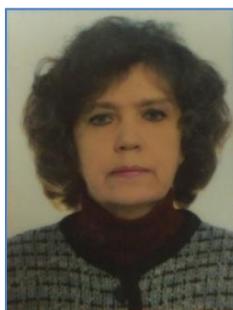
Соколов Павел Павлович

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы № V4202

Направление подготовки: 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика

e-mail: sokol7858@yandex.ru



Ворзобова Надежда Дмитриевна

Год рождения: 1946

Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики,
к.т.н., доцент

e-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru

УДК 535.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Соколов П.П., Ворзобова Н.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Ворзобова Н.Д.

Рассмотрены процессы формирования голографическими методами трехмерных периодических структур и элементов с произвольной формой поверхности, их свойства, характеристики и возможные применения.

Ключевые слова: голографическая запись, периодические структуры, дифракционная эффективность, угловая селективность, 3D-печать.

Работа посвящена исследованию процессов формирования трехмерных объектов голографическими методами и их характеристик. Рассмотрены трехмерные объекты периодической конфигурации и объекты с произвольной трехмерной формой поверхности – процессы получения и свойства применительно к актуальным практическим задачам.

Одна из таких задач – получение дифракционных элементов солнечных концентраторов. Основные требования – сочетание высоких дифракционных свойств с широким диапазоном углов падения излучения. Имеющиеся результаты относятся к изучению свойств объемных структур при падении излучения в одной плоскости. Особенностью данной работы являлось исследование дифракционных и селективных свойств периодических структур при падении излучения в трехмерном пространстве. Структуры записывались в фотополимерных материалах Baufol NX в попутных пучках. Определены условия получения дифракционной эффективности до 80% и условия, при которых данные значения могут сохраняться в широком диапазоне углов 80–100°. Установлено, что в полученных структурах существуют направления распространения излучения, отличные от классического брэгговского направления, при которых дифракционная эффективность достигает максимальных значений. Этот результат является важным и решает проблему использования солнечного излучения при больших углах падения. Установленные новые свойства структур определяют существенное расширение диапазона углов падения излучения, относительно полученных в [1–4], применительно к задаче получения дифракционных дефлекторов солнечных концентраторов.

Следующей задачей являлось исследование возможности получения дифракционных управляемых расщепителей световых пучков. Имеющиеся разработки базируются на свойствах либо тонких решеток, позволяющих получать множество дифрагированных пучков с малой эффективностью, либо объемных решеток, позволяющих получать высокую

дифракционную эффективность, но при высокой угловой селективности, что требует точных угловых перемещений для изменения интенсивностей дифрагированных пучков. В данной работе решалась задача получения дифракционных управляемых многоканальных расщепителей, обеспечивающих сочетание высокой дифракционной эффективности с угловой селективностью, позволяющей изменять интенсивности излучения в каналах при повороте элемента без предъявления высоких требований к точности угловых перемещений. Для получения расщепителей использовались промышленные материалы: галоген серебряные материалы – ПФГ-03М и фотополимеры – Bayfol HX. В результате оптимизации экспозиционных параметров, постэкспозиционной обработки (ПФГ-03М) и частоты записи определены условия получения высокой дифракционной эффективности (до 80%) в сочетании с необходимой угловой селективностью (единицы градусов). Преимуществом использования фотополимерных материалов является исключение постэкспозиционной обработки – структуры формируются в результате только экспонирования. Получены двух и пятиканальные расщепители световых пучков (рис. 1), позволяющие изменять интенсивности излучения в каналах при повороте элемента без предъявления высоких требований к точности угловых перемещений. Возможные применения: техника физического эксперимента, системы передачи информации, защитные технологии.

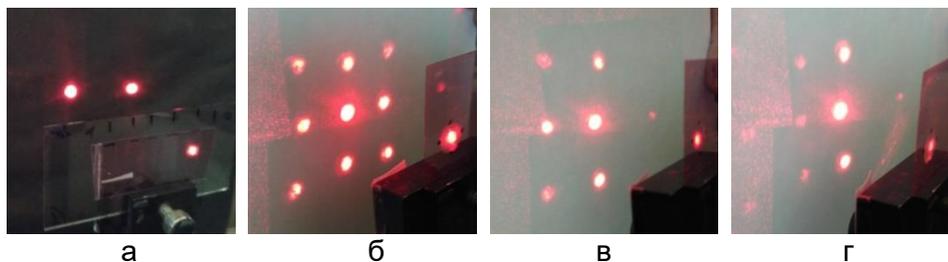


Рис. 1. Картины дифракции на двух- (а) и пятиканальном (б) расщепителях (отношение интенсивностей I_{+1}/I_0 1:1,5); изменение картины дифракции при повороте элемента (в, г)

Исследован голографический метод получения трехмерных объектов с произвольной формой поверхности. Метод заключался в проекции голографического изображения формируемого объекта в объем фотополимеризующегося материала, и полимеризации в области резкого изображения при ограничении полимеризации вне области наибольшей резкости. Преимуществом метода голографической 3D-печати, относительно аддитивных технологий 3D-печати, является исключение последовательного синтеза трехмерного объекта – весь объект формируется в результате однократного экспонирования материала.

Задачей данной работы являлось выявление и исследование факторов, определяющих требования к условиям записи, и свойства трехмерных объектов.

Получено аналитическое выражение (1) и построены расчетные кривые (рис. 2), позволяющие определить требования к создаваемому поглощению формирующего излучения в объеме материала (с целью ограничения полимеризации за область наибольшей резкости проектируемого изображения), длительности экспонирования, локализации проектируемого изображения и глубине профиля формируемого трехмерного объекта.

$$I_{\text{изобр.}} e^{-k_{\lambda} T_{\text{изобр.}}} t_{\text{экс.}} \geq E_{\text{порог.}} \quad (1)$$

$$I_{\text{изобр.}} = \frac{P \eta \alpha}{S}, \quad (2)$$

где $I_{\text{изобр.}}$ – интенсивность излучения в восстановленном изображении (без учета поглощения в слое); k_{λ} – показатель поглощения материала; $T_{\text{изобр.}}$ – толщина слоя от его поверхности до области локализации изображения; $t_{\text{экс.}}$ – длительность экспонирования; $E_{\text{порог.}}$ – пороговое значение энергии полимеризации; P – выходная мощность лазера; η – дифракционная эффективность проектирующей голограммы; α – коэффициент потерь в схеме записи; S – площадь формируемого объекта.

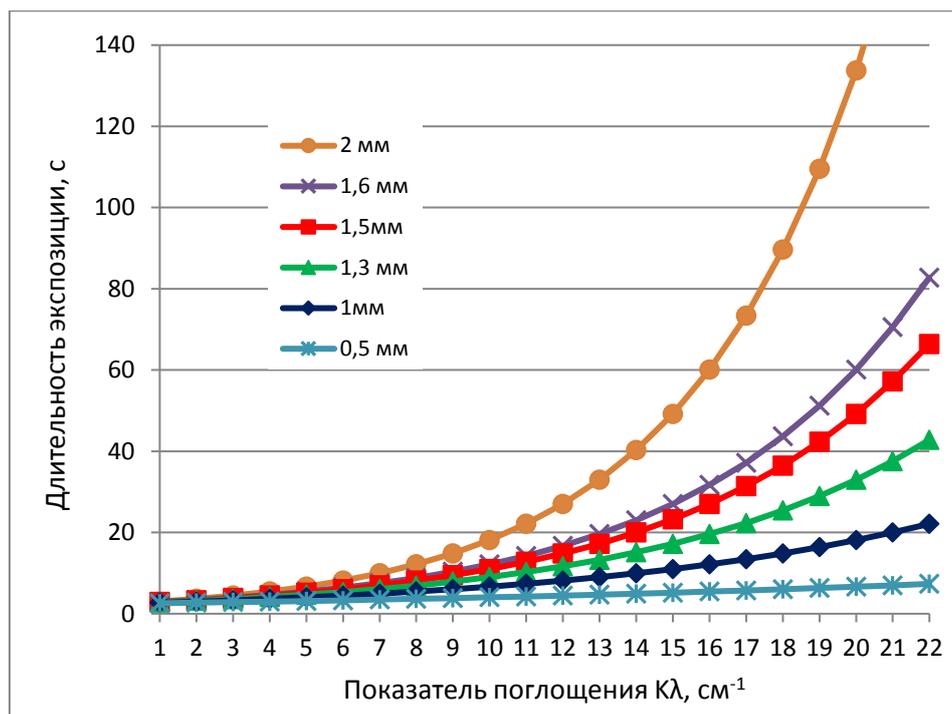


Рис. 2. Зависимость длительности экспонирования от создаваемого поглощения излучения в объеме материала и локализации проектируемого изображения.
 $T_{\text{изобр.}}=0,5-2 \text{ мм}$, $\eta=20\%$, $P=200 \text{ мВт}$, $\alpha=0,5$, $S=0,5 \text{ см}^2$

Требования к условиям записи проектирующих голограмм, а также размерные характеристики трехмерных объектов, определялись на основании зависимости поперечного увеличения восстановленного изображения от расстояния до объекта для различных длин волн записывающего и восстанавливающего излучений и геометрических параметров схемы записи проектирующей голограммы и схемы проекции. Получены расчетные зависимости, позволяющие определить требования к длине волны формирующего излучения, геометрическим параметрам схемы записи проектирующей голограммы и схемы получения трехмерного объекта, а также глубине объекта.

Таким образом, в результате исследований определены условия получения и свойства трехмерных объектов периодической и произвольной трехмерной конфигурации, определяющие возможность использования результатов для решения практических задач.

Литература

1. De Jong M., de Boer D.K.G., Bastiaansen C.W.M. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators // *Optics Express*. – 2011. – V. 19. – № 16. – P. 15127–142.
2. Akbari H., Naydenova I., Martin S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Applied Optics*. – 2014. – V. 53. – № 7. – P. 1343–1353.
3. Akbari H., Naydenova I., Ahmed H., Cormack S.M., Martin S. Development and testing of low spatial frequency holographic concentrator elements for collection of solar energy // *Solar Energy*. – 2017. – V. 155. – P. 103–109.
4. Ghosh A., Nirala A.K., Yadav Y.L. Optical design and characterization of holographic solar concentrators for photovoltaic applications // *Optik*. – 2018. – V. 168. – P. 625–649.

**Степаниденко Евгения Александровна**

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики,
аспирантНаправление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия

e-mail: stepanidenko.e@mail.ru

**Арефина Ирина Александровна**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики
студент группы № V41372сНаправление подготовки: 12.04.03 – Физика и технология наноструктур

e-mail: irina-arefina97@mail.ru

Ушакова Елена Владимировна

Год рождения: 1987

Университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики, к.ф.-м.н.

e-mail: elena.ushakova@corp.ifmo.ru

УДК 535.34+535.37

**СОЗДАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ПОЛИМЕРОВ И УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК****Степаниденко Е.А., Арефина И.А., Черевков С.А., Дубовик А.Ю., Xiong Y.,****Ушакова Е.В., Баранов А.В., Фёдоров А.В., Rogach A.L.****Научный руководитель – к.ф.-м.н. Ушакова Е.В.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 380130 «Светоизлучающие углеродные точки».

В работе были получены наноструктурированные светоизлучающие материалы на основе углеродных точек (С-точки) и полимерных матриц, нанесенные на стеклянные подложки методом центрифугирования. Исследование оптических свойств показало равномерное распределение С-точек в тонких полимерных пленках. Исследование фотолюминесцентного отклика с временным разрешением показало увеличение времен затухания фотолюминесценции в результате иммобилизации поверхностных групп и химических связей С-точек.

Ключевые слова: углеродные точки, тонкие пленки, наноструктурированный материал, кинетика затухания фотолюминесценции, люминесцентная спектроскопия.

На сегодняшний день одним из новых и перспективных в применении наноматериалов являются флуоресцентные углеродные точки (С-точки), обладающие сигналом фотолюминесценции (ФЛ), который может быть перестроен в широком спектральном диапазоне [1]. Среди отличительных свойств С-точек можно выделить их высокую фотостабильность, а также хорошую биосовместимость вследствие высокой растворимости в воде и отсутствию токсичных элементов в составе [2]. Материалы на основе С-точек перспективны в медицине, фотовольтаике, сенсорике и др. [3]. Кроме того, С-точки могут быть встроены в различные матрицы, например полимерные, что позволит создавать фотонные устройства с использованием гибких подложек.

В данной работе были получены и исследованы люминесцентные наноструктурированные материалы на основе полимерных пленок из поливинилового спирта

(ПВС) и полиметилметакриата (ПММА) с внедренными в них С-точками. В качестве люминесцентных наночастиц были использованы С-точки, синтезированные сольвотермальным методом [4] в различных растворителях: вода, диметилформамид (ДМФ), метанол и ксилол. Выбор растворителя позволил изменить положение оптических переходов в видимой области спектра. Размеры синтезированных наночастиц составили порядка 4–5 нм для образцов С-точек в воде, ДМФ и метаноле, и 50 нм в ксилоле, что было подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопией. Оптические свойства исходных растворов, полученные с помощью спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu) и спектрофлуориметра Cary Eclipse (Varian), представлены на рис. 1. Спектры ФЛ зарегистрированы при возбуждении на длине волны 405 нм.

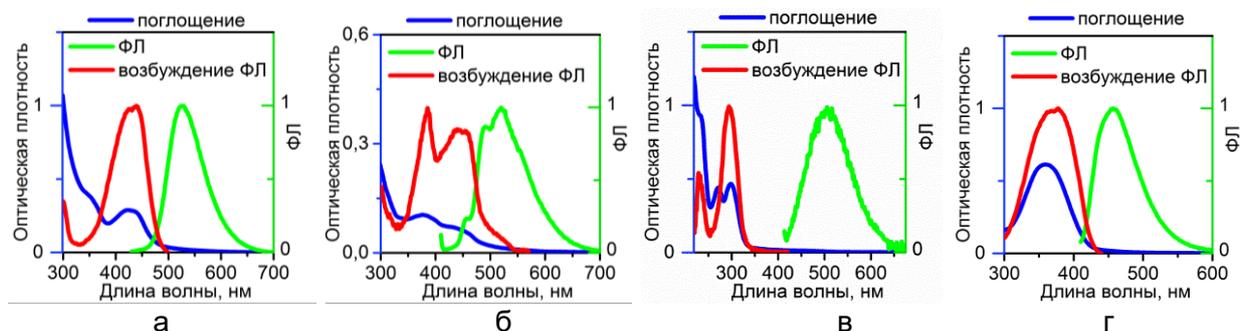


Рис. 1. Спектры поглощения, ФЛ и возбуждения ФЛ используемых С-точек в: ДМФ (а); метаноле (б); воде (в) и ксилоле (г)

Поглощение С-точек находится в области до 450 нм. Наиболее интенсивная полоса поглощения С-точек находится в районе $\approx 250\text{--}290$ нм, обусловленная $\pi\text{--}\pi$ электронным переходом. Менее интенсивное поглощение возникает из-за $n\text{--}\pi$ электронных переходов и, как видно из спектров возбуждения ФЛ, отвечает за излучательные переходы С-точек.

Для изготовления наноструктурированных материалов на основе С-точек были использованы два вида полимеров: гидрофильный ПВС, растворимый в воде, и гидрофобный ПММА, растворимый в органических растворителях. ПВС, соответственно, использовался для создания матрицы для С-точек в гидрофильных растворителях (вода, ДМФ, метанол), а ПММА – в гидрофобных (ксилол). Вначале были приготовлены 5%-е растворы полимеров ПВС и ПММА в воде и толуоле соответственно. Затем полученные растворы были смешаны с растворами С-точек с концентрацией порядка 1–5 мг/мл в объемном соотношении 3:1. При такой концентрации С-точек в приготовленной смеси с полимером предполагается, что полученные пленки будут обладать хорошим сигналом люминесценции при минимальном количестве агрегатов С-точек. Далее методом центрифугирования на предварительно очищенные стеклянные подложки были нанесены полученные растворы. Полученные образцы были высушены в течение 10–15 ч в атмосфере. Четыре образца С-точек в полимерных матрицах, полученные таким методом, были названы следующим образом (матрица/люминофор/растворитель): ПВС/С-точки/вода, ПВС/С-точки/ДМФ, ПВС/С-точки/метанол, ПММА/С-точки/ксилол.

Анализ спектров поглощения образцов (рис. 2, а) показал, что в области длин волн до 450 нм оптическая плотность полимерных пленок с С-точками увеличивается по сравнению с образцами чистых полимерных пленок. Данная полоса соответствует оптическому переходу С-точек.

Исследование спектральных откликов методами стационарной спектроскопии и морфологии полученных образцов проводилось с помощью конфокального люминесцентного сканирующего микроскопа (ЛСМ) с возбуждением на длине волны 405 нм, результаты представлены на рис. 2, б–е. Анализ изображений показал, что сигнал ФЛ в полученных образцах соответствует излучательному переходу С-точек и распределен относительно равномерно, что свидетельствует об однородном внедрении С-точек в полимерные матрицы.

В спектрах ФЛ всех образцов наблюдается смещение полосы в длинноволновую область относительно положения пиков ФЛ С-точек в соответствующих растворителях. Положение полосы и ее относительный сдвиг (Δ) приведены в таблице. Величина сдвига полосы ФЛ не связана с типом используемой полимерной матрицы. В данных системах возможны следующие процессы, приводящие к наблюдаемым изменениям оптических свойств: взаимодействие люминесцентных центров на поверхности С-точек и молекул полимера при формировании пленок и перенос энергии фотовозбуждения в агрегатах С-точек. Наибольшие сдвиги ($\Delta=75$ нм и $\Delta=29$ нм) наблюдаются для образцов ПВС/С-точки/вода и ПММА/С-точки/ксилол соответственно. В случае пленок с растворителями: ДМФ и метанол, полоса ФЛ становится более широкой, а ее положение почти не меняется.

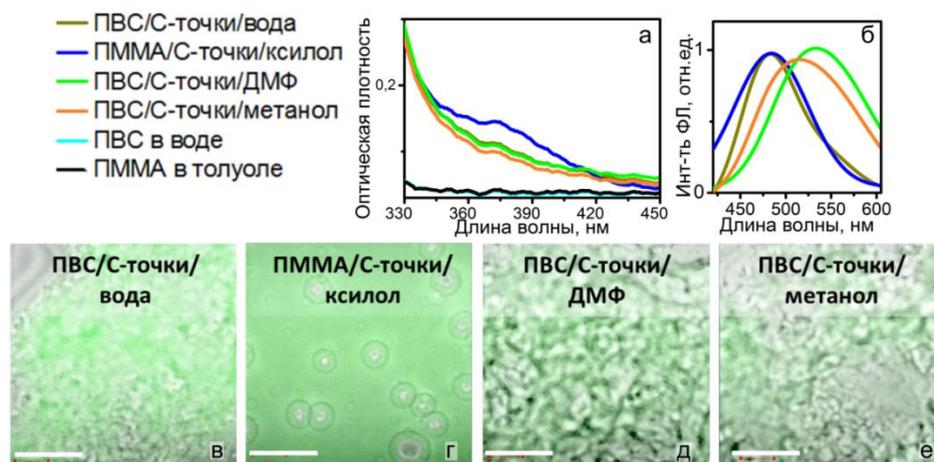


Рис. 2. Спектры поглощения (а) и ФЛ (б) и совмещенные ФЛ изображения с микрофотографиями в проходящем свете образцов тонких пленок (в–е). Размер шкалы 40 мкм

Далее была исследована кинетика затухания ФЛ полученных пленок с помощью ЛСМ MicroTime100 (PicoQuant), в котором реализован метод время-коррелированного счета одиночных фотонов. Возбуждение ФЛ происходило импульсным лазером с длиной волны 405 нм, частотой следования импульсов 5 МГц и мощностью 3,6 мкВт. Анализ двумерных карт распределения времен затухания ФЛ (рис. 3, а–г) также показал равномерное распределение сигнала ФЛ С-точек в полимерных пленках.

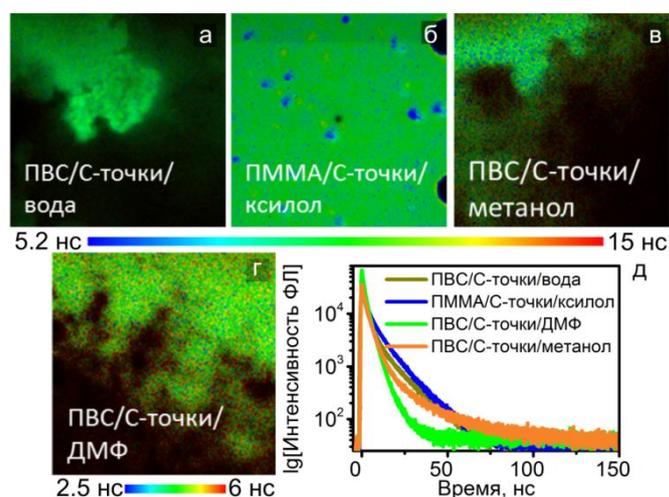


Рис. 3. Кинетика затухания ФЛ образцов полимерных пленок с внедренными С-точками. Размер карт 80×80 мкм, верхняя временная шкала относится к (а–в), нижняя – к (г)

Кривые затухания интегрального сигнала ФЛ представлены на рис. 3, д. Они были аппроксимированы биэкспоненциальной зависимостью, учитывающей собственную

излучательную рекомбинацию в С-точках, а также влияние взаимодействия с молекулами полимера на кинетику их люминесценции. Средневзвешенное время жизни ФЛ образцов было рассчитано по формуле:

$$\tau_{av} = \frac{\sum_i A_i \tau_i^2}{\sum_i A_i \tau_i},$$

где A_i и τ_i – амплитуда и время затухания i -й компоненты.

Значения рассчитанных времен затухания ФЛ образцов в сравнении со значениями, полученными для растворов С-точек, приведены в таблице.

Таблица. Оптические свойства наноструктурированных люминесцентных пленок

Образец	Пик ФЛ, нм; Δ , нм	τ_{av} в растворе, нс	τ_{av} , нс
ПВС/С-точки/вода	485, $\Delta=75$	3,9	8,7
ПММА/С-точки/ксилол	485, $\Delta=29$	9,8	8,7
ПВС/С-точки/ДМФ	530, $\Delta=5$	3,4	3,5
ПВС/С-точки/метанол	524, $\Delta=5$	4,9	6,7

Среднее время затухания ФЛ для образца ПВС/С-точки/ДМФ почти не изменилось по сравнению со значением для С-точек в растворе. В случае раствора С-точек в ксилоле, при внедрении в ПММА матрицу наблюдается незначительное уменьшение времени затухания ФЛ. Это обусловлено наличием областей (синие области на рис. 3, б) со временами затухания ФЛ, меньшими по сравнению с однородной пленкой. Авторы предполагают, что данные области соответствуют полостям внутри полимера с остаточным растворителем. При внедрении раствора С-точек в воду или метаноле в ПВС матрицу наблюдается увеличение среднего времени затухания ФЛ.

Такое изменение значений средних времен затухания ФЛ, вероятно, связано с иммобилизацией поверхностных групп и химических связей С-точек в результате взаимодействия с молекулярными цепочками полимера. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению колебательных и вращательных движений поверхностных групп атомов С-точек, отвечающих за безызлучательные каналы релаксации энергии фотовозбуждения. Уменьшение числа данных каналов приводит к увеличению или сохранению времен затухания ФЛ С-точек в полимерных матрицах в сравнении со значениями τ_{av} их исходных растворов.

В результате работы С-точки были успешно внедрены в полимерные матрицы. Полученные образцы наноструктурированных материалов обладают равномерным распределением сигнала ФЛ. Было определено, что внедрение С-точек в полимерные матрицы приводит к сохранению или увеличению значений времен затухания ФЛ. Полученные светоизлучающие наноструктурированные материалы на основе углеродных наноточек в полимерных матрицах могут быть применены в качестве активных сред при разработке устройств фотоники с улучшенными выходными характеристиками.

Литература

1. Jiang K. et al. Red, green, and blue luminescence by carbon dots: full-color emission tuning and multicolor cellular imaging // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2015. – V. 54. – № 18. – P. 5360–5363.
2. Sciortino A., Cannizzo A., Messina F. Carbon Nanodots: A Review – From the Current Understanding of the Fundamental Photophysics to the Full Control of the Optical Response // – 2018. – V. 4. – № 4. – P. 67.
3. Hola K. et al. Carbon dots – Emerging light emitters for bioimaging, cancer therapy and optoelectronics // *Nano Today*. – 2014. – V. 9. – № 5. – P. 590–603.
4. Zhu S. et al. Highly photoluminescent carbon dots for multicolor patterning, sensors, and bioimaging // *Angewandte Chemie*. – 2013. – V. 125. – № 14. – P. 4045–4049.

**Тонкаев Павел Андреевич**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, физико-технический факультет,
студент группы № Z4278Направление подготовки: 16.04.01 – Техническая физика

e-mail: pavel.tonkaev@metalab.ifmo.ru

**Зограф Георгий Петрович**

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, физико-технический факультет,
аспирантНаправление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия

e-mail: g.zograf@metalab.ifmo.ru

**Макаров Сергей Владимирович**

Год рождения: 1988

Университет ИТМО, физико-технический факультет,
к.ф.-м.н., ст.н.с.

e-mail: s.makarov@metalab.ifmo.ru

УДК 538.95

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ СДВИГ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ
ОХЛАЖДЕНИИ ПЕРОВСКИТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ НАНОЧАСТИЦ****Тонкаев П.А., Зограф Г.П., Макаров С.В.****Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. Макаров С.В.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 370044 «Органо-неорганические материалы с интегрированными нанофотонными структурами для перспективных оптических устройств».

В работе теоретически продемонстрирован сдвиг фотолюминесценции для одиночной резонансной сферической наночастицы MAPbI_3 , определяемый понижением температуры вследствие лазерного охлаждения. Показана возможность настройки спектра фотолюминесценции с помощью изменения мощности лазера накачки.

Ключевые слова: лазер, ап-конверсия, охлаждение, фотолюминесценция, наночастицы, гибридные перовскиты, нанофотоника, резонансы Ми, наноантенны.

Одной из проблем современной нанофотоники является создание наноразмерных источников света [1]. Сложной задачей остается эффективное управление и контроль диаграммы направленности излучения, несмотря на попытки сделать это специальным дизайном. Среди наиболее часто используемых активных источников света – наночастицы с активными дефектами [2] и излучатели на квантовых точках [3]. Обычные методы маршрутизации света часто требуют сложного многоступенчатого изготовления, что достаточно увеличивает затраты на производство и затрудняет практическое применение. Одним из способов также является расположение наноантенны вблизи источника света [4],

что делает всю систему восприимчивой к химическому загрязнению и механическому воздействию.

С другой стороны, было обнаружено, что наночастицы, изготовленные из органо-неорганических перовскитных материалов $\text{MAPb}(\text{I}, \text{Br})_3$, могут поддерживать Ми-резонанс в видимом диапазоне, тем самым усиливая и направляя излучение фотолюминесценции наноантенны [5]. Кроме того, можно настроить фотолюминесценцию на весь видимый диапазон, изменяя состав перовскита. Из-за сильной экситон-фононой связи в свинцово галоидных перовскитах наблюдали лазерное охлаждение, которое влияет на спектральное положение пика фотолюминесценции [6].

В данной работе авторы теоретически исследовали спектральный сдвиг фотолюминесценции, индуцированный лазерным охлаждением резонансной наночастицы MAPbI_3 . Предполагается, что такой подход является перспективным для создания источников света с настраиваемой длиной волны.

Под лазерным охлаждением понимается процесс понижения температуры вещества при излучении квантов света с энергией больше поглощенной. Эффективность этого процесса определяется соотношением радиационных и нерадиационных времен релаксации носителей заряда. Для нерадиационных потерь существует два канала: безызлучательная рекомбинация на дефектах и Оже-рекомбинация. Первый линейно зависит от числа электронно-дырочных пар, второй – кубически. Радиационная релаксация пропорциональна числу электронов и числу дырок, следовательно, пропорциональна квадрату числа генерируемых носителей. Для достижения оптического охлаждения важно добиться преобладания излучательной рекомбинации над безызлучательной.

В работе [7] было показано, что скорость излучения диполя, помещенного внутрь диэлектрической сферы, может быть увеличена в несколько раз по отношению к диполю, излучающему в вакууме. Такое уменьшение времени радиационной релаксации возможно при радиусе наносферы, удовлетворяющему условию возбуждения резонанса Ми. С другой стороны, в наночастице размера, сопоставимого с длиной волны падающего излучения, индуцируется особая конфигурация электромагнитного поля, которая позволяет более эффективно поглощать свет. Баланс этих двух эффектов определяет возможность и эффективность лазерного охлаждения Ми-частиц.

Учитывая эффекты, описанные выше, кинетическое уравнение для плотности носителей заряда, генерируемых лазерным излучением, запишется в виде [8]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\sigma_{abs} I}{V \hbar \omega} - AN - F_p BN^2 - CN^3, \quad (1)$$

где N – плотность носителей заряда; I – интенсивность света; V – объем наночастицы; ω – частота света; σ_{abs} – сечение поглощения наночастицы; F_p – относительная скорость излучения; A , B и C – рекомбинационные константы для объемного материала, соответствующие нерадиационному, радиационному и Оже-процессам, соответственно.

Решение уравнения (1) в стационарном случае определяет концентрацию сгенерированных светом носителей заряда N . Коэффициент лазерного охлаждения, характеризующий эффективность охлаждения, запишется в виде [8]:

$$\eta_c = \frac{F_p BN^2}{AN + F_p BN^2 + CN^3} \frac{\hbar \omega_{ph}}{\hbar \omega} - 1, \quad (2)$$

где ω – частота света лазера накачки; ω_{ph} – частота излученного света. На рис. 1 представлено рассчитанное значение коэффициента оптического охлаждения для сферической наночастицы MAPbI_3 для интенсивности лазера 10 кВ/см^2 . Зеленые пунктирные линии соответствуют собственным модам сечения поглощения для наносферы, рассчитанные по теории Ми: MD – магнитный диполь, MQ – магнитный квадруполь и MO – магнитный октоуполь. Черными пунктирными линиями обозначены моды излучения, которые не зависят от длины волны поглощенного света. Расчет произведен согласно теории, изложенной в работе [7]. Как можно видеть максимальные значения коэффициента лазерного охлаждения наблюдается на

пересечении мод поглощения и излучения, что соответствует случаю, когда наночастица резонансно поглощает свет на одной моде, а затем резонансно переизлучает на моде старшего порядка.

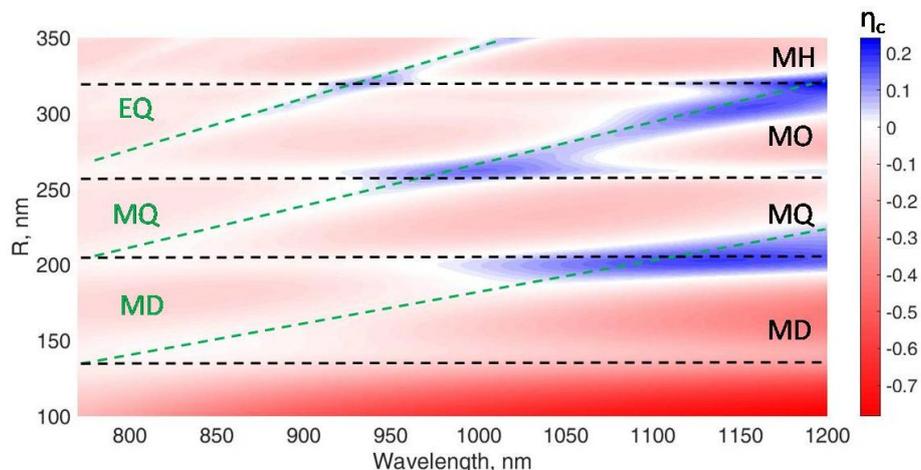


Рис. 1. Коэффициент оптического охлаждения для наносферы MAPbI_3 в зависимости от ее радиуса и длины волны накачки. Черные линии – моды скорости излучения, зеленые – моды эффективности поглощения

Из рис. 1 определяем радиус наночастицы и длину волны лазера накачки, при котором возможно оптическое охлаждение: $R=330$ нм и $\lambda=940$ нм. Соответственно эти значения используются в дальнейших расчетах по изменению температуры и спектрального сдвига.

Решение уравнения теплопроводности для охлаждения, индуцированного светом, дается выражением [9]:

$$\Delta T = -\frac{\eta_c I \sigma_{abs}}{4\pi\kappa R}, \quad (3)$$

где I – интенсивность света; σ_{abs} – сечение поглощения наночастицы; κ – теплопроводность окружающей среды; η_c – коэффициент оптического охлаждения; R – радиус наночастицы.

В зависимости от интенсивности света лазера накачки был произведен расчет коэффициента охлаждения по формуле (2), а затем на его основе по формуле (3) вычислено изменение температуры наночастицы. Как было сказано ранее, изменение температуры приводит к спектральному сдвигу фотолюминесценции: на рис. 2, а, представлена зависимость длины волны фотолюминесценции в зависимости от температуры из работы [6]. При помощи данной зависимости вычислялась длина волны фотолюминесценции наносферы для интенсивностей лазера накачки в диапазоне 10^2 – 10^6 В/см².

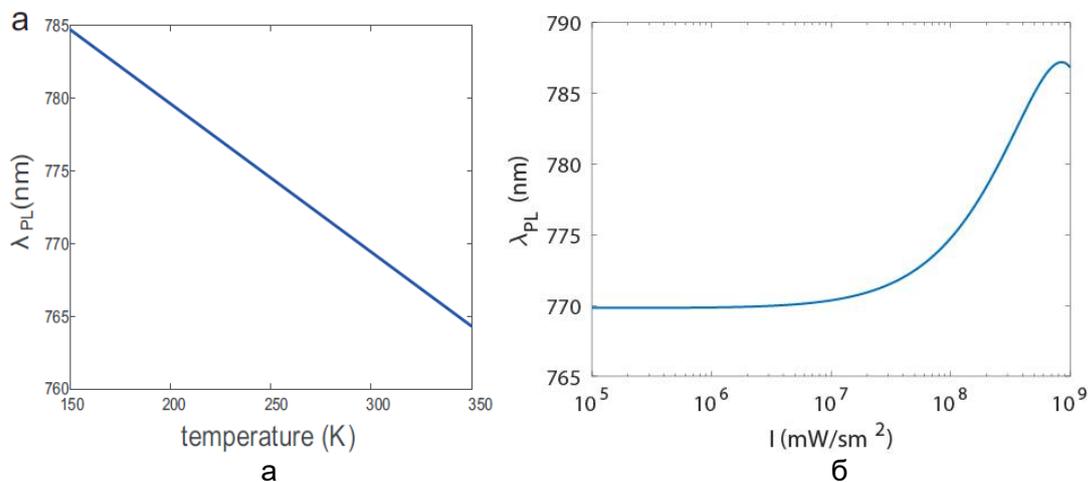


Рис. 2. Длина волны максимума люминесценции MAPbI_3 в зависимости от температуры (а); спектральный сдвиг фотолюминесценции наносферы MAPbI_3 вследствие лазерного охлаждения в зависимости от интенсивности (б)

Результат расчета изменения спектрального положения максимума фотолюминесценции представлен на рис. 2, б. Изменяя интенсивность лазера накачки, удалось изменить длину волны люминесценции в диапазоне 770–787 нм. Как видно из рис. 2, б, при небольших интенсивностях температура наносферы не меняется. При высокой интенсивности эффект лазерного охлаждения уменьшается, так как начинает проявляться Оже-рекомбинация.

Таким образом, теоретически была продемонстрирована способность лазерного охлаждения резонансных наночастиц MAPbI_3 с возможностью точной настройки их спектров фотолюминесценции, что делает такие структуры перспективной платформой для создания перестраиваемых наноантенн.

Литература

1. Tame M.S., McEneaney K., Ozdemir S., Lee J., Maier S. and Kim M. Quantum Plasmonics // *Nature Physics*. – 2013. – V. 9. – P. 329–340.
2. Zalogina A., Saveliev R., Ushakova E.V., Zograf G.P., Komissarenko P., Milichko V., Makarov S., Zuev D., Shadrivov I. Purcell effect in active diamond nanoantennas // *Nanoscale*. – 2018. – V. 10. – P. 8721–8727.
3. Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R. and van Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna // *Science*. – 2010. – V. 329. – P. 930–933.
4. Krasnok A.E. et al. All-dielectric optical nanoantennas // *Optics Express*. – 2012. – V. 20. – № 18. – P. 20599–20604.
5. Tiguntseva E.Y., Zograf G.P., Komissarenko F.E., Zuev D.A., Zakhidov A.A., Makarov S.V. and Kivshar Y.S. Light-Emitting Halide Perovskite Nanoantennas // *Nano letters*. – 2018. – V. 18. – P. 1185–1190.
6. Ha S.T., Shen C., Zhang J. and Xiong Q. Laser cooling of organic–inorganic lead halide perovskites // *Nature Photonics*. – 2016. – V. 10. – P. 115.
7. Chew H. Radiation and lifetimes of atoms inside dielectric particles // *Physical Review A*. – 1988. – V. 38. – № 7. – P. 3410.
8. Sheik-Bahae M., Epstein R.I. Can laser light cool semiconductors? // *Physical review letters*. – 2004. – V. 92. – № 24. – P. 247403.
9. Baffou G., Quidant R. Thermo-plasmonics: using metallic nanostructures as nano-sources of heat // *Laser & Photonics Reviews*. – 2013. – V. 7. – № 2. – P. 171–187.

СОДЕРЖАНИЕ

Направление «ФОТОНИКА»	4
Аверьянов В.А. Критический обзор оптико-электронных методов и средств контроля качества пчелиного меда	5
Alkhalil G. Peculiarities of porous glasses doped with As ₂ S ₃ nanoparticles	8
Ахмеров А.Х. Исследование современных методов контроля состояния тепловых сетей....	11
Колотаев Ф.С., Бурункова Ю.Э. Формирование нелинейно-оптической среды на основе органических кристаллов DAST	15
Ле Куок Фам, Успенская М.В. Самоармированные полимерные композиты на основе полипропилена.....	17
Мельникова М.В. Оптико-электронные методы и средства исследования поверхности лесных массивов	23
Нгуен Д.Т. Разработка структурной схемы всепогодного импульсного лазерного высотомера малых высот до морской поверхности	27
Пихота Н.С. Оптико-электронные информационно-измерительные системы на основе анаморфотного компонента	34
Поскребышева О.О. Влияние распределения света на эмоциональное восприятие интерьерного пространства	37
Святлович Е.В. Изучение влияния естественного света на работоспособность при изменяющемся соотношении яркостей в поле зрения	42
Снетков П.П., Нигматуллина Р.И., Успенская М.В. Особенности получения нановолокон на основе гиалуроновой кислоты методом электроформования.....	48
Дудко Ю.Ю., Липницкая С.Н. Исследование светорассеяния в оптических покрытиях светодиодных устройств	54
Щедрина Н.Н., Москвин М.К., Лутошина Д.С. Получение плазмонных цветов на поверхности драгоценных металлов	57
Соколов П.П., Ворзובה Н.Д. Исследование процессов формирования трехмерных объектов голографическими методами и их характеристик.....	61
Степаниденко Е.А., Арефина И.А., Черевков С.А., Дубовик А.Ю., Xiong Y., Ушакова Е.В., Баранов А.В., Фёдоров А.В., Rogach A.L. Создание наноструктурированных материалов на основе полимеров и углеродных точек	64
Тонкаев П.А., Зограф Г.П., Макаров С.В. Спектральный сдвиг фотолюминесценции при лазерном охлаждении перовскитных резонансных наночасти.....	68

**АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО
Том 4**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Редактор

Л.Н. Точилина

Подписано к печати 10.10.2019

Заказ № 4239

Тираж 100 экз.