

**СБОРНИК РАБОТ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Сборник работ студентов Университета ИТМО,
победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2017

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 156 с.

Сборник содержит работы студентов Университета ИТМО, удостоенных премии Правительства Санкт-Петербурга, победителей конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Научные отчеты по результатам выполнения грантов издаются с целью демонстрации достижений аспирантов университета, стимулирования их участия в научных исследованиях, повышения качества подготовки специалистов с высшим образованием и формирования резерва для кадров высшей квалификации.



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.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017

Авторы, 2017



*На церемонии награждения победителей конкурса грантов – студентов
Университета ИТМО. В центре ректор В.Н. Васильев*

В настоящее время Университет ИТМО располагает научными кадрами и развитой инновационной инфраструктурой, что позволяет проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в Российской Федерации. Студенты университета принимают активное участие в решении многих сложных задач как прикладных, так и фундаментальных.

Важную роль в поддержке научных исследований молодежи играет ежегодный конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Конкурс, в котором на протяжении 16 лет участвуют студенты Университета ИТМО, проводится Комитетом по науке и высшей школе при Правительстве Санкт-Петербурга. Наш университет занимает второе место среди вузов города по количеству поданных и выигранных заявок. В 2016 году студентами нашего вуза было подано 232 заявки, из них выиграно 43.

Совмещение фундаментальных и прикладных исследований и разработок с образовательным процессом служит основой для повышения качества подготовки молодых ученых и специалистов высшей квалификации. В настоящий сборник вошли работы студентов – победителей конкурса грантов 2016 года. Они демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых студентами университета под руководством ведущих ученых вуза.

Проректор д. т. н., проф. В.О. Никифоров



Аксенова Ольга Игоревна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра процессов и аппаратов пищевых производств
E-mail: oks280491@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА МАТРИЦЫ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСТРУЗИИ

О.И. Аксенова

Научный руководитель – профессор Г.В. Алексеев

Введение

Основным направлением развития пищевой промышленности в настоящее время является интенсификация производственных процессов, во время которых происходит изменение физико-химических свойств исходного сырья под действием рабочих органов аппаратов. Одним из таких процессов является экструзия.

По итогам 2015 года наиболее популярными экструдированными продуктами (по запросам, поступившим в компанию ОАО «Апрель», Санкт-Петербург) стали: сухие завтраки, корма для кошек, собак и рыб, коэкструзионные продукты питания, соевый текстурат, пеллеты для производства чипсов, модифицированный крахмал. Впервые возникла необходимость разработки технологии для экструзии пророщенного зерна, а также отходов бисквита.

Высокий спрос среди населения на экструдированные продукты питания обусловлен их хорошими органолептическими свойствами, повышенной усвояемостью и высокой пищевой ценностью.

Как показал анализ, большинство предприятий, производящих экструзионные продукты питания на территории Санкт-Петербурга, используют импортное экструзионное оборудование: для производства макаронных изделий – экструдеры марок *POLYtwin (Buster, Швеция)*, *DLG100 (Jinan DG, Китай)* и *DS56-III (SAIXIN, Франция)*; для производства кормов – экструдеры марок *ES-20 (S100, Чехия)*, для производства продуктов переработки соевых бобов – экструдеры марок *E-250 и E-1000 (ЕККО, Украина)* и для производства закусочных продуктов – экструдеры марок *Jarwo BV (США)*, *SPPH (Китай)*.

Импортное оборудование гарантирует петербургским производителям продуктов наличие высококвалифицированной технической поддержки, надежную и безотказную работу с длительным сроком эксплуатации. Однако цена его обслуживания очень высока. Кроме того, в сложившихся условиях импортозамещения закупка новых технологических линий за рубежом и комплектующих к уже используемым импортным линиям становится затруднительной.

Петербургские производители экструдированных продуктов питания, использующие российское оборудование, отдали предпочтение экструдерам ШТАК-50М и ШТАК-80 компании «Апрель»; ЕЗ-110 компании ООО «БалтАгроСнаб СПб»; А-30, А-92-5 компании «Алмаз»; К-200 компании «Доза-Агро» и ЭТР компании «РосЭкструдер».

Однако большинство из этих экструдеров считаются морально устаревшими, они не позволяют добиваться стабильного высокого качества выпускаемой продукции, имеют однотипные конструкции и схожие технические характеристики. Проведение производственного эксперимента для внедрения нового вида продукта для расширения выпускаемого ассортимента изделий и для отработки технологических режимов

производства с целью повышения ресурсосбережения на предприятиях на данном оборудовании практически невозможно [1, 2].

По результатам мониторинга российской экструзионной техники, была выявлена необходимость конструирования нового современного отечественного экструзионного оборудования, а также модернизации существующего оборудования на основании внедрения усовершенствованных отдельных рабочих органов экструдеров, которые обеспечивали бы высокое качество экструдированных продуктов и возможность создания поточно-механизированных линий, способных к производству широкой номенклатуры изделий.

В настоящее время большинство экструдированных продуктов питания, в том числе и на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области, производится из текстуратов, полученных методами термопластической экструзии. Однако технологические требования, предъявляемые к ним, включают дальнейшую обработку на измельчительном и сортировочном оборудовании. Это обусловлено неспособностью термопластической экструзии обеспечить заданный размер частиц текстурированной смеси. В связи с этим появляется необходимость разработки формирующих устройств экструзионного оборудования (матриц), более эффективных при производстве текстуратов экструдированных продуктов питания. Эту проблему позволяет решить применение динамических матриц экструдеров, которые в настоящее время используются недостаточно широко из-за ряда недостатков.

Цель работы – совершенствование матрицы для динамической экструзии пищевых продуктов.

Матрица для динамической экструзии

В ходе выполнения исследования была создана новая конструкция матрицы для динамической экструзии пищевых продуктов питания, а также разработан математический аппарат, позволяющий проектировать конструкции таких матриц с наибольшей эффективностью.

Конструкция разработанной матрицы для динамической экструзии представлена на рис. 1. Она состоит из двух металлических цилиндров одинакового диаметра, расположенных на одной оси. Нижний неподвижный цилиндр (2) имеет четыре отверстия круглого сечения, размещенные параллельно оси. У верхнего подвижного цилиндра (1) два отверстия криволинейной формы, находящихся под углом α к плоскости прессования. Для неподвижного крепления верхней матрицы на оси предусмотрен шпоночный паз (вид В-В), для фиксации матрицы в корпусе экструдера у нижнего (разгрузочного) цилиндра есть выступы (вид Г-Г). Верхний цилиндр вращается с определенной угловой скоростью ω . Таким образом, выпрессовывание текстурата через динамическую матрицу экструдера возможно только через два отверстия в момент времени t , когда отверстия двух матриц совпадают. Текстурированная сырьевая смесь, нагнетаемая шнеком экструдера, поступает в отверстия верхнего цилиндра и заполняет их до момента, пока отверстия нижней матрицы не совпадут с отверстиями верхней. В этот момент смесь продавливается через два отверстия нижнего цилиндра. При дальнейшем повороте совпадет другая пара отверстий матрицы, и процесс повторяется. Таким образом, проходное сечение матрицы остается постоянным, следовательно, как и давление в нагнетаемой полости экструдера, что позволяет получить продукт с одинаковыми физико-механическими свойствами.

Математический аппарат

Рассмотрим динамическую матрицу разработанной конструкции как кинематическую систему [3]. Согласно теореме об изменении главного момента количества движений механической системы (об изменении кинетического момента):

$$\frac{d\bar{K}_O}{dt} = \sum_{k=1}^n m_{e_{m_o}}(\bar{F}_k^e), \quad (1)$$

где \overline{K}_0 – кинетический момент механической системы; t – время, за которое изменяется кинетический момент механической системы; $\sum_{k=1}^n m_{e_{m_0}}(\overline{F}_k^e)$ – геометрическая сумма всех моментов сил системы относительно центра O , где индекс e показывает, что учитываются только внешние силы.

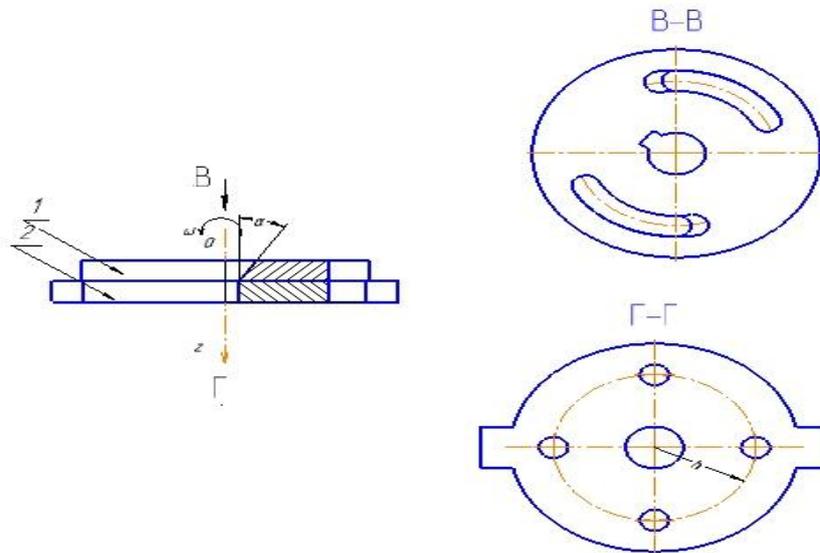


Рис. 1. Матрица для динамической экструзии

Спроектируем данное уравнение на координатные оси. Расположение координатных осей, углов и силы F в соответствии с рис. 2:

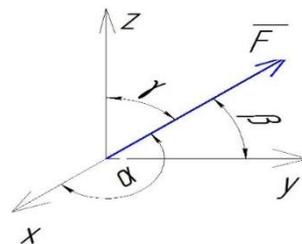


Рис. 2. Расположение координатных осей

Уравнение (1) в проекции на ось Oz :

$$\frac{dK_z}{dt} = \sum_{k=1}^n m_z(\overline{F}_k^e). \quad (2)$$

Кинетический момент относительно оси Oz можно представить в виде произведения момента инерции тела относительно этой оси на угловую скорость тела: $K_z = J_z \omega$, где ω – угловая скорость вращения тела; J_z – момент инерции тела относительно оси Oz .

Подставив данное выражение в уравнение (2), получим:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = \sum_{k=1}^n m_z(\overline{F}_k^e). \quad (3)$$

Раскрывая сумму моментов внешних сил системы относительно оси Oz , имеем:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = m_z(\overline{F}_{\text{тр}}) + m_z(\overline{F}), \quad (4)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения.

Спроектировав силу F на координатные оси (рис. 2), получим:

$$F_x = F \cos \alpha, \quad F_y = F \cos \beta, \quad F_z = F \cos \gamma.$$

Если проекция силы F на ось y пересекает ось Oz , то момент этой составляющей относительно оси будет равен нулю: $m_z(F_y) = 0$. Так как проекция силы F на ось z

параллельна оси Oz , момент этой составляющей относительно оси Oz будет равен нулю: $m_z(F_z) = 0$. Момент составляющей силы F_x относительно оси Oz равен: $m_z(F_x) = F_x h$, где h – расстояние от оси вращения до центра отверстий верхнего цилиндра (рис. 1).

Подставляя полученные проекции в уравнение (4), получим:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = F_x h. \quad (5)$$

Проинтегрировав (5) от начального момента времени $t_0 = 0$ до t , от начальной скорости вращения $\omega_0 = 0$ до скорости проведения процесса ω , получим:

$$J_z \int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = F_x h \int_{t_0}^t dt.$$

Результат интегрирования:

$$J_z \omega = F_x h t.$$

Момент инерции цилиндров относительно оси вращения Oz может быть представлен как разница моментов инерции относительно оси вращения Oz цельного тела цилиндрической формы и момента инерции относительно оси произвольного направления отверстий (рис. 3), так как цилиндры динамической матрицы представляют собой тела сложной конфигурации:

$$J_z = J_{\text{б}_z} - J_{\text{от}_z}$$

Момент инерции относительно оси произвольного направления отверстий имеет вид:

$$J_{\text{от}_z} = J_{x_1} \cos^2 \alpha + J_{y_1} \cos^2 \beta + J_{z_1} \cos^2 \gamma - 2J_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2J_{yz} \cos \beta \cos \gamma - 2J_{xz} \cos \alpha \cos \gamma.$$

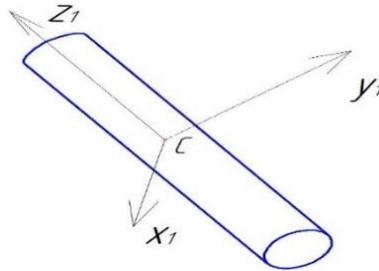


Рис. 3. Расположение вспомогательных координатных осей при рассмотрении отверстий нижнего цилиндра, где C – центр масс фигуры

Так как оси x_1, y_1, z_1 являются главными осями инерции тела (рис. 3), то:

$$J_{xy} = J_{yz} = J_{xz} = 0.$$

Тогда момент инерции относительно оси произвольного направления отверстий равен:

$$J_{\text{от}_z} = J_{x_1} \cos^2 \alpha + J_{y_1} \cos^2 \beta + J_{z_1} \cos^2 \gamma.$$

Задаваясь геометрическими параметрами матрицы для динамической экструзии, входящими в данную систему уравнений, и варьируя диапазон их изменений, можно рассчитать угол наклона α для заданной геометрии матрицы, при котором будет достигаться максимальная эффективность работы экструзионного оборудования.

Заключение

Проведенный в работе анализ конструкций современного экструзионного оборудования, выпускаемого и используемого для производства экструдированных продуктов питания на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, подтвердил необходимость создания и внедрения на предприятиях нового типа экструзионного оборудования с динамической матрицей.

В процессе выполнения проекта разработана конструкция матрицы для динамической экструзии пищевых продуктов, которая позволяет получать текстураты стабильного заданного качества. Создана математическая модель, позволяющая проектировать конструкции матриц, способствующих достижению наибольшей эффективности

экструзионного процесса в зависимости от конструктивно-технологических особенностей оборудования и физико-механических свойств текстуратов.

Разработанный способ производства пищевых продуктов на экструзионном оборудовании с динамической матрицей и ее модель оригинальной конструкции с приведенным расчетом основных конструкционных параметров могут быть использованы для модернизации производственной и лабораторной экструзионной техники, выпускаемой и применяемой на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области для получения текстуратов повышенного качества без проведения дополнительных технологических операций.

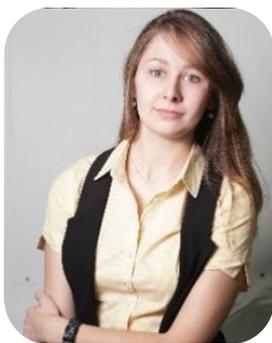
В настоящий момент осуществляются работы по апробации опытного образца матрицы предложенной конструкции, по результатам которых подана заявка на изобретение № 2016110046 «Закусочный продукт» от 18.03.2016. На разработанную конструкцию матрицы после апробации в опытно-промышленных условиях также будет оформляться заявка на патент.

Публикации

1. Аксенова О.И., Алексеев Г.В. Корректирование расчетов оборудования для снижения его энергоемкости на базе моделирования технологического процесса экструдирования // Техника машиностроения. 2015. Т. 22. № 3. С. 27–37.
2. Аксенова О.И., Алексеев Г.В. Разработка конструкции матрицы для динамической экструзии и ее математическое обоснование // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 4 (26). С. 73–79.
3. Аксенова О.И., Алексеев Г.В. Возможности моделирования оборудования для снижения энергоемкости реализуемых технологических процессов // Вестник Международной академии холода. 2015. № 4. С. 49–54.
4. Аксенова О.И. Технические средства для получения полуфабрикатов корпуса и начинки для экструдированных пищевых продуктов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2. С. 35–43.
5. Аксенова О.И. Анализ экструзионной техники, применяемой в пищевой промышленности // Техника и технологии: роль в развитии современного общества: Сборник трудов по материалам II международной научно-практической конференции. Краснодар, 2013. С. 32–34.
6. Заявка на изобретение № 2016110046. Закусочный продукт / О.И. Аксенова, Г.В. Алексеев и др. Опубл. 18.03.2016.

Литература

1. Абрамов О.В. Научное обеспечение процесса экструзии модельных сред на основе крахмалсодержащего сырья и разработка высокоэффективного оборудования для его реализации: дис. ... докт. техн. наук. Воронеж, 2009. – 600 с.
2. Рудой Д.В. Исследование технологического процесса и определения рациональных параметров шнекового экструдера для производства комбикормов: автореф. дис. канд. тех. наук. Ростов-на-Дону, 2015. – 20 с.
3. Первадчук В.П. и др. Теория и численный анализ процессов плавления в пластицирующих экструдерах // Теплообмен – ММФ: Тезисы докладов Минского международного форума. Т. 6. Теплообмен в реологически сложных системах. Минск, 1988. С. 107–113.



Андреева Ярослава Михайловна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: andreeva.ym@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЗАЩИТЫ ПРОДУКЦИИ ОТ ФАЛЬСИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Я.М. Андреева

Научный руководитель – научный сотрудник Г.В. Одинцова

Актуальная проблема производителей и потребителей – защита товаров от фальсификации. Существует большое количество технологий защиты от подделок, начиная от простейших элементов «да/нет» на наличие элемента подлинности до более сложных вариантов, которые могут использоваться для идентификации линеек продукции, партий или отдельных высокотехнологичных продуктов. Среди них физико-химические и полиграфические элементы защиты, технологии с использованием люминесцентных композиций и мозаичного кодирования, криптографические методы, радиочастотная и буквенно-цифровая маркировки [1]. Однако перечисленные методы зачастую не могут гарантировать надежную защиту изделия, так как с их развитием совершенствуются и методы подделки защитных элементов. Поэтому необходимо как совершенствовать уже известные методы защиты, так и создавать новые. Для решения этой задачи в работе рассматривается способ лазерной модификации поверхности.

Цель данного исследования – разработка нового эффективного метода защиты металлической продукции от фальсификации с помощью нанесения защитных знаков на ее поверхность путем локальной лазерной обработки наносекундными импульсами.

Разработанный метод является уникальным, так как обладает несколькими степенями защиты. На поверхность металлического изделия наносятся различные изображения, знаки или символы, меняющие свои оптические свойства в зависимости от угла наблюдения. Они обладают оригинальной микроструктурой, что позволяет записывать скрытые знаки или текстуры и может считаться вторым уровнем защиты.

В качестве образцов использовались пластины нержавеющей стали марки 08X18H10, хромированной стали ШХ15 и технического титана ВТ1-0. Источником излучения служил волоконный иттербиевый лазер, оснащенный двухосевым сканирующим устройством (длина волны 1,064 мкм; длительность импульса изменяется в диапазоне 4–100 нс; частота следования – до 99 кГц; средняя выходная мощность 20 Вт).

Появление уникальных оптических свойств связано с двумя механизмами взаимодействия излучения с веществом, которым в данном случае являются металлы. Первый из них относится к локальному лазерному окислению поверхности под воздействием интенсивного лазерного излучения. Цветные изображения и логотипы создаются с высоким разрешением (порядка диаметра лазерного пучка), и в отдельных случаях их можно считать элементом декора изделия. При этом появление цвета непосредственно связано с образованием на поверхности тонкой оксидной пленки, в которой происходит интерференция света [2]. При наблюдении таких картин под разными углами можно заметить существенное изменение цветового тона отдельных частей, которое регистрируется приемником и, следовательно, может применяться в приборах типа «запись – считывание».

В ходе выполнения работы были исследованы режимы окисления поверхности металлов при наносекундном лазерном воздействии. Замечено, что визуально наблюдаемый

цвет поверхности будет изменяться в зависимости от угла наблюдения. Чтобы выяснить и эти параметры, были измерены спектры отражения пластин до и после лазерной обработки (рис. 1).

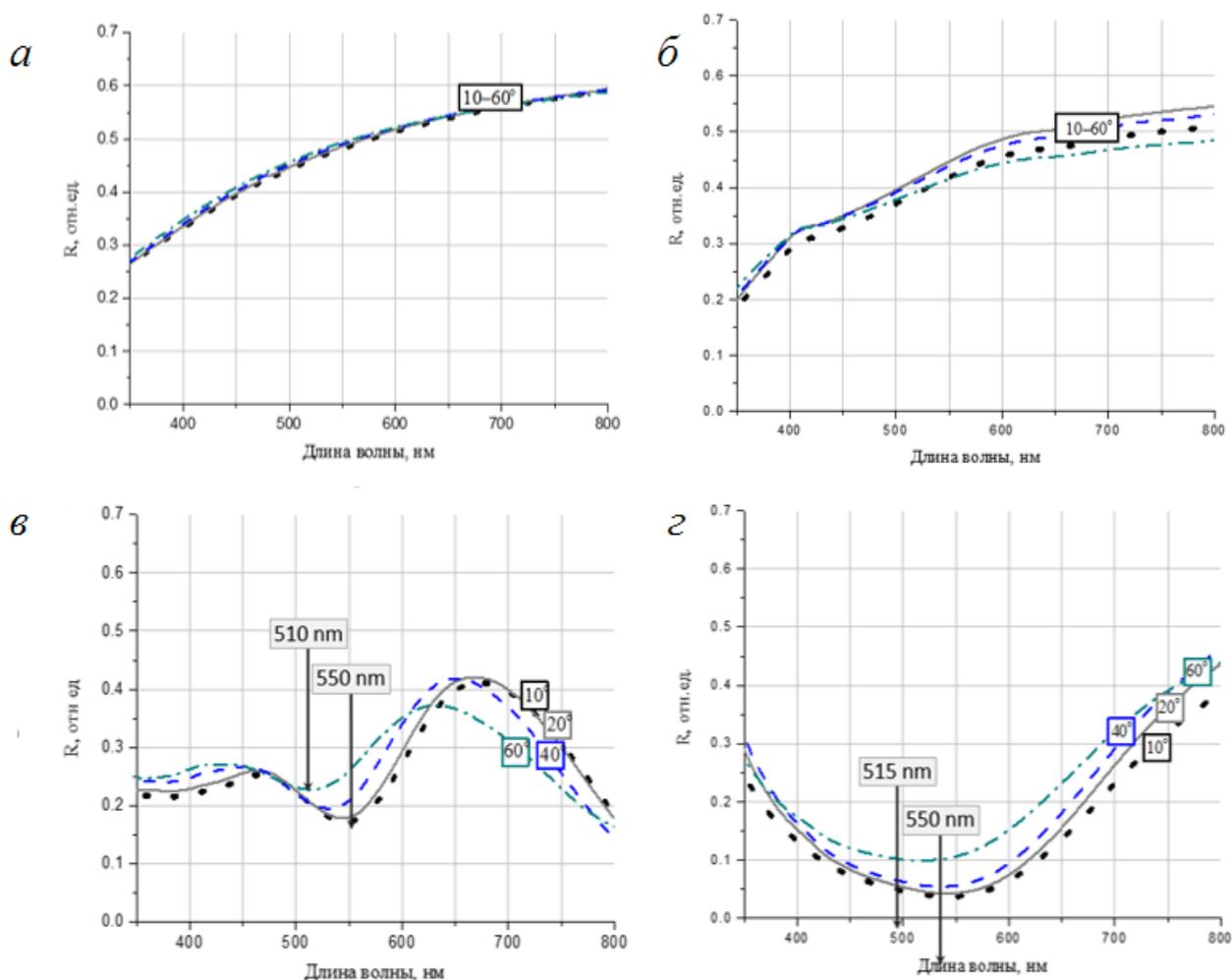


Рис. 1. Спектры отражения нержавеющей стали и технического титана при разных углах освещения: а, б – нержавеющая сталь; в, г – технический титан

Из рисунка видно, что у спектров материалов после обработки (рис. 1в, 1г) происходит значительное смещение локального минимума как для нержавеющей стали, так и для титана, что свидетельствует об изменении визуально наблюдаемого цвета. При этом внешний вид кривых остается неизменным, а спектры смещаются в ультрафиолетовую область практически параллельно. До обработки поверхностей лазером (рис. 1а, 1б) происходит лишь небольшое изменение коэффициента отражения, характерное больше для титана, чем для стали.

Рис. 2 иллюстрирует этот эффект для образца нержавеющей стали, сфотографированного при двух разных углах освещения поверхности. Как можно заметить, цвет поверхности неодинаков, но во всех случаях меняется равномерно, например с красного на желтый, как показано на образцах 3 и 4. На рис. 2в представлена оптическая микрофотография поверхности стали. Получаемый оксидный слой неоднороден по толщине из-за неравномерности распределения интенсивности по сечению пучка, что влияет на визуально наблюдаемый цвет (рис. 3).

Кроме того, поверхность под оксидом также не является однородной – лазерный нагрев инициирует образование дополнительных неровностей, что доказывают результаты зондовой микроскопии, представленные на рис. 3. Попадая на дефекты поверхности, свет рассеивается

на них неодинаково, при этом в некоторых зонах происходит многократное переотражение и преломление его в материале оксида.

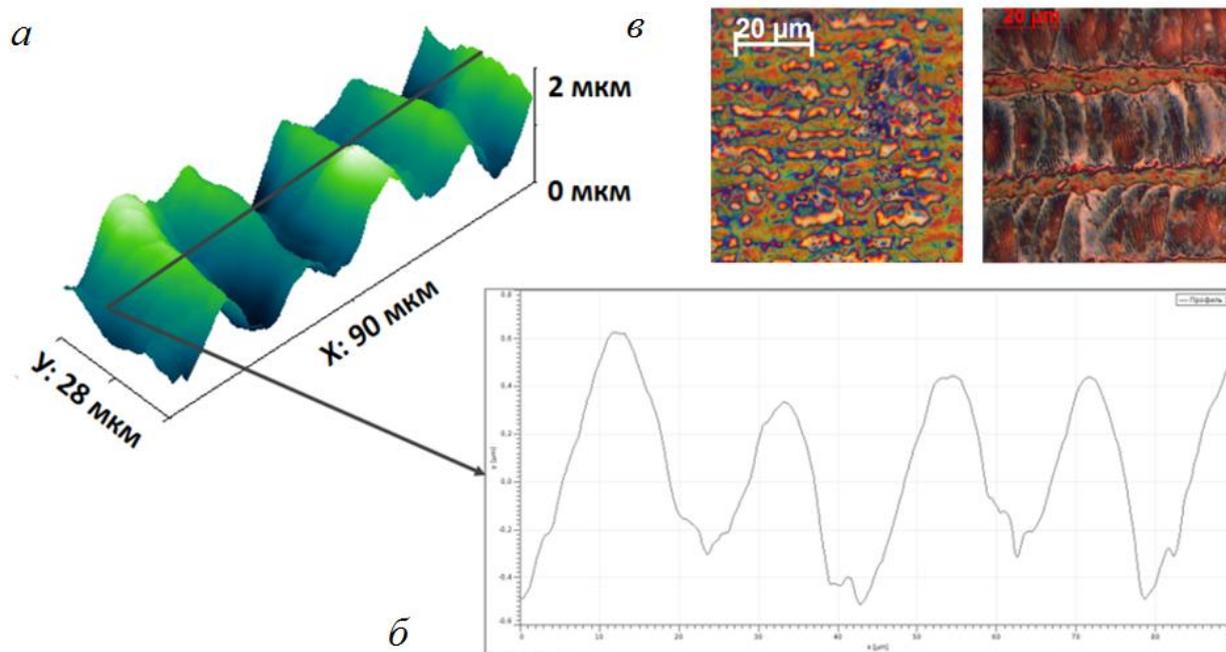


Рис. 2. Фотографии образцов при угле освещения: а – 10° , б – 45° , в – микрофотография образца

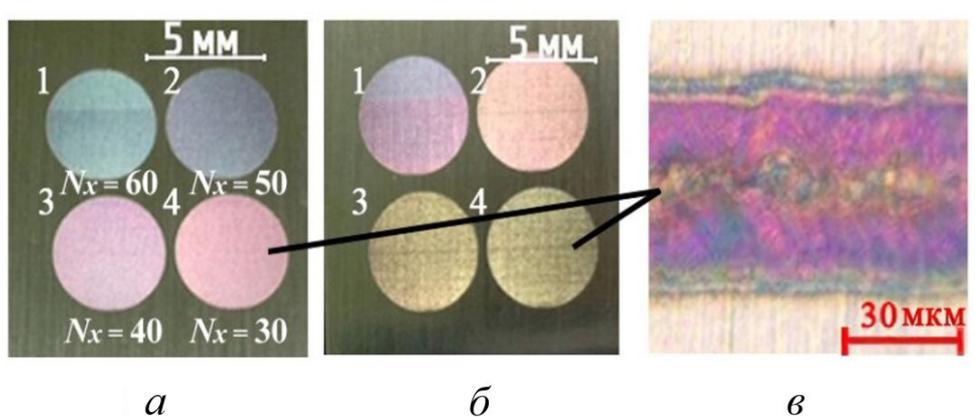


Рис. 3. Результаты зондовой микроскопии: а – трехмерное изображение поверхности образца нержавеющей стали после обработки, б – поперечный профиль структуры, в – микрофотографии образца

Изменение цвета поверхности металла в зависимости от угла падения/наблюдения связано с обнаруженной неоднородностью. Этот эффект можно использовать, измеряя спектры отражения метки под разными углами в контрольных точках и сравнивая их с шаблоном. При несовпадении результатов можно говорить о не оригинальности метки.

Второй рассмотренный в проекте способ нанесения защитных меток на поверхность [3] связан с образованием поверхностно-периодических структур, возникающих при облучении некоторых металлов излучением волоконного лазера со случайной поляризацией выходящего сигнала. Формируются они в результате образования поверхностных плазмон-поляритонов на границе с тонким оксидным слоем. При определенных условиях у таких структур проявляются свойства фазовой дифракционной решетки. Например, на поверхности хромированной стали были сформированы периодические структуры порядка 1 мкм, что соответствует длине волны лазерного излучения, которые меняют свой цвет

в зависимости от угла рассмотрения. Микрофотография со сканирующего электронного микроскопа и фотография готовой метки показаны на рис. 4.

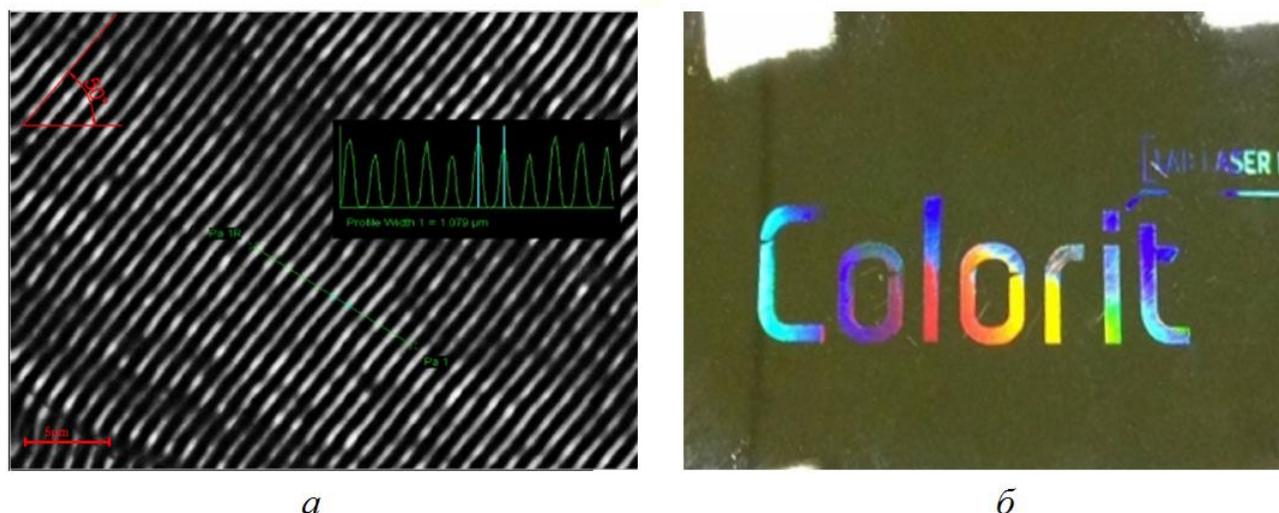


Рис. 4. а – микрофотография поверхности стали с хромовым покрытием после лазерного воздействия; б – фотография псевдоголографической метки

Такая субволновая периодическая модуляция, редко наблюдаемая при воздействии длинных (наносекундных) импульсов лазерного излучения, по-видимому, также может быть использована для скрытой маркировки, обеспечивая две дополнительные степени свободы: субволновой период и высоту рельефа.

С практической точки зрения предлагаемый метод обладает четырьмя степенями защиты: период, ориентация и высота поверхностно-периодических структур, а также видимый цвет поверхности, который является легко распознаваемым параметром и косвенно может указывать на предыдущие три. Изображения, получаемые таким способом, обладают псевдоголографическим эффектом, то есть, как и любая фазовая решетка, изменяют свой цвет в пределах видимого диапазона длин волн. Для применения рассмотренной технологии в целях защиты продукции от фальсификации важнейшим параметром является цвет поверхности и возможность его управляемого изменения.

Заключение

Предложен не имеющий аналогов в мире метод защиты продукции от фальсификации на основе лазерной записи и считывания уникальных защитных меток на поверхности изделий из различных металлов. Полученные изображения обладают хорошей устойчивостью к физическим и химическим воздействиям, что положительно отличает их от традиционных методов, используемых в настоящее время. За счет управления оптическими свойствами уровень защиты от воспроизведения или замены такой метки гораздо выше, чем у существующих аналогов. В перспективе разработанный метод может быть модифицирован для использования на любых материалах.

Результаты проекта обладают большим потенциалом для коммерциализации, так как надежная защита продукции от фальсификации имеет принципиальное значение во многих областях промышленности. Среди возможных потребителей можно указать производителей наукоемкой и высокотехнологичной продукции, а также научной и специальной аппаратуры, банковский сектор, ювелирную промышленность и другие.

Публикации

1. Veiko V.P., Odintsova G.V., Gorbunova E.V., Ageev E.I., Shimko A.A., Karlagina Y.Y., Andreeva Y.M. Development of complete color palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of color laser marking technology // Materials & Design. 2016. Vol. 89. P. 684–688.

2. Вейко В.П., Одинцова Г.В., Горбунова Е.В., Андреева Я.М., Карлагина Ю.Ю., Романов В.В. Метод изменения цвета поверхности титана при локальном окислении наносекундными лазерными импульсами // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 243–248.
3. Вейко В.П., Одинцова Г.В., Карлагина Ю.Ю., Андреева Я.М., Агеев Э.И., Яцук Р.М. Исследование эффекта влияния угла освещения на спектры отражения поверхности нержавеющей стали при окислении импульсным лазерным излучением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 422–427.
4. Одинцова Г.В., Карлагина Ю.Ю., Агеев Э.И., Вейко В.П., Андреева Я.М., Романов В.В. Исследование зависимости спектров отражения от угла падения света на поверхность металлов, окисленную волоконным лазером // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2016. С. 231–232.
5. Veiko V.P., Yatsuk R.M., Odintsova G.V., Moskvina M., Romanov V.V., Karlagina Y.Y., Andreeva Y.M. Laser colouring of metal and polycarbonate surfaces - as a method of protection against falsification // International Symposium «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-16): abstracts. Saint-Petersburg, 2016. P. 92.

Литература

1. Богданов В.Н. и др. Технологии защитной маркировки продукции для защиты рынка от контрафакта и подделок // Защита информации. Инсайд. 2013. № 2. С. 74–80.
2. Veiko V.P. et al. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // Optics express. 2014. Vol. 22. No 20. P. 24342–24347.
3. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. No 4. P. 041914.



Вашурина Мария Андреевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: avrora5901@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РИСУНКА ВЕН ЛАДОНИ

М.А. Вашурина

Научный руководитель – доцент М.В. Хлопотов

В современном мире наука об идентификации человека приобретает все большую популярность. Устройства распознавания личности совершенствуются, становятся проще и компактнее, конкурируя друг с другом по качеству, экономичности и надежности. Поскольку биометрия – это наука о методах распознавания на основе физиологических и поведенческих характеристик человека, которые мало подвержены изменениям, то именно она предоставляет наиболее надежные способы аутентификации.

Один из таких методов – аутентификация личности по рисунку вен ладони. Венозный рисунок уникален у любого человека (даже у близнецов) и не меняется с возрастом. Помимо

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

этого, так как вены – подкожный физический орган, данную характеристику практически невозможно подделать. Среди преимуществ – бесконтактность технологии, гарантирующая отсутствие негативных физических ощущений, экономичность производства оборудования и многовариантность использования [1].

После проведенного анализа объекта исследования в рамках проекта была поставлена цель разработать прототип системы биометрической аутентификации личности на основе рисунка вен ладони, включающий алгоритмы определения *ROI*, предобработки и постобработки изображений, извлечения характеристик и их анализа с помощью средств *MATLAB*.

Технология аутентификации включает следующие этапы, на каждом из которых были написаны и реализованы собственные алгоритмы обработки и анализа графических данных, образующие единую программную систему:

- извлечение *ROI* – «области интереса» на изображении;
- обработка изображения;
- извлечение признаков;
- сравнение с имеющимися в базе характеристиками и шаблоном [2].

Извлечение *ROI*

Цель данного преобразования – автоматически нормализовать участок изображения таким образом, чтобы свести к минимуму различные изменения изображения, вызванные взаимодействием пользователя с фотокамерой [3].

На данном этапе была выявлена значимая проблема определения инвариантности *ROI* относительно незаметного глазу, но значимого для компьютерного анализа сдвига ладони при многократном фотографировании, изменений фокуса камеры и наличия шумовых эффектов на изображении. Поскольку дальнейшая работа алгоритма осуществляется на извлеченной области интереса, то в случае погрешности при ее определении обеспечена погрешность при финальном сравнении характеристик и вынесении вердикта при верификации пользователя. В качестве решения был разработан следующий алгоритм.

1. Отделение изображения ладони от фона с помощью метода *OTSU*, применяемого для определения порога бинаризации с минимальной внутриклассовой дисперсией.

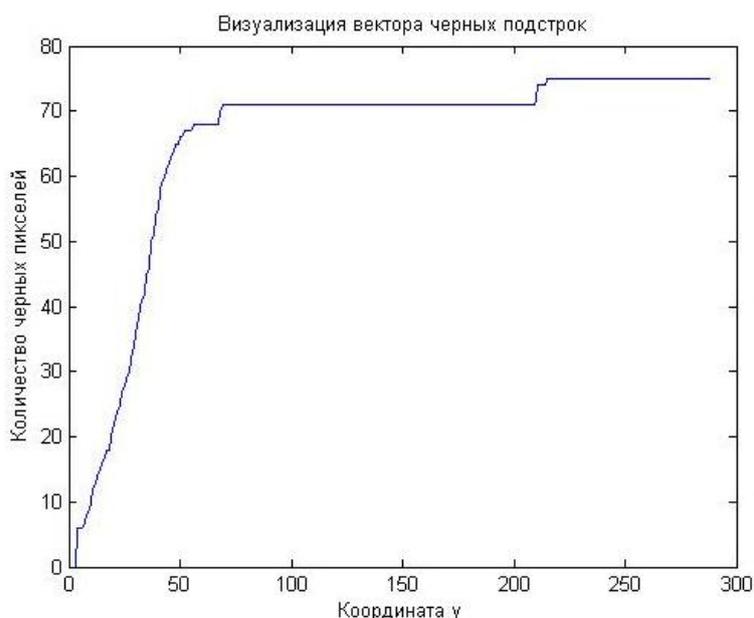


Рис. 1. График значений полученного вектора подстрок

2. Использование разработанного алгоритма, определяющего наиболее длинную подстроку черных пикселей для каждой строки. В результате формируется вектор, значение каждого элемента которого равно длине наибольшей черной подстроки, а индекс элемента

равен координате y последнего черного пикселя. На графике рис. 1 отчетливо видны пики, соответствующие искомым точкам – наибольшим углублениям между указательным и средним пальцами и безымянным пальцем и мизинцем.

3. Определение координат крайнего левого и правого пиков, являющихся опорными точками. Через них проводится основная координатная ось (красная прямая, изображенная на рис. 2).

4. Определение координат точки (X_{p2}, Y_{p2}) , находящейся на перпендикуляре, опущенном на нижнюю границу изображения (рис. 2).

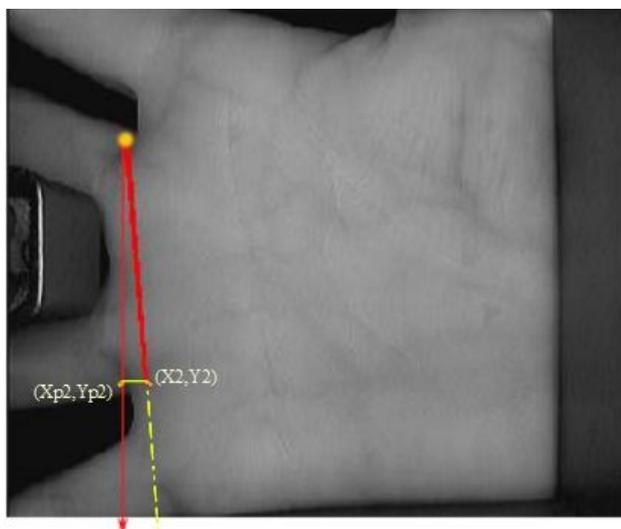


Рис. 2. Точка (X_{p2}, Y_{p2}) – проекция точки (X_2, Y_2) на перпендикуляр, проведенный к нижней границе изображения

Таким образом, между прямыми, на которых расположены точки (X_{p2}, Y_{p2}) и (X_2, Y_2) , образуется угол, при повороте на который исключается разница в сдвиге и повороте на изображениях при съемке. То есть при фотографировании руки одного человека искомые ROI будут одинаковы (рис. 3):

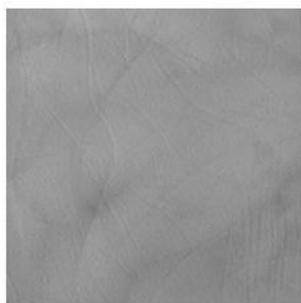


Рис. 3. Извлеченный ROI

Обработка изображения

Предобработка обеспечивает сокращение шума и улучшение контраста, что помогает улучшить качество изображения во время сегментации.

На данном этапе были применены фильтр Гаусса и медианный фильтр, проведено растяжение гистограммы.

Сегментация обеспечивает хорошее бинарное представление шаблона вен в результате отделения пикселей, обозначающих вены, от фона. Одним из алгоритмов сегментации является метод точек максимальной кривизны, реализованный в данном проекте (рис. 4) [4].

Постобработка используется для уменьшения шума и удаления мелких пятен и точек, которые не являются частью венозного рисунка. В данной работе применялись морфологические операции – дилатация и эрозия. Удаление двоичных пятен осуществлено с помощью встроенной функции пакета *Image Processing Toolbox* – *bwareaopen*.

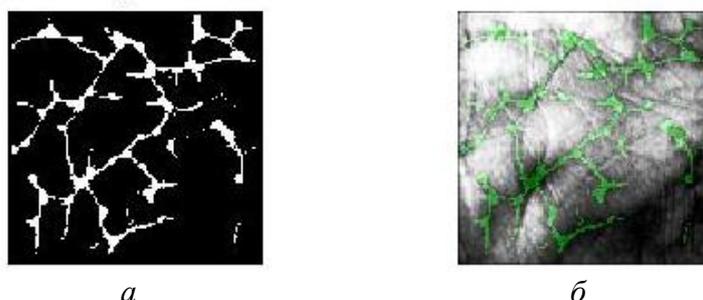


Рис. 4. Результат применения метода поиска точек максимальной кривизны:
а – в бинарном виде, б – в наложении на обрабатываемое изображение

Извлечение признаков

Утончение (*Thining*)

Метод утончения состоит в том, чтобы последовательно удалять слои пикселей, расположенных на границах, не позволяя при этом прерываться или стираться линиям вен. Извлечение признаков осуществлялось с помощью метода *DoG* (*Difference of Gaussians*), расстояний Евклида и Хаусдорфа [5], которые используются в совокупности с алгоритмом *SIFT* (*Scale Invariant Feature Transform*), обеспечивающим инвариантность относительно смещения, поворота, масштаба, изменения яркости и положения камеры. Итог обработки изображения на данном этапе показан на рис. 5.

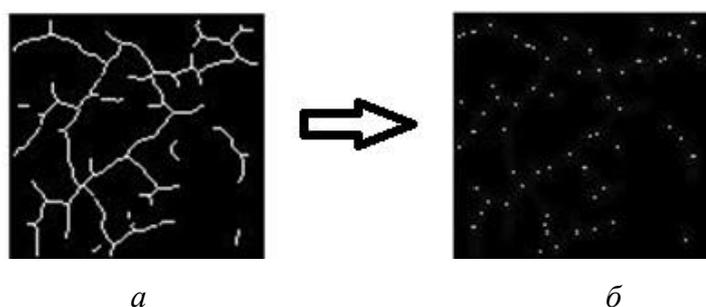


Рис. 5. а – скелет венозного рисунка; б – ключевые точки на ROI

На основе выявленных ключевых точек были сформированы описательные дескрипторы для каждого изображения, которые используются в качестве уникальных характеристик для сравнения изображений на степень схожести.

Этап распознавания

На данном этапе для определения схожести изображений применялось улучшенное расстояние Хаусдорфа (*Modified Hausdorff Distance*).

Тестирование разработанного алгоритма проводилось на четырех изображениях ладони одного и того же человека, сделанных в разное время. Выявлена состоятельность реализованных алгоритмов на всех этапах работы, однако алгоритм сравнения дескрипторов требует усовершенствования (рис. 6).

Таким образом, в процессе работы была решена важная проблема автоматизации определения области интереса для бесконтактного устройства, реализованы и успешно применены алгоритмы обработки и сегментации изображения, выделения ключевых точек, а также осуществлена попытка аутентификации личности по фотографиям одной и той же ладони, сделанным в разное время.

Тестирование позволило выявить новую проблему на этапе распознавания дескрипторов, которая требует отдельного исследования и решения. Предполагаемый сбой происходит при применении такой сравнительной характеристики, как улучшенное расстояние Хаусдорфа. Соответственно, необходимо провести тестирование на большем количестве фотографий, выявить закономерности и определить порог схожести

дескрипторов. Альтернативой может служить применение других алгоритмов сравнения ключевых характеристик и последующий сравнительный анализ полученных результатов с результатами, представленными в данной работе.

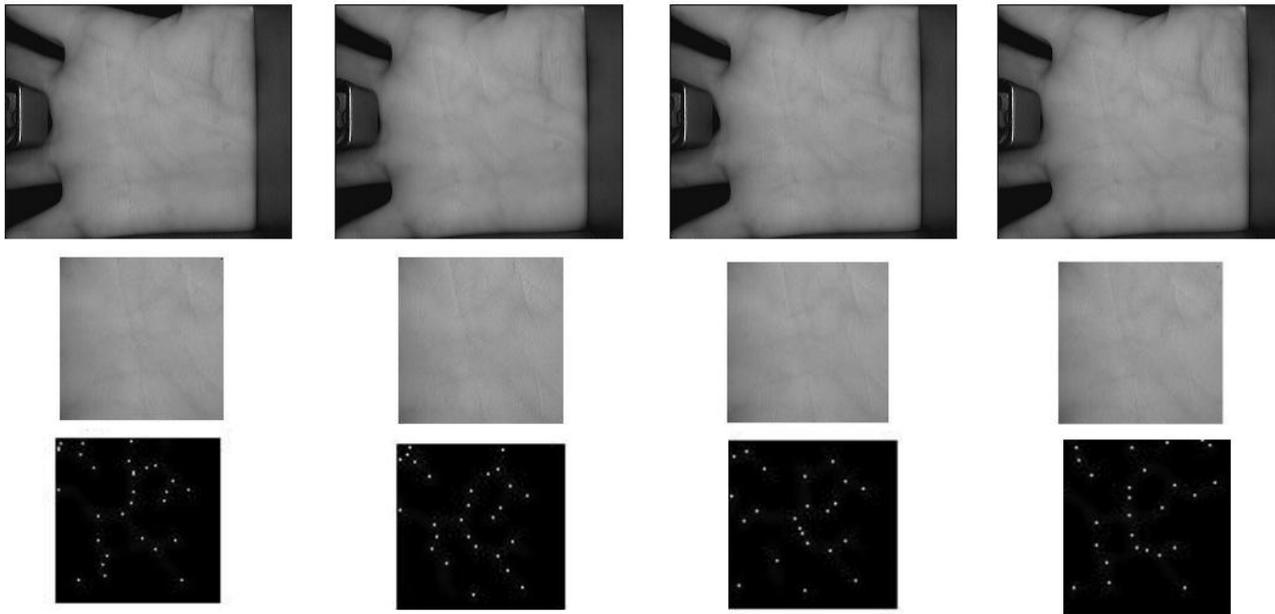


Рис. 6. Иллюстрация тестирования для четырех фотографий ладони одного и того же человека, сделанных в разное время

Полученный функционирующий алгоритм прототипа системы биометрической аутентификации личности на основе рисунка вен ладони может служить основой для создания действующего производственного образца аутентификационного устройства с последующим его практическим применением. Результатом проекта также является единый программный код, доступный для ознакомления и обучения, в то время как программная составляющая уже существующих продуктов является коммерческой тайной и не подлежит разглашению.

Программная часть проекта реализуется с помощью пакета *Image Processing Toolbox* языка *MATLAB* и свободно распространяемого кода:

- Detection of *ROI* for Finger vein recognition, Bram Ton;
- Extraction of vein patterns using maximum curvature points based on N. Miura, Bram Ton;
- Detection of the key points and their descriptors, Ch. Naveen.

В качестве обрабатываемых данных служат фотографии ладоней, сделанных в ближнем инфракрасном излучении, из базы данных Пекинского университета, находящейся в открытом доступе [6].

Публикации

Вашурина М.А., Хлопотов М.В. Разработка прототипа биометрической системы аутентификации на основе рисунка вен ладони [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4060/4060.pdf> (дата обращения: 05.09.2016).

Литература

1. Jain A.K. et al. Handbook of biometrics. 2008. – 556 p.
2. Kang W. et al. Contact-free palm-vein recognition based on local invariant features // PLoS ONE. 2014. Vol. 9. No 5. P. e97548.
3. Premalatha K. et al. A dorsal hand vein recognition-based on local gabor phase quantization with whitening transformation // Defence Science Journal. 2014. Vol. 64. No 2. P. 159–167.

4. *Miura N. et al.* Extraction of finger-vein patterns using maximum curvature points in image profiles // Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications. 2005. P. 347–350.
5. *Aeri S., Kaur S.* Vein patterns as bio-metric identifier using euclidean distance // International Journal of Computer Applications. 2014. Vol. 89. No 20. P. 7-8.
6. The Hong Kong Polytechnic University (PolyU). Multispectral palmprint database [Electronic resource] // The Hong Kong Polytechnic University [Official website]. URL: <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/MultispectralPalmprint/MSP.htm> (accessed: 15.01.2016).



Власов Александр Андреевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: salusnetklim@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ НА РАБОТУ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ И ПОИСК МЕТОДОВ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

А.А. Власов

Научный руководитель – доцент А.С. Алейник

В настоящее время волоконно-оптические фазовые интерферометрические датчики (ВОИФД) получают все более широкое распространение в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) различных измерительных систем (волоконно-оптические гироскопов, датчиков тока и напряжения, гидроакустических антенн и многих других). Таким датчикам присущи следующие достоинства: низкие массогабаритные параметры ЧЭ, чрезвычайно высокая чувствительность (измерения происходят интерферометрическим способом), взрыво- и пожаробезопасность (оптическое волокно является диэлектриком), абсолютная нечувствительность ЧЭ к внешнему электромагнитному полю (чрезвычайно высокая помехозащищенность), возможность размещения ЧЭ в агрессивных средах (температура, химическая активность и т. д.), возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном волокне (создание пространственных измерительных массивов).

В качестве фазового модулятора, позволяющего осуществлять измерение разности фаз между лучами, в интерферометрических датчиках часто используются интегральные электрооптические фазовые модуляторы (ИЭОФМ) на основе ниобата лития (LiNbO_3). Этот оптически прозрачный в области длин волн 0,4–5,0 мкм кристалл без центральной симметрии является сегнетоэлектриком, демонстрирует электрооптический эффект Поккельса, прямой и обратный пьезоэлектрический эффект, эффект фотоупругости и двулучепреломление (рис. 1а) [1]. В ходе выполнения данной работы рассматривается фазовый модулятор в составе многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС), содержащей поляризатор, волноводные структуры, управляющие электроды.

Структура МИОС на базе LiNbO_3 представлена на рис. 1б. Принцип ее работы заключается в следующем: входящий луч света разделяется на два; при подаче напряжения

на управляющие электроды между этими лучами устанавливается разность фаз, задаваемая величиной управляющего напряжения и электрооптическим коэффициентом кристалла LiNbO_3 (рис. 1а).

Под действием управляющего напряжения в структуре LiNbO_3 происходят механические деформации, вызванные обратным пьезоэффектом, который является фундаментальным свойством этого кристалла. При совпадении частот управляющего напряжения и собственных частот кристалла LiNbO_3 происходят резонансные колебания, которые становятся причиной некоторых негативных последствий: изменений геометрических, волноводных и поляризационных параметров МИОС, электрического импеданса схемы, а также появления паразитной фазовой модуляции. Эти факторы снижают точность измерений и надежность работы измерительных систем на основе ВОИФД. Очевидно, должны быть предприняты меры подавления резонансных колебаний, для чего необходимо проведение их полного и всестороннего исследования.

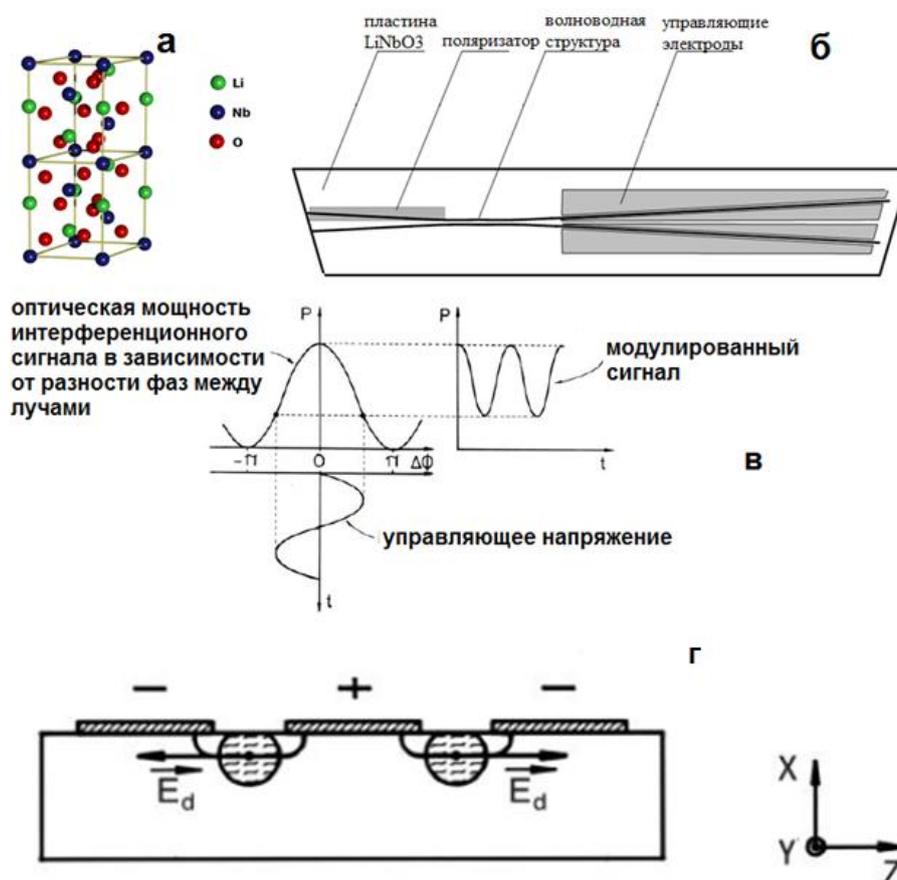


Рис. 1. а – кристаллическая структура LiNbO_3 ; б – структура ИЗОФМ на основе LiNbO_3 -МИОС; в – принцип электрооптической фазовой модуляции; г – торцевой вид МИОС с указанием направления электрического поля при электрооптической фазовой модуляции

Таким образом, целью данной работы является исследование распространяющихся по кристаллу LiNbO_3 механических колебаний, вызванным обратным пьезоэффектом, оценка их влияния на параметры фазового модулятора и поиск путей подавления. Для выполнения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести литературный обзор по теме исследования;
 - выполнить численное моделирование процессов, проходящих в МИОС (ИЗОФМ) при подаче управляющего напряжения на электроды;
 - исследовать резонансные колебания МИОС в диапазоне частот 0–100 МГц;
 - провести эксперимент по подавлению резонансных колебаний;
 - проанализировать полученные данные, сделать выводы.
- К методам исследования, используемым в данной работе, относятся:

- литературный обзор материалов из открытых источников;
- численное моделирование методом конечных элементов процессов, происходящих в МИОС при модуляции;
- изучение резонансных колебаний, возникающих при работе МИОС в диапазоне частот 0–100 МГц, при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ) и измерительной установки, представленной на рис. 2 (с использованием квазициркулятора, построенного на операционных усилителях (ОУ) по схеме на рис. 3 [2, 3]);
- проведение экспериментов по подавлению резонансных колебаний в кристалле LiNbO_3 ;
- анализ и обобщение полученных данных.

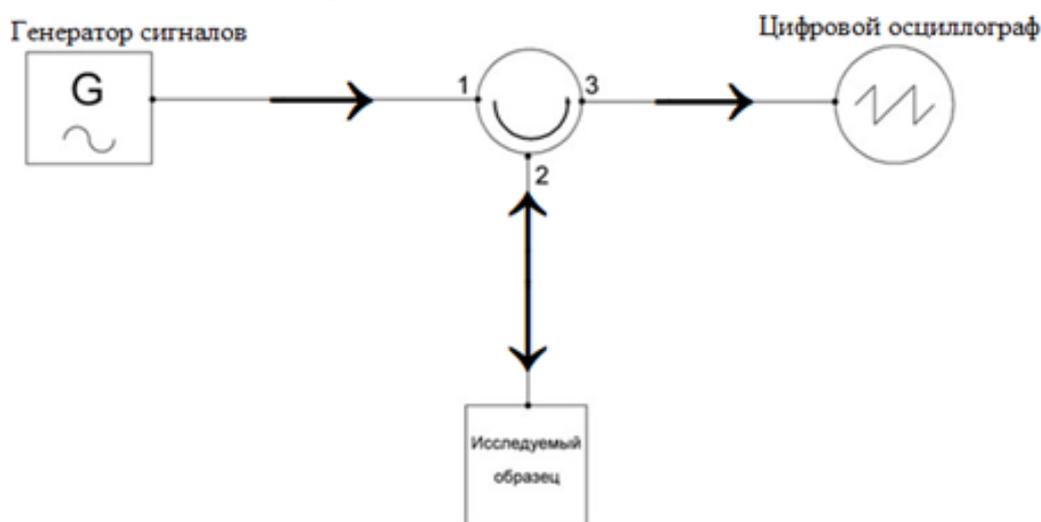


Рис. 2. Схема измерительной установки для нижнего диапазона частот. Стрелками показаны направления распространения испытательного сигнала

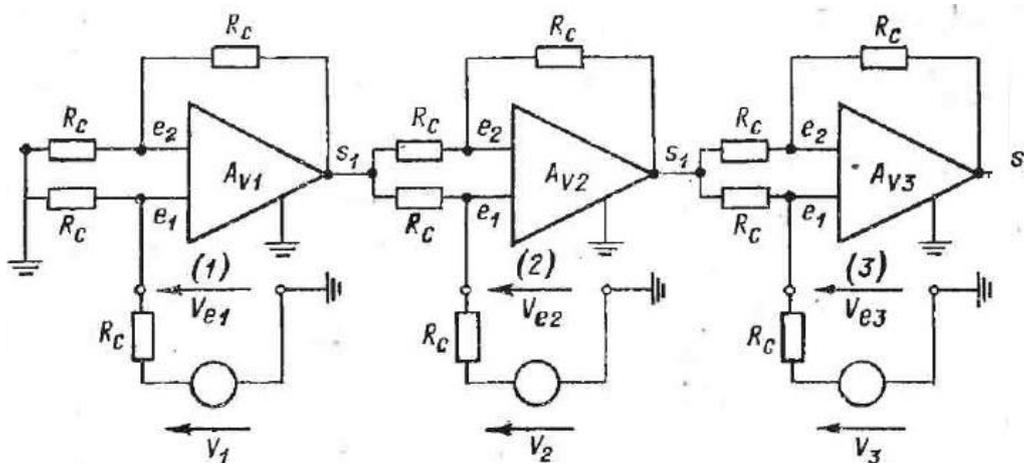


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема квазициркулятора на ОУ

Таким образом, в ходе выполнения данной работы измерение коэффициента отражения от МИОС (характеристики S_{11}) исследуемых образцов проводилось в частотном диапазоне 0–100 МГц в трех поддиапазонах: 0–600 кГц (при помощи измерительной установки согласно рис. 3); 0,3–10 МГц и 0,3–100 МГц (при помощи ВАЦ).

Было проведено исследование образцов МИОС, отличающихся габаритными параметрами и конфигурацией. Литературный обзор подтвердил актуальность темы исследования, а также выдвинутое предположение о том, что жесткая механическая фиксация МИОС к подложке является эффективным методом подавления негативного пьезоэффекта [4]. Применение различных клеящих составов обусловлено необходимостью увеличения взаимодействия МИОС и кварцевой подложки для передачи и затухания в ней

энергии механического резонансного колебания. Для проведения данного исследования было отобрано несколько клеящих составов на основе разных неорганических клеев. Критериями сравнения эффективности покрытия образцов перечисленными материалами считаются количество, характер и глубина резонансных пиков, линейность характеристики S_{11} , степень подавления колебаний по отношению к непокрытому образцу. Результаты данного исследования в заявленном диапазоне частот представлены на рис. 4. Наблюдается значительное снижение нежелательных резонансных колебаний, обусловленных паразитным пьезоэффектом.

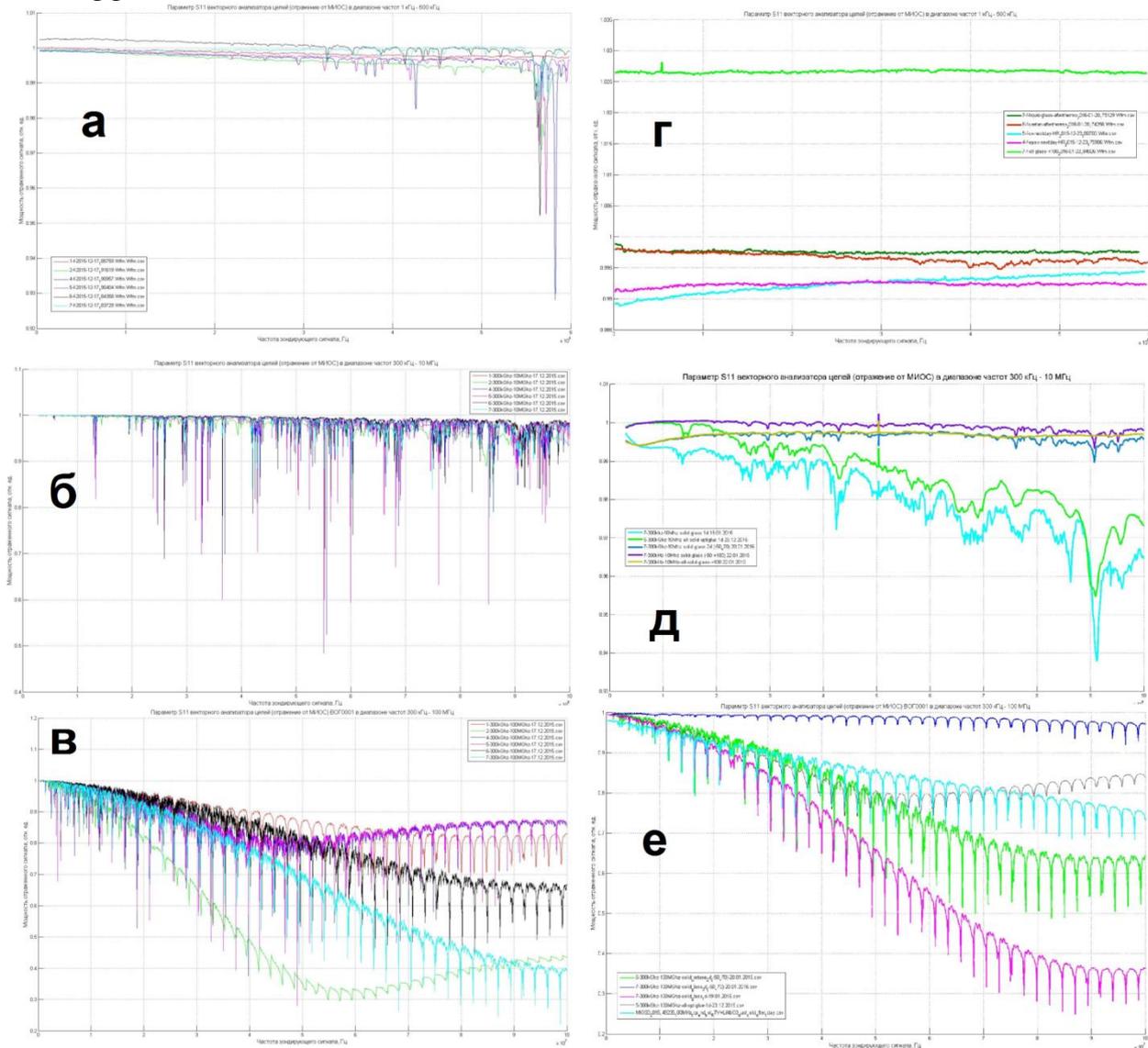


Рис. 4. Характеристика S_{11} различных образцов МИОС, измеренная: а, б, в – без использования покрытия (в диапазонах частот 0–600 кГц, 0,3 – 10 МГц и 0,3 – 100 МГц соответственно); г, д, е – с использованием покрытий из различных неорганических клеев (в тех же диапазонах частот). Каждый образец имеет свое покрытие, которое не меняется от графика к графику

Выводы

В ходе выполнения работ по данной теме были получены следующие результаты.

1. Проведен литературный обзор по тематике и компьютерное моделирование методом конечных элементов процессов, происходящих в МИОС при подаче модулирующего напряжения. Сделан вывод о механической природе резонансов. Причина их возникновения – изменение геометрических параметров МИОС под действием сил

электрического поля, в результате которого происходит изменение оптического пути, связанное с изменением геометрических параметров волноводов, что приводит к паразитному набегу фаз в выходном оптическом сигнале МИОС.

2. Собраны измерительные установки для проведения измерения характеристики S_{11} , необходимой для всестороннего изучения механических резонансов МИОС.

3. Принимая во внимание результаты численного моделирования и анализируя данные измеренных характеристик S_{11} МИОС различной конфигурации, сделан вывод о зависимости возникающих резонансов от геометрических параметров МИОС (длина и ширина). Установлено, что при усилении взаимодействия между МИОС и кварцевой подложкой (устранение воздушного зазора) акустические колебания передаются в подложку и затухают в ней. Причем сплошная заливка МИОС покрытием и его полное отверждение повышают эффективность гашения акустических резонансов. Кроме того, энергия, подаваемая на модулятор, расходуется на совершение механических колебаний, что снижает эффективность электрооптической модуляции. Ее потери составляют от 10 % (в нижнем диапазоне частот) до 80 % (в верхнем диапазоне исследуемой области частот).

4. Осуществлена оценка эффективности подавления резонансных механических колебаний МИОС для нескольких составов заливки на основе различных неорганических клеев. Выбран наиболее эффективный материал покрытия. Эффективность подавления резонансных колебаний составляет от 97 % (в нижнем диапазоне частот) до 80 % (в верхнем диапазоне исследуемой области частот), что является очень хорошим результатом. Данный метод подавления резонансных колебаний позволяет значительно улучшить работу МИОС.

5. Сделан вывод о необходимости разработки технологии нанесения и отверждения клеящих составов для повышения технологичности процесса, предсказуемости результатов и более легкого внедрения их в реальный производственный цикл. Внедрение ее в цикл производства измерительных приборов на основе МИОС положительно скажется на их точностных и эксплуатационных характеристиках.

Областью возможного применения результатов данного исследования является разработка и производство волоконно-оптических измерительных систем на основе ВОИФД, имеющих в своем составе фазовые электрооптические модуляторы на базе LiNbO_3 (волоконно-оптическое приборостроение, разработка, производство и применение волоконно-оптических датчиков и измерительных систем на их основе).

Цель работы полностью достигнута. Полученные результаты позволяют прогнозировать значительное улучшение точностных и эксплуатационных характеристик измерительных систем на основе ВОИФД, имеющих в своем составе фазовые электрооптические модуляторы на основе кристаллов LiNbO_3 при внедрении предложенного метода подавления резонансных колебаний, вызванных паразитным пьезоэффектом, возникающим на стадии производства модуляторов либо на этапе сборки измерительных систем.

Публикации

1. Аксарин С.М., Алейник А.С., Власов А.А., Кикилич Н.Е., Сухинец А.В., Алейник А.С. Исследование влияния механических резонансов на работу интегрального электрооптического модулятора на основе LiNbO_3 и поиск метода их подавления [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2586/2586.pdf> (дата обращения: 08.12.2016).

2. Аксарин С.М., Алейник А.С., Власов А.А., Кикилич Н.Е., Сухинец А.В., Трубникова В.М. The research of the mechanical resonances effect in operation of the LiNbO_3 electro-optical modulator and the search for a method of its suppression [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2587/2587.pdf> (дата обращения: 08.12.2016).

Литература

1. CRC handbook of chemistry and physics, 89th edition / Edited by D.R. Lide. 2008–2009. – 2736 p.
2. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л., 1974. – 216 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М., 1993. – 704 с.
4. Орлов В.С., Бондаренко В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. М., 1984. – 272 с.



Вовк Татьяна Антоновна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: tatiana_vovk@corp.ifmo.ru

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ КОМПЛЕКСНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Т.А. Вовк

Научный руководитель – доцент Н.В. Петров

Численный расчет оптических полей является распространенной задачей оптической физики. Как правило, для ее решения применяются подходы, основанные на геометрической оптике, использовании итерационных алгоритмов и алгоритмов адаптивной оптимизации, а также решению дифракционных задач. Цель работы – исследование методов получения волновых полей с детерминированными параметрами и повышение их эффективности. Для достижения этой цели предлагается усовершенствование и оптимизация существующих способов задания оптических полей в пространстве, а также комбинирование различных методов для обеспечения максимальной производительности в рамках конкретной задачи.

Анализ области применимости методов к конкретным проблемам – одна из задач, данной работы. Рассматриваются следующие проблемы:

- создание амплитудно-фазовых распределений, которые будут иметь характеристики, необходимые при дальнейшем распространении;
- создание сингулярных пучков света с заданными топологическими параметрами;
- обработка фазы пучков от источников когерентного излучения с целью получения идеального гауссового профиля.

Другой задачей, которая решена в работе, является исследование комбинирования различных методов получения детерминированных волновых полей.

Кроме этого должна быть выполнена разработка и структуризация базового математического аппарата и теоретических основ методов формирования волновых полей, а также численное моделирование и исследование возможностей улучшенных методов.

Алгоритм адаптивной оптимизации волнового поля (АОВП) создавался для решения задачи фокусировки излучения сквозь рассеивающие среды с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) [1]. Плоский фронт волнового поля (ВП) проходил сквозь образец, в результате чего в плоскости фокусировки появлялась картина случайно распределенных пиков интенсивности. После этого применялся алгоритм АОВП,

преобразующий плоский фронт ВП таким образом, что излучение от источника собиралось в фокусе на плоскости регистрации.

Ранее был рассмотрен простой вариант, когда рассеивающая среда отсутствует [2]. В этом случае метод АОВП формирует на ПВМС массив оптимальных величин фазового набега, который представляет собой дискретную функцию тонкой линзы.

Принцип действия алгоритма можно кратко описать следующим образом (рис. 1).

1. Плоский фронт ВП попадает в плоскость ПВМС.
2. Отдельные сегменты ВП приобретают заданное на ПВМС фазовое запаздывание.
3. Полученное в плоскости регистрации распределение интенсивности в дальнейшем сравнивается компьютером с необходимым распределением.
4. Компьютер подбирает фазовое запаздывание в текущем сегменте (или сегментах) ПВМС.

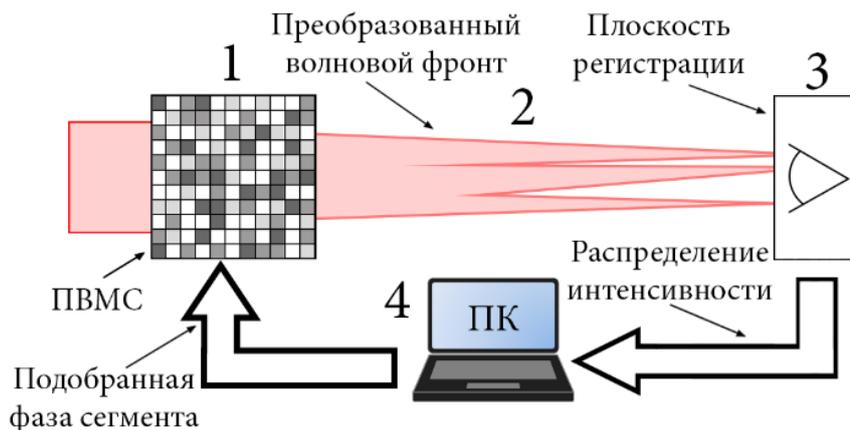


Рис. 1. Алгоритм работы АОВП без рассеивающей среды

Затем процесс 1–4 повторяется для следующего сегмента (или сегментов) ПВМС. Существует множество алгоритмов выбора сегментов, например построчный перебор единичных сегментов, бинарный поиск, метод фазовых масок и другие [3].

Метод цифрового оптического фазового сопряжения (ЦОФС) [4] состоит из нескольких этапов.

1. Необходимое распределение интенсивности $I(x, y)$ волнового поля представляется в виде ансамбля элементарных излучателей $I_i(x, y)$ и разделяется на конечное число (m) точек максимальной интенсивности на плоскости.

2. Затем каждый из m излучателей рассматривается в отдельности, рассчитывается фазовое распределение $\varphi_i(x, y)$ волнового поля от излучателя в плоскости управления или установки ПВМС (в случае точечного источника имеем сферическое фазовое распределение).

3. Полученные фазовые распределения затем сопрягаются: сегменты распределений перемешиваются случайным образом.

4. В результате получается синтезированный оптический элемент $\varphi_\Sigma(x, y)$, фокусирующий падающее излучение в необходимое распределение интенсивности.

Метод ЦОФС является достаточно быстрым, так как использует численное распространение волнового фронта от точечных источников, что является элементарной операцией для Фурье-преобразования. Основным минус данного метода – наличие в объектной плоскости вторичных дифракционных порядков.

Рассмотрим возможность комбинирования классического метода АОВП и прямого задания фазового распределения в некоторой ограниченной области волнового поля в плоскости ПВМС. Определенной совокупности точек-пикселей ПВМС присваивается фиксированный фазовый набег, который не будет изменяться при применении метода АОВП. Следовательно, при таком условии в плоскости ПВМС сформируется синтезированный оптический элемент, состоящий из двух областей: заданной

и оптимизированной фазы. При этом вторая область фазового набега будет фокусировать ВП в заданную амплитудную конфигурацию в плоскости регистрации.

Результат применения дополнения метода АОВФ с частично известным фазовым набегом представлен на рис. 2. Параметры: размер изображения 320×320 мкм, длина волны $\lambda = 532$ нм, количество градаций фазы АОВП $ip = 4$. Размер квадратной области 160×160 мкм фиксированной фазы представляет собой сингулярный пучок с топологическим зарядом $q = 5$.

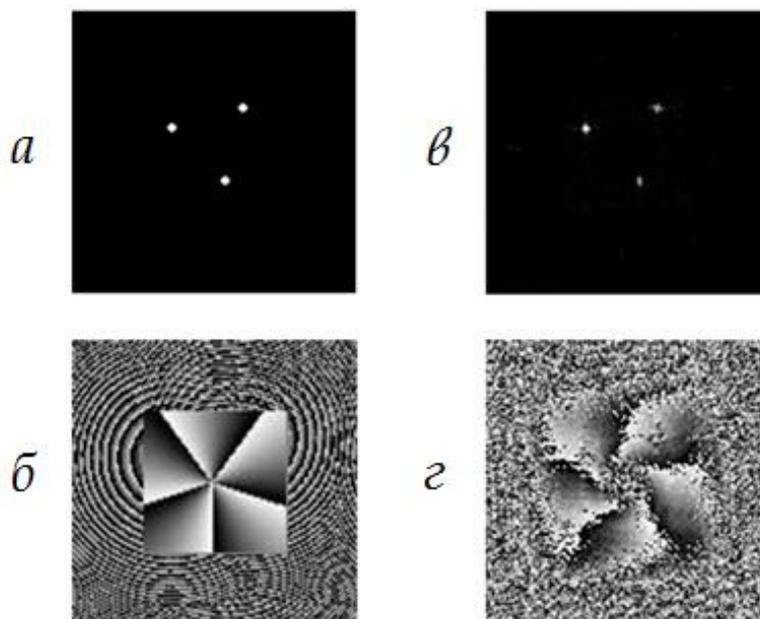


Рис. 2. Результат преобразования плоского волнового фронта конфигурацией АОВП с областью заданной фазы: а – мишень; б – фаза в плоскости ПВМС; в – амплитуда, г – фаза в плоскости регистрации

ВП от источника было перераспределено в три точки (рис. 2в). В результате применения конфигурации АОВП получили фазовое распределение с сингулярной добавкой-условием (рис. 2б). При этом фаза в плоскости фокусировки (рис. 2г) обладает смешанной структурой: первоначально сингулярный участок (рис. 2б), распространяясь, образует в центре случайное распределение фазового набега.

С помощью комбинации АОВП с прямым заданием сингулярного фазового распределения в плоскости ПВМС были получены пучки с необычными свойствами. Рассмотрим распространение одного из таких пучков после плоскости регистрации (рис. 3).

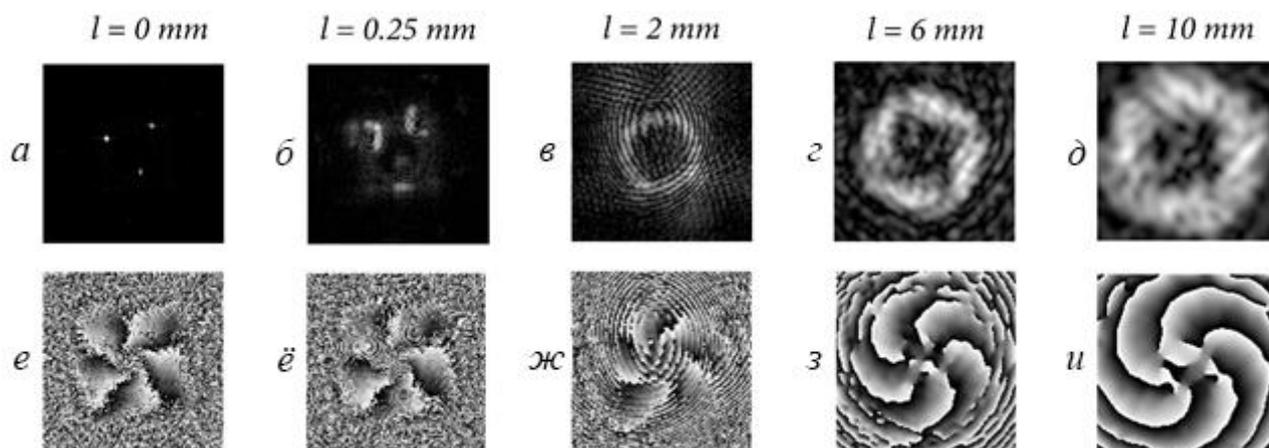


Рис. 3. Параметры пучка, сформированного ПВМС с помощью АОВП с сингулярной фазовой добавкой, при распространении на расстояния l : а–д – амплитуды; е–и – фазы

Первоначально сфокусированный в трех точках (рис. 3а, 3е) пучок, распространяясь, образует сферические фазовые распределения в этих местах (рис. 3б, 3ё). При дальнейшем распространении пучок приобретает форму бублика, фазовое распределение при этом теряет сферические компоненты (рис. 3в, 3ж). Увеличение расстояния приводит к полной потере сферических компонент и образованию нескольких фазовых сингулярностей, при этом амплитуда в форме бублика начинает увеличиваться в размере (рис. 3г, 3з, 3д, и 3и).

Предлагается также концепция для разработки новых алгоритмов синтеза оптических элементов, основанная на методах АОВП и ЦОФС.

Любой объект можно представить как совокупность конечного числа (m) точечных источников, излучающих сферические волны. Тогда можно рассчитать их вклад в распределение в плоскости регистрации, где расположен ПВМС.

Для того чтобы получить фазовое распределение волнового поля в плоскости регистрации для всего ансамбля из m точек, необходимо реализовать следующий алгоритм (рис. 4).

1. Выполнить отдельный расчет фазовых распределений всех m точек в плоскости ПВМС.

2. Найти точки с одинаковыми фазами в плоскости ПВМС для двух точечных источников, сохранить их для дальнейшего сравнения.

3. Остальные точки беспорядочно составляются из сегментов фазовых распределений, рассчитанных в п. 1 (рис. 4а, 4в).

4. Минимизировать полученные перекрестные помехи (вторичные дифракционные порядки, рис. 4б, 4г).

Для согласования относительных фаз сегментов смешанного фазового распределения необходимо повторять шаги 1–4 в течение нескольких итераций.

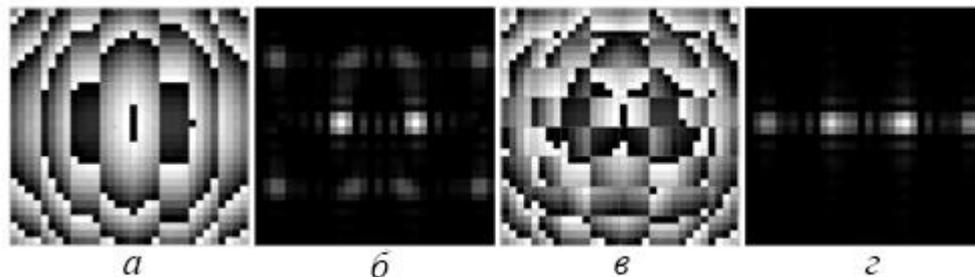


Рис. 4. Примеры совместного применения методов АОВП и ЦОФС: а, в – фазовые распределения в плоскости установки ПВМС; б, г – распределения интенсивности волнового поля в плоскости регистрации

Заключение

В данной работе было проведено исследование методов получения волновых полей с детерминированными параметрами. Поставлены и выполнены следующие задачи:

- проанализированы области применимости методов к некоторым научно-техническим проблемам;
- проведено исследование комбинирования методов получения детерминированных волновых полей;
- разработаны и структурированы теоретические основы методов формирования волновых полей.

В ходе решения поставленных задач были теоретически описаны методы, которые в дальнейшем подвергались исследованию. Они были применены к ряду задач, результаты решения которых, выявили применимость методов к тем или иным областям научных проблем. Также были исследованы комбинации методов, которые открывают новые возможности для синтеза световых пучков с уникальными свойствами и для разработки новых алгоритмов модуляции излучения от когерентного источника.

Результаты выполнения проекта могут быть применены в таких областях научного знания, как фотоника и оптика, в образовательных программах школ, университетов, институтов и других специализированных учебных заведениях Санкт-Петербурга.

Публикации

1. *Вовк Т.А., Петров Н.В.* Использование алгоритма адаптивной оптимизации для получения заданных амплитудно-фазовых характеристик волнового фронта // Голография. Наука и Практика: 13-я Международная конференция «ГолоЭкспо 2016», 12–15 сентября 2016 г., Ярославль, Россия: Тезисы докладов. М., 2016. С. 260–263.
2. *Petrov N.V.* Application of wavefront shaping techniques for diffraction optical elements synthesis // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging: Conference Proceedings, 25–28 July 2016, Heidelberg, Germany. 2016. P. DTh1E.5.

Литература

1. *Vellekoop I.M., Mosk A.P.* Focusing coherent light through opaque strongly scattering media // Optics Letters. 2007. Vol. 32. No 16. P. 2309–2311.
2. *Petrov N.V. et al.* Investigation of interaction of structured illumination with random scattering media // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9205. P. 92050T–92050T-8.
3. *Vellekoop I.M., Mosk A.P.* Phase control algorithms for focusing light through turbid media // Optics Communications. 2008. Vol. 281. No 11. P. 3071–3080.
4. *Cui M., Yang C.* Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation // Optics Express. 2010. Vol. 18. No 4. P. 3444–3455.



Гладских Полина Владимировна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: 4p63@mail.ru

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

П.В. Гладских

Научный руководитель – старший научный сотрудник Т.А. Вартанян

Цель работы – выявление зависимостей оптических и электрических свойств пленок благородных металлов на поверхности арсенида галлия (GaAs) от их морфологии. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- отработка режимов напыления и термической обработки металлических пленок на поверхности GaAs для получения различных структур;
- создание экспериментальных схем и отработка методик для исследования оптических и электрических свойств металлических пленок на поверхности GaAs;

- изучение полученных образцов методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, выявление механизма роста благородных металлов на поверхности полупроводникового GaAs;
- исследование спектров оптической плотности и отражения металлических пленок на поверхности GaAs с различной структурой;
- исследование проводимости металлических пленок на поверхности GaAs при различных ростовых параметрах и во время термического отжига.

В работе проводились экспериментальные исследования тонких пленок благородных металлов, нанесенных на поверхность полупроводниковой подложки из арсенида галлия. В качестве осаждаемого материала использовалось серебро, золото и медь, так как наночастицы этих металлов имеют выраженный плазмонный резонанс в видимой области спектра. Для создания и исследования металлических пленок была создана экспериментальная установка на базе напылительной вакуумной установки *Kurt J. Lesker PVD 75* при давлении остаточных газов не выше, чем $\sim 10^{-7}$ Торр [1, 2]. Образец закреплялся на манипуляторе со встроенной печкой с возможностью изменения температуры подложки от комнатной до 500 °С. Скорость напыления и эквивалентная толщина пленок измерялась при помощи кварцевого датчика. Толщина пленок составляла в различных экспериментах от 2 до 20 нм. Скорость роста составляла 0,1–1 Å/с.

Для изменения морфологии получаемых металлических структур после напыления применялся термический отжиг (до 250 °С). Для измерения оптических свойств металлических пленок на GaAs в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне использовался спектрофотометр СФ-56 (ЛОМО) и многоканальный фотонный анализатор *PMA-12 (Hamamatsu)*. Для анализа спектров пропускания в ближнем ИК-диапазоне – спектрофотометр *Shimadzu UV-3600*. Как известно, арсенид галлия не прозрачен в видимом диапазоне спектра почти до 900 нм, что в значительной степени осложняет исследование пропускания и, соответственно, морфологии металлических пленок. Поэтому наряду с абсорбционными методами исследования также исследовались спектры отражения полученных образцов с помощью специальной приставки к фотонному анализатору *PMA-12*.

В работе спектры отражения регистрировались в диапазоне длин волн от 350 до 1100 нм. Шаг измерения составлял 0,7 нм. Измеряемые углы для всех образцов составили 30°, 35°, 40° и 45°. Спектры отражения исследуемых металлических пленок были проанализированы как спектры образцов с металлом за вычетом спектров чистой подложки GaAs.

Для исследования электрических свойств металлических пленок на полупроводниковые подложки наносились электроды длиной 20 мм и шириной 5 мм. Расстояние между ними составило 4 мм. Величина тока регистрировалась с помощью пикоамперметра *Keithley 6487* со встроенным источником постоянного напряжения. Диапазон измеряемого тока данного прибора от 10 до 20 мА при напряжении до ± 505 В. Напряжение, подаваемое на электроды при измерении, не превышало 10 В.

Морфология полученных образцов исследовалась с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (*MERLIN, Carl Zeiss*) в режиме регистрации вторичных электронов. При этом специальные покрытия для снятия заряда не применялись. Также был использован атомно-силовой микроскоп (*Solver PRO-M, NT-MDT*) в полуконтактном режиме.

Образование металлических пленок на поверхности полупроводникового GaAs, реализуется по механизму Вольмера – Вебера (аналогично с ростом на диэлектрических подложках) с образованием зародышей на дефектах подложки без смачивающего слоя и их последующим ростом.

Сравнивая спектры полученных образцов серебряных пленок на поверхности GaAs при различной их толщине, получаем результаты, приведенные на рис. 1. Спектры отражения подложки GaAs с нанесенной серебряной пленкой различной толщины и без нее измерялись при угле падения света 30°. Толщина сопоставляемых пленок составила 5 нм, 7,5 нм, 10 нм. На рис. 1а видно, что серебряные наноструктуры демонстрируют широкий спектр

с максимумом на длине волны порядка 850 нм. Это обусловлено коллективными эффектами отражения света наночастицами, теоретически описанными многими авторами. Очевидно, что отражательная способность возрастает с количеством осаждаемого серебра.

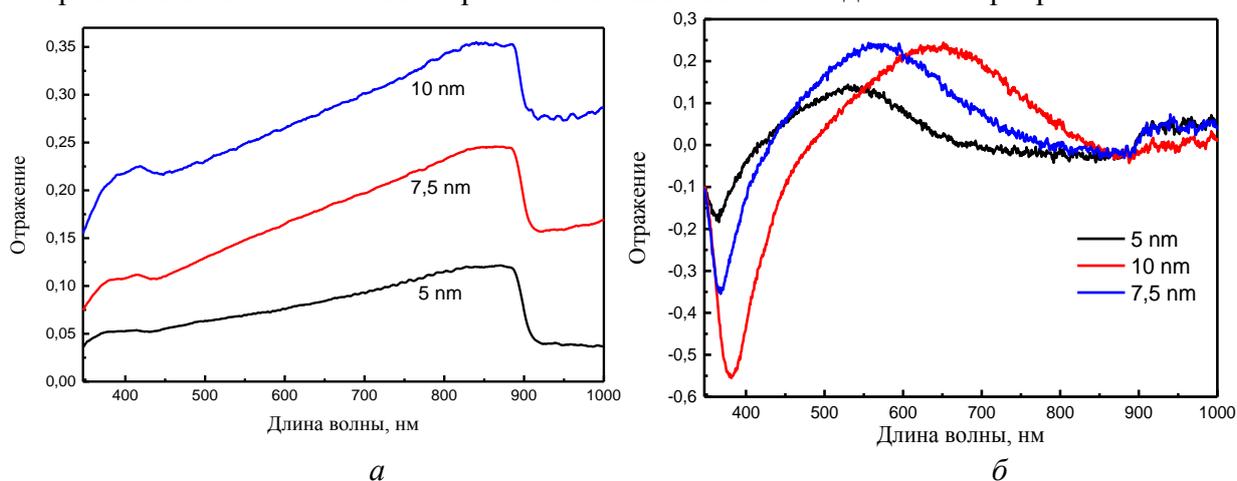


Рис. 1. Разностные спектры отражения серебряных пленок толщиной 5; 7,5 и 10 нм: а – до отжига; б – после термического отжига при 200 °С в течение двух часов

Согласно данным, полученным при помощи электронной микроскопии, «свеженанпыленная» пленка имеет нерегулярную лабиринтную структуру с небольшими промежутками между островками (рис. 2а). Изменение структуры серебряной пленки с лабиринтной на островковую (рис. 2б) со средним диаметром частиц от 10 до 70 нм подобно поведению металлических наночастиц на поверхности диэлектриков. Появившиеся после отжига островки вносят вклад в коротковолновую область спектра, в то время как более сплюснутые и вытянутые структуры в неотожженной пленке вносят наибольший вклад в длинноволновую область.

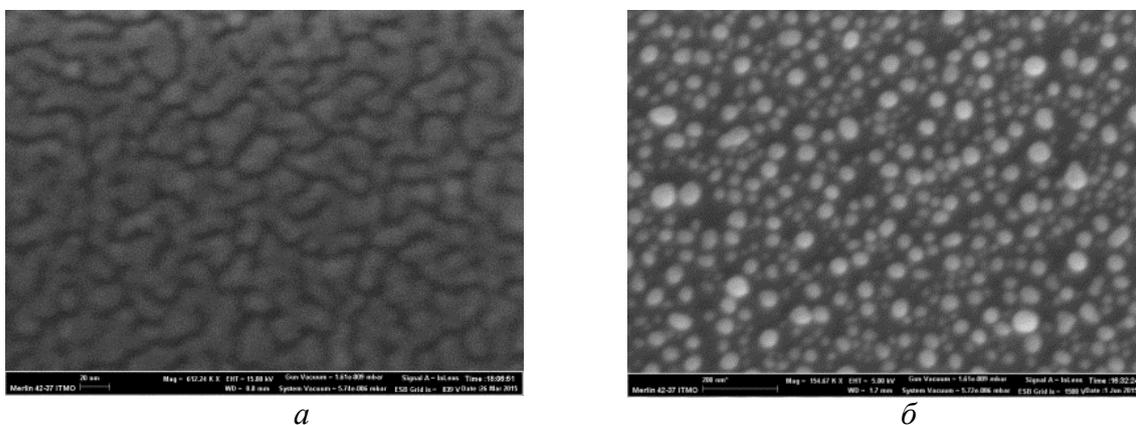


Рис. 2. СЭМ-изображение пленки Ag толщиной 50 Å, напыленной на подложку GaAs: а – до отжига; б – после термического отжига при 200 °С

Помимо серебряных, исследовались золотые пленки толщиной 2, 5, 10, 15 и 20 нм. Из полученных спектров следует, что максимум величины отраженного сигнала увеличился. Однако за счет того, что основной вклад в отражение золотой пленки приходится на спектральную область, где фундаментальное поглощение арсенида галлия обрывается, трудно сделать достоверный вывод об изменении ширины спектра, поэтому были приготовлены образцы с меньшей и большей эквивалентной толщиной.

На рис. 3 представлены сравнительные спектры тонких пленок серебра и золота с эквивалентной толщиной 5 нм, измененные при одинаковом угле падения света, равном 30°, до и после термического отжига при 200 °С в течение двух часов.

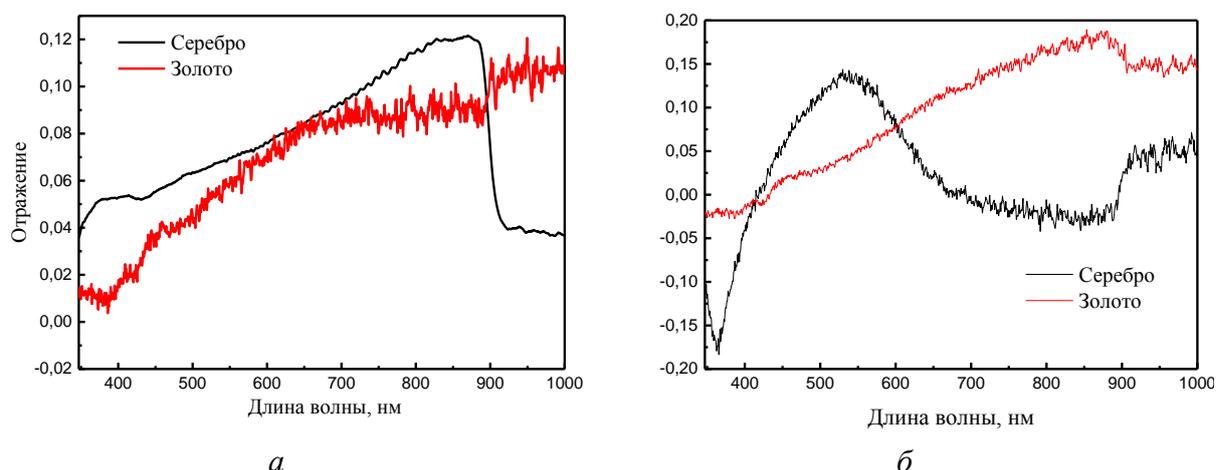


Рис. 3. Сравнение спектров отражения для различных материалов: Ag и Au с одинаковой толщиной пленки 5 нм: а – до отжига; б – после термического отжига

Из анализа спектров отражения можно сделать вывод о том, что серебряные пленки демонстрируют плазмонные свойства наиболее ярко и оказываются пригодными для дальнейших экспериментов по исследованию их электрических свойств [3].

Были исследованы электрические свойства серебряной пленки толщиной 75 Å, напыленной на поверхность GaAs при комнатной температуре со скоростью 0,6 Å/с. На рис. 4а представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) пленки серебра после напыления. Сопротивление пленки достаточно мало ~330 Ом и значительно меньше сопротивления чистого GaAs (~11 ГОм). Зависимость тока от напряжения практически линейная, однако с ростом напряжения значительно увеличиваются флуктуации тока, которые можно связать с образованием и распадом новых путей проводимости. Процесс их образования будет более детально описан далее для структур на пороге перколяции [4].

После напыления пленка отжигалась при температуре 100 °С в течение 30 мин. Изменения проводимости во времени при отжиге показаны на рис. 4б (измерения проводились при пороговом напряжении 1 В). Сначала сопротивление пленки достаточно плавно растет, а после 28 минут наблюдается его резкое увеличение, связанное с разрывом проводящих частей пленки. Далее отжиг был остановлен.

На рис. 4в представлена ВАХ серебряной пленки после такого отжига. Она существенно нелинейна. При увеличении напряжения (черная кривая) пленка находится в высокоомном состоянии с сопротивлением ~80 МОм. Однако при приложении порогового напряжения в 7 В сопротивление пленки уменьшилось более чем на порядок. Дальнейший рост напряжения приводил к небольшому росту проводимости. При уменьшении напряжения (красная кривая) ВАХ практически линейна, а сопротивление пленки составляет ~1 МОм. Однако при снятии напряжения пленка переходит обратно в высокоомное состояние. Данная зависимость ВАХ повторялась многократно.

Переключение сопротивления при пороговом напряжении можно связать с образованием металлических мостиков под действием высоких электрических полей. Предполагается, что расстояние между частицами должно быть $\leq 1-2$ нм. Несмотря на то, что подаваемое на пленку напряжение достаточно мало (7 В), а число разрывов, на которых в основном падает напряжение при миллиметровых расстояниях между электродами, может достигать $\sim 10^4$ (при длине наночастиц около 100 нм), поля между наночастицами в местах разрыва могут превышать 10^3 В/см, что приводит к небольшой их деформации и, как следствие, к сближению и соприкосновению. Причем данный процесс будет лавинообразным, так как образование мостика между наночастицами ведет к увеличению падения напряжения в других местах разрыва, тем самым объясняя резкий переход пленки из высокоомного в проводящее состояние.

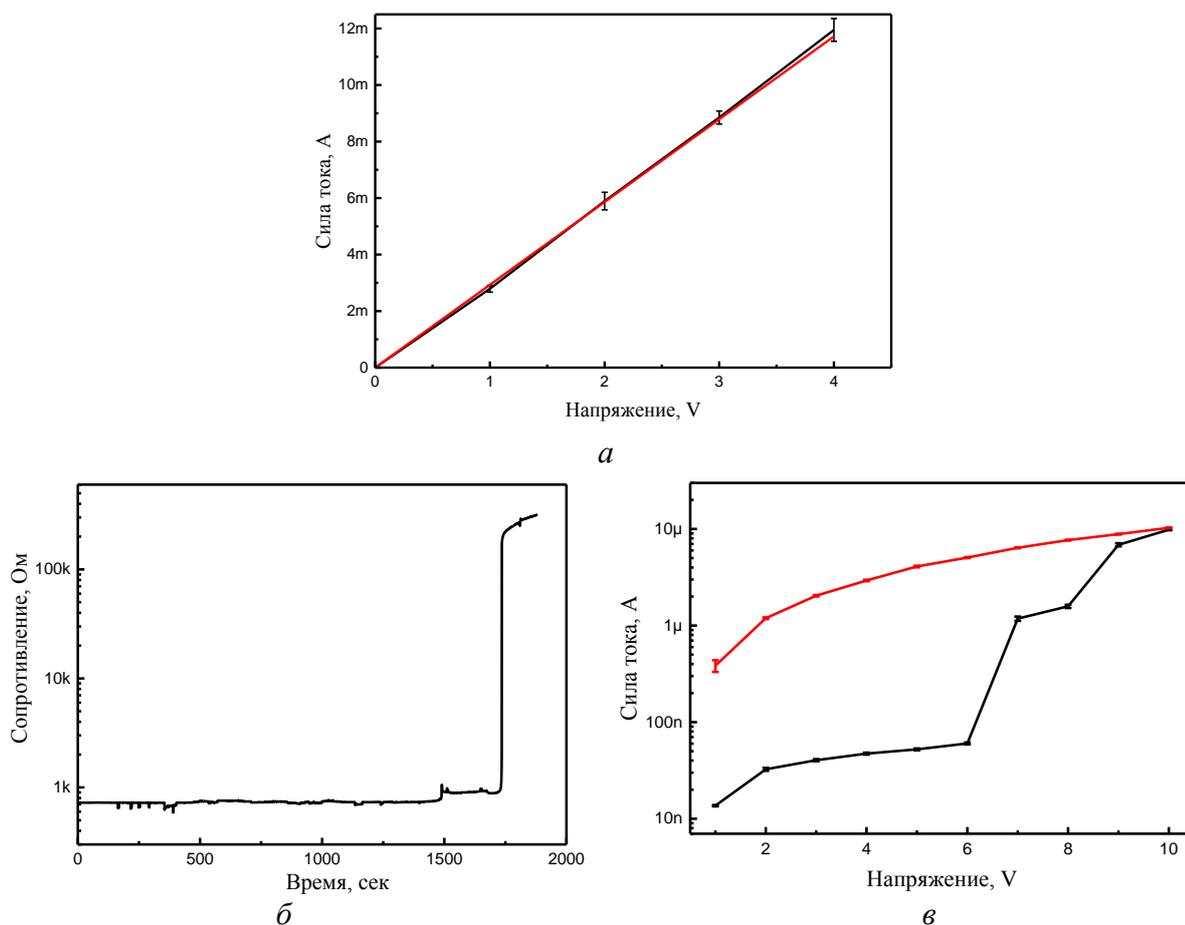


Рис. 4. Электрические свойства серебряной пленки толщиной 75 \AA , напыленной на поверхность GaAs: а – ВАХ после напыления; б – зависимость сопротивления пленки от времени отжига; в – ВАХ пленки серебра на пороге перколяции

Переход пленки обратно из проводящего состояния в высокоомное при снятии напряжения может объясняться тем, что структуры, образовавшиеся под действием напряжения, могут быстро разрушаться из-за процессов самодиффузии атомов с образовавшихся под действием напряжения мостиков на крупные частицы.

Далее пленка подвергалась глубокому отжигу в течение одного часа при $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Измеренная зависимость тока от напряжения была нелинейна. При подаваемом напряжении больше 5 В зависимость становится сублинейной. При напряжениях больше 30 В наклон кривой становится близким к изначальному. Сопротивление серебряной пленки более чем в два раза меньше сопротивления чистой подложки: в зависимости от прикладываемого напряжения $4,385\text{--}4,75 \text{ ГОм}$ для серебряной пленки и $11,5\text{--}11,7 \text{ ГОм}$ для чистого GaAs. При покрытии арсенида галлия островковой пленкой основное падение напряжения будет в местах, где нет наночастиц серебра. На СЭМ-изображениях расстояние между наночастицами сопоставимо с их размером.

Заключение

Физическое осаждение паров серебра и золота на подложке из арсенида галлия приводит к образованию нерегулярных лабиринтных наноструктур, сменяющихся сплошными пленками с увеличением толщины. При этом серебряные пленки преобразуются в островковые при термическом отжиге. Таким образом, продемонстрирована возможность настройки спектра дипольного плазмонного поглощения в пределах от 400 нм до более 1 мкм , а также создания области, где островковая металлическая пленка на поверхности выполняет функцию просветляющего покрытия.

Сопоставляя работы по получению тонких пленок благородных металлов на диэлектрических подложках и результаты, полученные на полупроводниковых подложках, можно утверждать, что образование последних происходит по механизму Вольмера – Вебера.

Кроме того, наблюдается связь между морфологией тонких пленок благородных металлов на поверхности полупроводникового GaAs с оптическими спектрами и проводимостью Ag-пленок. Исследуемые пленки серебра толщиной 75 Å на пороге перколяции демонстрировали гистерезис проводимости. Для островковых пленок серебра на арсениде галлия наблюдался эффект Ганна, а также эффекты увеличения проводимости и фотопроводимости.

Публикации

1. Чернова П.В., Гладских И.А., Торопов Н.А. Морфология и оптические свойства самоорганизующихся серебряных наноструктур на GaAs // XLIX Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния: сборник тезисов. СПб., 2015. С. 122–123.
2. Гладских П.В., Гладских И.А., Торопов Н.А. Морфология и оптические свойства самоорганизованных наноструктур серебра на арсениде галлия // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015». СПб., 2015. С. 377–379.
3. Гладских И.А., Гладских П.В., Торопов Н.А. Исследование процессов роста и вольт-амперных характеристик тонких пленок благородных металлов на полупроводниковых подложках GaAs [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. 2016. URL: http://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/3552/issledovanie_processov_rosta_i_volt-ampernyh_harakteristik_tonkih_plenok_blagorodnyh_metallov_na_poluprovodnikovyh_podlozhka_h_GaAs.html (дата обращения: 25.01.17).
4. Gladskikh P.V., Gladskikh I.A., Toropov N.A., Vartanyan T.A. Fabrication and characterization of the noble metal nanostructures on the GaAs surface // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9884. P. 98842Y.
5. Gladskikh P.V., Gladskikh I.A., Toropov N.A., Baranov M.A., Vartanyan T.A. Correlation between structural, optical, and electrical properties of self-assembled plasmonic nanostructures on the GaAs surface // Journal of Nanoparticle Research. 2015. Vol. 17. No 11. P. 424.

Литература

1. Toropov N.A. et al. Aggregation of cyanine dye molecules in the near fields of plasmonic nanoparticles excited by pulsed laser irradiation // The Journal of Physical Chemistry C. 2014. Vol. 118. No 31. P. 18010–18014.
2. Toropov N.A. et al. Mutual modification of silver-nanoparticle plasmon resonances and the absorptive properties of polymethine-dye molecular layers on a sapphire surface // Optics and Spectroscopy. 2012. Vol. 113. No 6. P. 616–620.
3. Gladskikh I.A. et al. The optical and electrical properties and resistance switching of granular films of silver on sapphire // Journal of Optical Technology. 2014. Vol. 81. No 5. P. 280–284.
4. Vartanyan T.A. et al. Fine structures and switching of electrical conductivity in labyrinth silver films on sapphire // Physics of the Solid State. 2014. Vol. 56. No 4. P. 816–822.



Дружинин Петр Яковлевич
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и лазерной техники
E-mail: pioter.druzhinin@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕКРИТИЧНОГО ПО ТЕМПЕРАТУРЕ СИНХРОНИЗМА В ДВУХОСНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛАХ

П.Я. Дружинин

Научный руководитель – старший научный сотрудник С.В. Гагарский

Целью работы является исследование влияния температурной зависимости показателя преломления на процесс преобразования частоты в однородных кристаллах и кристаллах с регулярной доменной структурой. Как правило, преобразование частоты является весьма критичным к изменению температуры кристалла, что проявляется в сильной температурной зависимости волновой расстройки $\Delta k(T)$. В результате при генерации, например гармоник, суммарных и разностных частот, нелинейный кристалл необходимо термостабилизировать.

Решение этой проблемы лежит в возможности реализации не критичных по температуре режимов преобразования частоты, для которых равна нулю, по крайней мере, первая производная волновой расстройки по температуре ($d\Delta k/dT = 0$). Работа направлена на проведение экспериментальных и теоретических исследований для разработки комплексной модели и методики определения направлений в одноосных и двухосных нелинейно-оптических кристаллах, вдоль которых реализуются не критичные по температуре взаимодействия (НКТВ).

Отличительная особенность данной работы состоит в том, что рассматривается возможность реализации не критичного по температуре синхронизма (НКТС) не только в режиме генерации оптических гармоник для определенных длин волн лазерного излучения, но и для всех процессов преобразования частоты для спектральных компонент, располагающихся во всем диапазоне прозрачности рассматриваемых кристаллов. На начальном этапе исследования для проверки корректности созданной модели были использованы кристаллы титанил-фосфата калия (КТР) и трибората лития (LBO). Созданная модель также позволит прогнозировать не только направления, вдоль которых реализуется режимы НКТС и НКТВ, но и коэффициент эффективной нелинейности d_{eff}^2 , который напрямую влияет на эффективность преобразования входного излучения.

За основу расчетной модели взят метод, предложенный в работах [1, 2]. На заданных длинах волн λ_1 и λ_2 выполняется расчет направлений фазового синхронизма. Выбирается то направление, для которого $d\Delta k/dT = 0$. На графиках (рис. 1б) представлены результаты для кристаллов КТР и LBO, соответственно, в виде распределения параметра $FOM_2 = d_{eff}^2/n^3$ (где n – показатель преломления кристалла в выбранном направлении) вдоль направления реализации режима НКТС относительно длин волн λ_1 и λ_2 входного излучения (принято, что $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$). Для сравнения (рис. 1а) также были отображены результаты, полученные в тех направлениях фазового синхронизма, для которого величина FOM_2 максимальна. При расчетах использовались данные из [3].

Прямая $\lambda_1 = \lambda_2$ соответствует случаю генерации второй гармоники; $\lambda_1 = \lambda_2/2$ – третьей гармоники; $\lambda_1 = \lambda_2/3$ – четвертой гармоники. Изолинии в поле диаграмм показывают длины волн генерируемого излучения (λ_3) при суммировании частот, либо длину волны накачки для случая генерации разностных частот и параметрической генерации света. Пунктирной

линией на графиках показан диапазон прозрачности кристалла, а штрихпунктирной – диапазон длин волн, в пределах которого определены уравнения Селмейера. Диапазон прозрачности кристалла КТР от 0,35 до 4,50 мкм [4, 5], а коэффициенты уравнения Селмейера к кристаллу определены для диапазона 0,43–3,54 мкм [6]. Для кристалла LBO диапазон прозрачности [7, 8] совпадает с диапазоном определения коэффициентов уравнения Селмейера [9] и составляет 0,2–3,2 мкм. Белым цветом на графиках отмечены области, где отсутствует фазовый синхронизм, либо области за пределами диапазона прозрачности; серым цветом – область, где есть синхронизм, но он не является некритичным по температуре.

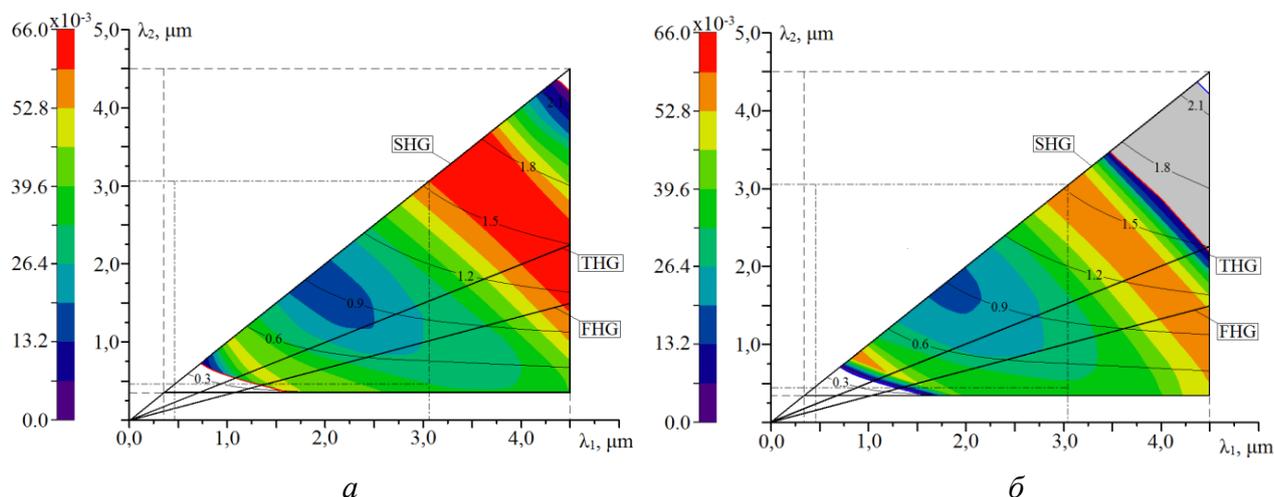


Рис. 1. Распределение $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$ для кристалла КТР: а – КТР, ssf – макс. FOM_2 ; б – КТР, ssf – НКТС FOM_2

Обратимся к графикам распределения FOM_2 для кристалла КТР (рис. 1). При их детальном анализе становится ясно, что хотя режим НКТС в общем случае обладает меньшими значениями FOM_2 по сравнению с максимально возможными, эта разница не так велика и зависит прежде всего от типа взаимодействия и длин волн, участвующих в нем. От типа взаимодействия зависит форма распределения d_{eff} [2], а от длин комбинируемых волн – направление, вдоль которого выполняются условия реализации режима НКТС.

Из представленных результатов следует, что при ГСЧ и ГРЧ в кристалле КТР возможна реализация режима НКТС почти во всем диапазоне фазового синхронизма. Учитывая тип взаимодействия, также можно утверждать, что режим НКТС реализуется и в большей области диапазона прозрачности представленных кристаллов.

Заключение

В данной работе представлена модель для расчета и обнаружения новых некритичных по температуре направлений синхронизма для одноосных и двухосных кристаллов в области их прозрачности. В работе показано, что для часто используемых на практике кристаллов КТР и LBO в широком диапазоне длин волн при генерации суммарных и разностных частот, а также параметрической генерации света, возможно осуществление режима некритичного по температуре синхронизма. Несмотря на меньшие значения параметра FOM_2 вдоль направлений НКТС, по сравнению со значениями, достигаемыми вдоль традиционных направлений, при условии достаточной лучевой прочности используемых нелинейных кристаллов и технологической доступности для изготовления, можно достигнуть насыщения процесса преобразования частоты. Данный эффект позволит получать высокие по эффективности преобразования и одновременно некритичные по температуре направления внутри кристалла.

Литература

1. Андреев Ю.М. и др. Функциональные возможности нелинейных кристаллов для преобразования частоты: одноосные кристаллы // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 1. С. 33–38.
2. Андреев Ю.М. и др. Функциональные возможности нелинейных кристаллов для преобразования частоты: двухосные кристаллы // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 11. С. 995–1001.
3. Dmitriev V.G. et al. Handbook of nonlinear optical crystals. 3rd ed. Springer, 1999. – 413p.
4. Александров А.Л. и др. Эффективные нелинейно-оптические преобразователи на кристаллах калий-титанил-фосфата // Квантовая электроника. 1985. № 7. С.1333–1334.
5. Kato K. Parametric oscillation at 3.2 μm in KTP pumped at 1.064 μm // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1991. Vol. 27. No 5. P. 1137–1140.
6. Kato K., Takaoka E. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for KTP// Applied Optics. 2002. Vol. 41. No 24. P.5040–5044.
7. Chen C. et al. New nonlinear-optical crystal: LiB3O5 // Journal of the Optical Society of America B. 1989. Vol. 6. No 4. P.616–621.
8. Kato K. Tunable UV generation to 0.2325 μm in LiB3O5 // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1990. Vol. 26. No 7. P.1173–1175.
9. Kato K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB3O5 // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1994. Vol. 30. No 12. P.2950–2952.



Жукова (Осипова) Мария Олеговна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: zhukovamo@ya.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ

М.О. Жукова (Осипова)

Научный руководитель – профессор В.Г. Беспалов

Цель работы – исследование влияния двухфотонного поглощения на работу электрооптических полупроводниковых кристаллов ZnTe, ZnSe и GaP, применяемых для генерации и детектирования терагерцового (ТГц) излучения. При использовании мощных источников лазерного излучения со сверхкороткими импульсами важно учитывать отклик электрооптических полупроводниковых кристаллов, так как он может изменить результаты. Было показано [1], что одним из основных эффектов, влияющих на изменение амплитуды проходящего сигнала, является двухфотонное поглощение (ДФП), причем этот процесс носит нелинейный характер. ДФП сокращает время сверхбыстрого отклика полупроводниковых материалов, способствует снижению интенсивности прошедшего через кристалл сигнала. Фотоиндуцированные носители заряда экранируют значительную часть сгенерированного ТГц-излучения в кристалле, тем самым ограничивая эффективность преобразования.

В ходе работы решены следующие задачи:

– выполнено моделирование ДФП квазистационарного излучения и сверхкоротких световых импульсов в широкозонных полупроводниках и сравнение полученных результатов;

– подготовлены образцы и проведен эксперимент на установке фемтосекундной спектроскопии накачка-зондирование для получения зависимостей поглощения излучения, падающего на кристаллы ZnTe, ZnSe и GaP, от времени задержки.

– осуществлено моделирование зависимостей энергии, поглощенной из зондирующего импульса в единице объема кристаллов ZnTe и ZnSe, от времени задержки с помощью квантово-механической теории возмущений.

– выполнено сравнение и анализ данных, полученных в ходе эксперимента и моделирования, с целью минимизации двухфотонного поглощения.

В работе используется модифицированный метод спектроскопии «накачка-зондирование» с использованием суперконтинуума в качестве излучения зондирования. На этапе обработки полученных данных численные расчеты реализуются в специально разработанном программном обеспечении в программной среде *LabVIEW National Instruments*, численное моделирование выполняется в программе *Mathematica*. Для построения полученных в результате численных расчетов графических зависимостей будет использоваться пакет для анализа данных *OriginPro 8.1*.

Для оценки процессов ДФП было проведено моделирование ДФП квазистационарного (непрерывного) излучения U_I и сверхкоротких световых импульсов U_{II} в полупроводниковых кристаллах [2] ZnTe и ZnSe:

$$U_I = \frac{2^{17/2} \pi e^4 m_r^{1/2} E_g^2}{3c^2 \hbar^7 \omega^5 \epsilon_\infty \tau} |M|^2 (2\hbar\omega - E_g)^{3/2} \Theta^2, \quad (1)$$

$$U_{II} = \frac{\Theta^2}{\tau} \frac{32\sqrt{10} e^4 m_r^{3/2} \omega}{c^2 \pi^{1/4} \hbar^3 \epsilon_\infty} \frac{Q|M|^4}{(E'_g - \hbar\omega)^2} (2\hbar\omega - E_g)^{1/2} \times \left\{ \exp\left(-\frac{11}{8} \gamma\tau\right) + \exp\left(-\frac{1+3\sqrt{14}}{3\sqrt{2}\pi} \gamma\tau\right) \right\}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, m_r – приведенная масса электрона и дырки, ϵ_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ω – частота света, E_g – ширина запрещенной зоны, Θ – энергия в импульсе падающего света, приходящаяся на единицу площади пучка, $M = \mathbf{e}_\kappa \cdot \mathbf{z}_{vc}$, \mathbf{e}_κ – единичный вектор поляризации световой волны, \mathbf{z}_{vc} – матричный элемент оператора координаты, τ – длительность импульса, γ – обратное время релаксации (феноменологический параметр затухания). Остальные обозначения приведены в [2].

Дело в том, что для длительности лазерного импульса меньше 100 фс (то есть меньше времени релаксации импульса свободных носителей заряда) представления золотого правила квантовой механики для случая процессов высоких порядков, используемых для расчета вероятности переходов за единицу времени (1), перестают правильно описывать поведение системы, и необходимо использовать другую теорию. Поэтому была рассмотрена теория нелинейного поглощения фс-импульсов (2) в условиях многофотонных резонансов [3].

Для расчета и сравнения числа электронно-дырочных фотоиндуцированных пар в кристаллах ZnSe и ZnTe использовались следующие параметры лазерного излучения: $\Theta \approx 1$ мДж/см² – энергия, переносимая одним импульсом через единицу площади, $\omega = 2,4 \times 10^{15}$ с⁻¹ – частота фс-излучения.

На рис. 1а приведены зависимости числа фотоиндуцированных пар для кристаллов при значении $\gamma = 2 \times 10^{12}$ с⁻¹. Различия между n_I и n_{II} не очень существенны. Если значения этих параметров еще меньшие, то различия становятся слабее. На рис. 1б зависимости числа электронно-дырочных пар от длительности импульса $n_{I,II}(\tau)$ приведены для большего

значения $\gamma = 1,0 \times 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Различия между концентрациями по формулам (1) и (2) весьма существенны.

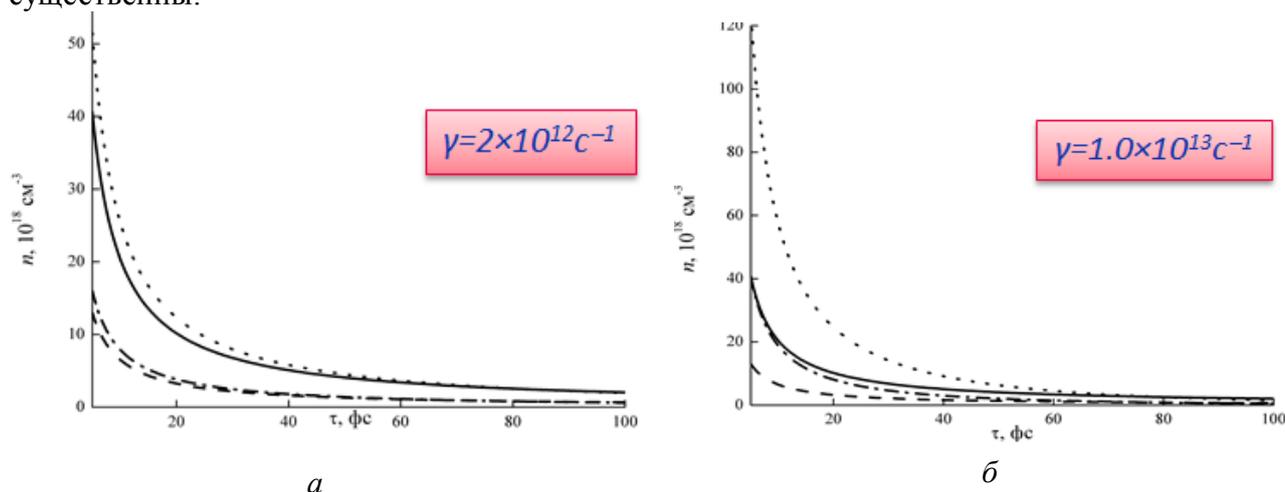


Рис. 1. Зависимость числа электронно-дырочных пар от τ для ZnTe: расчет по формуле (1) – сплошная линия, расчет по формуле (2) – пунктирная; для ZnSe: расчет по формуле (1) – штриховая, по формуле (2) – штрихпунктирная линия

В результате сравнения полученных данных было выявлено, что для нестационарного режима с уменьшением длительности импульсов происходит (при фиксированной энергии в импульсе) значительно более быстрое увеличение поглощенной энергии и концентрации неравновесных электронно-дырочных пар, чем для традиционного квазистационарного случая. Учет нестационарного характера ДФП фемтосекундных лазерных импульсов (2) позволяет более точно описывать кинетику фотоиндуцированных процессов в кристаллах. Поэтому в следующей части работы для моделирования поглощения в режиме спектроскопии «накачка-зондирование» будем использовать именно эту теорию.

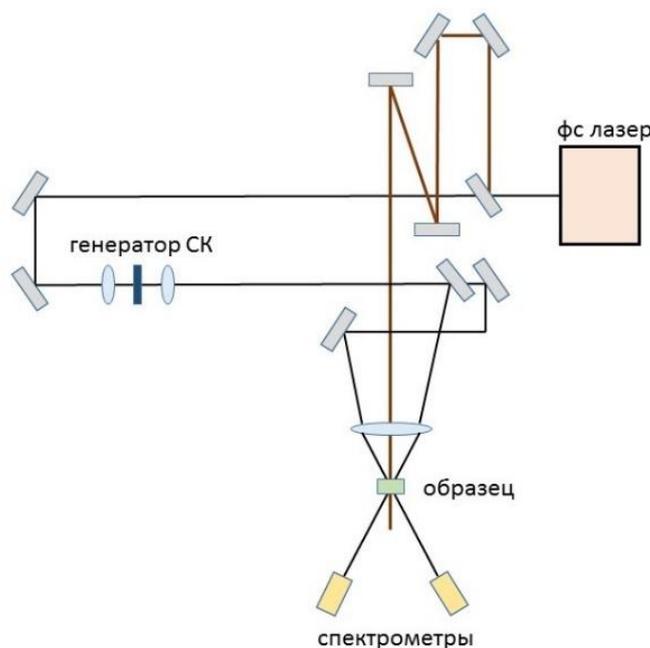


Рис. 2. Схема установки фемтосекундной спектроскопии «накачка-зондирование»

В следующей части работы были подготовлены образцы (шлифовка и полировка) и проведен эксперимент на установке фемтосекундной спектроскопии «накачка-зондирование» (рис. 2) для получения зависимостей поглощения излучения, падающего на кристаллы ZnTe, ZnSe и GaP, от времени задержки между импульсами. Используя импульсы фс-спектрального суперконтинуума [4] и варьируя время задержки относительно импульса

накачки, получаем динамику поглощения исследуемого образца в возбужденном состоянии и его релаксационные характеристики. Эти зависимости позволяют определить характеристики релаксации, природу взаимодействия и дисперсию показателя преломления.

Варьируя длину волны пробного импульса в диапазоне 350–1000 нм и плотность мощности накачки в диапазоне 4–50 ГВт/см², можно наблюдать полосы поглощения, их сдвиг и уширение (рис. 3). На различных частотах у каждого вещества вклад в процесс поглощения вносят различные эффекты, но основным является ДФП.

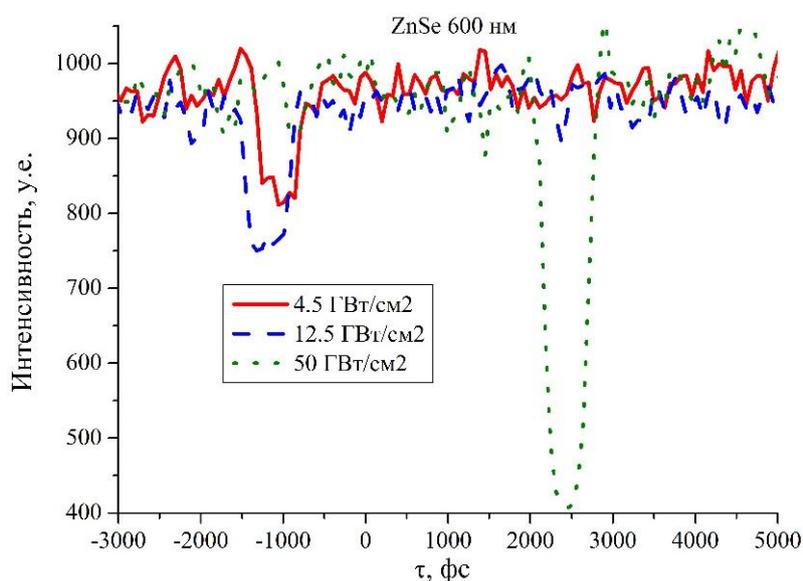


Рис. 3. Зависимость пропускания ZnSe от времени задержки между импульсами при изменении мощности накачки

В следующей части работы проводилось моделирование зависимости энергии, поглощенной из зондирующего импульса в единице объема кристалла, от времени задержки между импульсами с помощью теории нелинейного поглощения фемтосекундных световых импульсов в режиме спектроскопии «накачка-зондирование» [4].

$$J_{2,p-p}^{(3)} = \Delta_3^{1/2} \frac{\omega_2 \alpha^{(3)} \mu^{3/2} e^4}{\hbar^{9/2} c^2 \epsilon_\infty \sqrt{\sigma_1 + \sigma_2}} W_1 W_2 |x_{02} x_{21}|^2 \sum_{i,j} \Omega_{il} S_{ji}, \quad (3)$$

где ω_1 , ω_2 – частота импульса накачки и зондирования соответственно, σ_1 , σ_2 – квадрат длительности импульсов. Остальные обозначения приведены в [4].

Далее оценим количество энергии ΔJ , поглощенной за время задержки между импульсами. Были построены зависимости (рис. 5), которые в дальнейшем использовались для сравнения с экспериментальным результатом.

Далее была проведена оценка количества энергии ΔJ , поглощенной за время задержки между импульсами при разных длинах волн зондирующего импульса и мощностях накачки для экспериментальных и полученных в ходе моделирования данных.

Эти зависимости (рис. 5) имеют схожую динамику, что является подтверждением того, что основным вкладом в нелинейный отклик полупроводниковых кристаллов является ДФП. Теория нелинейного поглощения фемтосекундных световых импульсов хорошо согласовывается с экспериментом.

Минимальное влияние ДФП (по сравнению с изменением показателя преломления) наблюдается в кристалле ZnTe. При мощности накачки на уровне 10 мВт влиянием ДФП можно пренебречь – это понятно как из экспериментальных зависимостей, так и из проведенных расчетов.

В результате выполнения работы было рассмотрено влияние ДФП на электрооптические полупроводниковые кристаллы ZnTe, ZnSe и GaP, используемые для генерации и детектирования терагерцового излучения.

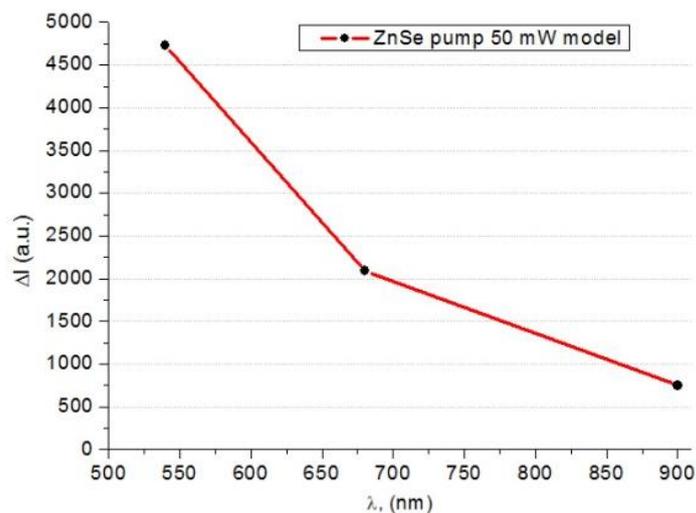


Рис. 4. Зависимости количества энергии ΔI , поглощенной за время задержки между импульсами, от длины волны пробного излучения для кристалла ZnSe

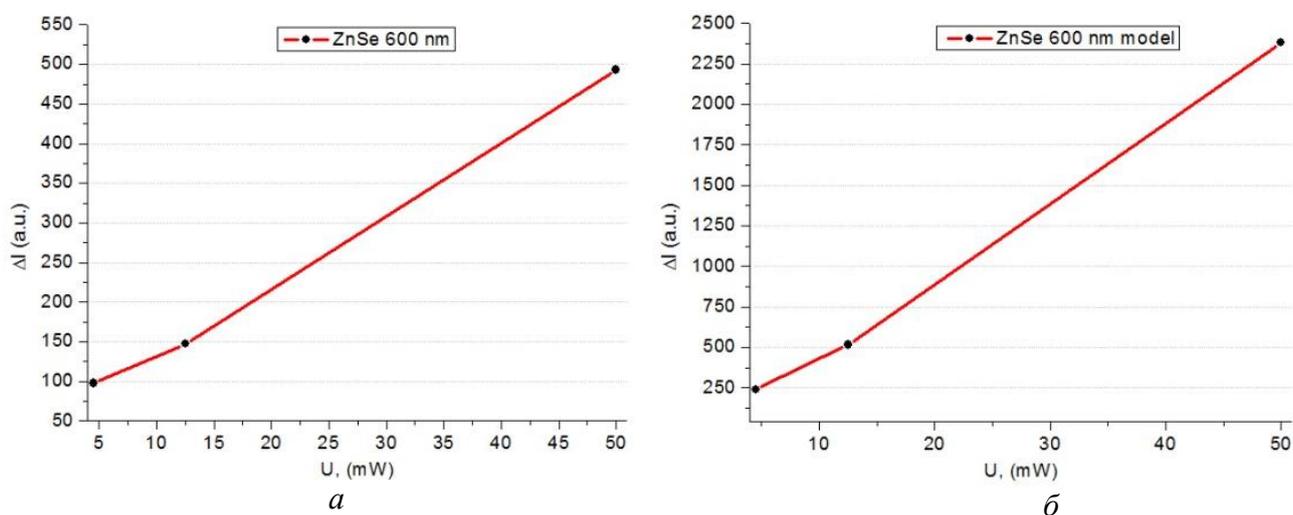


Рис. 5. Зависимости количества энергии ΔI , поглощенной за время задержки между импульсами: а – экспериментальные данные, б – моделирование

Приведены результаты апробации разработанного мною метода по определению границ динамического диапазона в системах терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени, показывающие наличие нелинейного отклика электрооптических кристаллов.

Проведен расчет и сравнение числа фотоиндуцированных электронно-дырочных пар, возникающих при ДФП в случае квазистационарного излучения и сверхкоротких световых импульсов в широкозонных полупроводниках.

Были подготовлены образцы и проведены серии экспериментов на установке спектроскопии «накачка-зондирование». Проведено моделирование поглощения при двухфотонном резонансе в режиме фемтосекундной спектроскопии «накачка-зондирование» с использованием квантово-механической теории нелинейного поглощения фемтосекундных световых импульсов. Сравнение экспериментальных и полученных в результате моделирования данных показало, что основным вкладом в нелинейный отклик полупроводниковых кристаллов является ДФП.

Его необходимо учитывать при использовании полупроводниковых материалов в качестве оптоэлектронных компонент в терагерцовом частотном диапазоне. Учет ДФП при использовании полупроводниковых материалов в качестве оптоэлектронных компонент в терагерцовом частотном диапазоне позволит улучшить производительность таких систем.

Метод фемтосекундной спектроскопии «накачка-зондирование» позволит исследовать динамику фононных переходов и нелинейных процессов в полупроводниковых монокристаллах.

Исследование широко используемых в терагерцовой технике электрооптических кристаллов ZnTe, ZnSe и GaP на сегодняшний день является актуальной и востребованной задачей. Учет взаимодействия этих кристаллов с мощным лазерным излучением, оценка ДФП, является необходимым для дальнейшего усовершенствования систем терагерцовой спектроскопии, что в свою очередь может внести весомый вклад в продвижение наукоемких технологий в Санкт-Петербурге.

Публикации

1. *Осипова М.О.* Исследование двухфотонного поглощения в электрооптических полупроводниковых кристаллах ZnSe и ZnTe [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3397/3397.pdf> (дата обращения: 15.09.16).
2. *Осипова М.О., Перлин Е.Ю.* Двухфотонное поглощение квазистационарного излучения и сверхкоротких световых импульсов в широкозонных полупроводниках // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 3–6.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618529. Программа для вычисления частотных и температурных зависимостей коэффициента поглощения света на внутризонных переходах с участием продольных оптических фононов / М.О. Осипова, Е.Ю. Перлин. Опубл. 02.08.2016.

Литература

1. *Гайворонский В.Я.* Конкуренция линейных и нелинейных процессов при генерации импульсного терагерцового излучения в кристалле ZnTe // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 5. С. 407–414.
2. *Осипова М.О., Перлин Е. Ю.* Двухфотонное поглощение квазистационарного излучения и сверхкоротких световых импульсов в широкозонных полупроводниках // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 3–6.
3. *Перлин Е.Ю., Елисеев К.А. и др.* Нелинейное поглощение фемтосекундных световых импульсов в условиях многофотонных резонансов в твердых телах // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 112. № 6. С. 920–927.
4. *Идрисов Э.Г., Перлин Е.Ю.* Нелинейное поглощение световых импульсов при двухфотонном резонансе в объемных кристаллах и наноструктурах в режиме фемтосекундной «pump-probe» спектроскопии // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 3. С. 497–507.



Закирзянов Илья Тимурович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: ilya.zakirzyanov@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПРЕДИКАТОВ НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ПРИ ПОМОЩИ СВЕДЕНИЯ К ЗАДАЧЕ О ВЫПОЛНИМОСТИ

И.Т. Закирзянов

Научный руководитель – доцент В.И. Ульянцев

Детерминированные конечные автоматы (ДКА) – это модели, которые распознают регулярные языки [1]. Проблема их построения является одной из наиболее изученных [2] в области грамматического вывода. С ее помощью может быть решено множество востребованных задач. Построение ДКА так или иначе встречается во многих задачах синтаксического распознавания, вычислительной биологии и обработки естественного языка [3].

Его построение заключается в нахождении ДКА с минимальным количеством состояний, удовлетворяющего заданному обучающему словарю: набору строк с метками принадлежности некоторому языку. Это значит, что искомый ДКА не допускает слова, помеченные отрицательной меткой, и допускает – помеченные положительной меткой. Можно также рассматривать задачу построения ДКА по зашумленным данным, когда некоторое небольшое количество строк отмечается неправильно, что необходимо учитывать при построении автомата.

Для построения автоматов в задачах данного типа успешно применяется подход, основанный на сведении к задаче выполнимости булевых формул (SAT) [4]. Решения многих задач оптимизации содержат симметрию – группу одинаковых по критерию оптимизации решений, которые могут быть получены друг из друга путем несложных преобразований. В задаче построения ДКА самой очевидной симметрией является группа изоморфных автоматов. Чтобы ускорить процесс поиска решения, можно уменьшить пространство поиска с помощью применения предикатов нарушения симметрии. В [4] нарушение симметрии было реализовано с помощью фиксирования цветов вершин в некоторой клике графа совместимости префиксного автомата. В данном же исследовании разработаны новые предикаты нарушения симметрии, которые могут быть добавлены в булеву формулу, соответствующую задаче построения ДКА с помощью сведения к задаче SAT. Предлагаемые предикаты должны фиксировать нумерацию состояний ДКА в порядке обхода в глубину или в ширину.

Цель настоящего исследования – разработка предикатов нарушения симметрии, которые позволят применять метод сведения к задаче о выполнимости для решения широкого класса задач, связанных с построением ДКА по обучающим словарям.

В данном исследовании разработана модификация существующего подхода DFASAT [4] для решения задачи с зашумленными данными. Она выполнена с помощью добавления дополнительных ограничений, вводимых в булеву формулу, получающуюся после сведения поставленной задачи к задаче о выполнимости. Предположим, что не более чем K меток данных обучающих строк были случайно изменены на противоположные. Необходимо учитывать возможные ошибки во входных данных. В [5] был предложен эволюционный алгоритм с некоторыми модификациями, и с тех пор этот подход является

наилучшим для построения ДКА по словарю с шумом. Исследования показали, что применима следующая идея: необходимо ввести дополнительный массив, который будет содержать ошибки, затем эффективно закодировать его в булеву формулу.

Идея предлагаемой модификации довольно проста: для каждого помеченного состояния префиксного дерева определим переменную, которая показывает, что метка данной вершины могла быть изменена на неверную. Количество ошибок ограничено числом K . Для каждого состояния v определим переменную f_v , которая истинна тогда и только тогда, когда метка состояния v может быть неверной. Используя эти переменные, можно модифицировать сведение, предложенное в [4], так, чтобы учитывать возможные ошибки в данном словаре. Чтобы ограничить количество ошибок числом K , будем использовать дополнительный массив, состоящий из K целочисленных переменных. Он хранит номера состояний в префиксном дереве, для которых метки могут быть изменены на противоположные. Таким образом, f_v истинна тогда и только тогда, когда этот массив содержит в себе номер состояния v . Чтобы избежать рассмотрения изоморфных перестановок массива, потребуем отсортировать его элементы по возрастанию.

В ходе выполнения проекта были разработаны новые предикаты нарушения симметрии на основе алгоритмов обхода графов. Приведем здесь только разработанные предикаты нарушения симметрии, основанные на поиске в глубину (*DFS*). Рассмотрим схему работы алгоритма *DFS*. Для каждого непосещенного состояния ДКА необходимо найти все непосещенные смежные состояния и повторить поиск для них. Первым делом алгоритм рассматривает стартовое состояние (не уменьшая общности, можно предположить, что его номер – 1). Затем по очереди рассматриваются все дети этого состояния, для каждого из которых алгоритм повторяется. Рассмотрим вспомогательную структуру данных в виде массива с переходами. В массив будем добавлять номера вершин в порядке их обработки алгоритмом, а переходы будут копиями переходов ДКА, которые использовались во время его обхода. Так как переходы в ДКА в поставленной задаче помечены символами из алфавита Σ , то дети обрабатываются в алфавитном порядке. Будем называть ДКА *DFS*-пронумерованным, если вспомогательный массив заполнен последовательными числами в возрастающем порядке, начиная с 1. Пример *DFS*-пронумерованного ДКА с шестью состояниями показан на рис. 1 (жирным выделены ребра, которые использовались во время обхода в глубину – так называемое *DFS*-дерево); вспомогательный массив для этого обхода показан на рис. 2. ДКА, изображенный на рис. 1, не является *DFS*-пронумерованным – алгоритм обхода в глубину обработает состояние 3 раньше, чем состояние 2 (переход $1 \xrightarrow{a} 3$ будет рассмотрен раньше, чем переход $1 \xrightarrow{b} 2$).

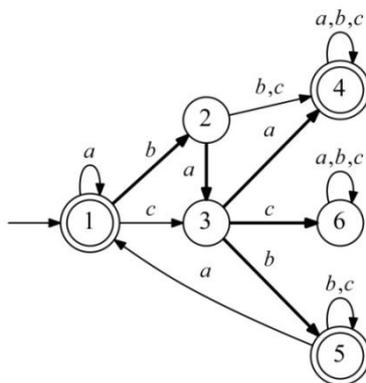


Рис. 1. Пример *DFS*-пронумерованного ДКА

Предлагается добавить дизъюнкты, которые оставят для рассмотрения только *DFS*-пронумерованные ДКА. Напомним, что в рассматриваемом сведении данной задачи построения ДКА к задаче *SAT* содержатся переменные $y_{l,i,j}$ ($l \in \Sigma; 1 \leq i, j \leq C$), которые истинны тогда и только тогда, когда из состояния i переход по символу l ведет в состояние j .

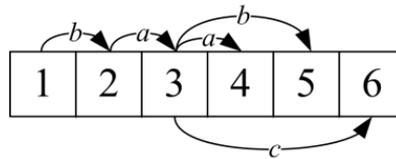


Рис. 2. Пример вспомогательного массива, построенного во время работы алгоритма DFS при обходе ДКА на рис. 1

Для всех вершин необходимо определить родителя в DFS-дереве. Будем хранить родителей в переменных $p_{j,i}$ (для всех $1 \leq i < j \leq C$). Переменная $p_{j,i}$ истинна тогда и только тогда, когда состояние i является родителем состояния j в DFS-дереве. Все состояния, кроме начального, должны иметь родителя с меньшим номером. То есть:

$$\bigwedge_{2 \leq j \leq C} (p_{j,1} \vee p_{j,2} \vee \dots \vee p_{j,j-1}).$$

Более того, в DFS-пронумерованном ДКА родители состояний должны быть упорядочены. Если i – номер родителя состояния с номером j , а k – номер какого-то состояния, больший i и меньший j ($i < k < j$), то номер t его ребенка не может быть больше j (рис. 3):

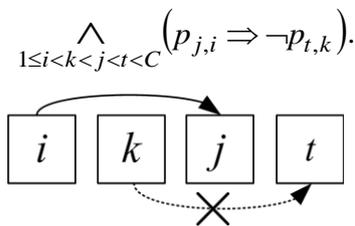


Рис. 3. Часть очереди, иллюстрирующая предикаты упорядочивания родителей. Пунктиром показан переход, который невозможен в DFS-пронумерованном ДКА

Определим переменные $p_{j,i}$ через переменные $y_{l,i,j}$, используя дополнительные переменные $t_{i,j}$. В DFS-пронумерованном ДКА состояние j было добавлено в очередь во время рассмотрения состояния с минимальным номером i среди состояний, которые имеют переход в j :

$$\bigwedge_{1 \leq i < j \leq C} (p_{j,i} \Leftrightarrow t_{i,j} \wedge \neg t_{i-1,j} \wedge \dots \wedge \neg t_{1,j}),$$

где $t_{i,j} \equiv 1$ тогда и только тогда, когда существует переход между i и j . Определим эти дополнительные переменные, используя переменные $y_{l,i,j}$:

$$\bigwedge_{1 \leq i < j \leq C} (t_{i,j} \Leftrightarrow y_{l_1,i,j} \vee \dots \vee y_{l_L,i,j}).$$

Чтобы обеспечить DFS-пронумерованность ДКА, необходимо упорядочить детей в алфавитном порядке по символам переходов. Отдельно рассмотрим два случая: алфавит Σ состоит из двух символов $\{a, b\}$ и более чем из двух символов $\{l_1, \dots, l_L\}$. В случае с двухсимвольным алфавитом только два состояния могут иметь одного родителя $i - j$ и k (где, не уменьшая общности, $j < k$). В этом случае переход, который начинается в состоянии i и помечен символом a , должен оканчиваться в состоянии j , а не в k :

$$\bigwedge_{1 \leq i < j < k < C} (p_{j,i} \wedge p_{k,i} \Rightarrow y_{a,i,j}).$$

Во втором случае требуется ввести третий тип переменных. Будем хранить минимальный (в алфавитном порядке) символ среди переходов между состояниями: $m_{l,i,j}$

истинна тогда и только тогда, когда существует переход $i \xrightarrow{l} j$ и не существует перехода между этими состояниями по меньшему (в алфавитном порядке) символу. Соединим эти переменные с переходами в ДКА, добавив следующие связывающие предикаты:

$$\bigwedge_{1 \leq i < j \leq C} \bigwedge_{1 \leq n \leq L} (m_{l_n, i, j} \Leftrightarrow y_{l_n, i, j} \wedge \neg y_{l_{n-1}, i, j} \wedge \dots \wedge \neg y_{l_1, i, j}).$$

Осталось только расставить состояния j и k , имеющие одного предка i , в алфавитном порядке по символам переходов между ними и предком i (рис 4):

$$\bigwedge_{1 \leq i < j < k \leq C} \bigwedge_{1 \leq m < n \leq L} (p_{j, i} \wedge p_{k, i} \wedge m_{l_n, i, j} \Rightarrow \neg m_{l_m, i, k}).$$

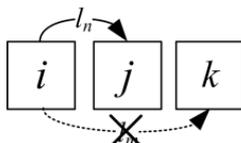


Рис. 4. Иллюстрация к предикатам, упорядочивающим состояния в алфавитном порядке.

Если состояние i – это предок состояний j и k , l_n (l_m) – минимальные (в алфавитном порядке) символы на переходах между i и j (i и k), тогда l_m не может быть меньше чем l_n

Для проведения исследований использовался собственный алгоритм для генерации входных данных для всех экспериментов, основанных на случайно сгенерированных данных. Этот алгоритм строит множество строк по следующим параметрам: N – размер ДКА, который должен быть получен в результате решения задачи, A – размер алфавита, S – количество строк, которые должны быть сгенерированы, K – уровень шума в данных (процент сгенерированных обучающих слов, которые должны быть случайно изменены).

Для построения ДКА по зашумленным данным в ходе экспериментов использовались случайно сгенерированные данные. Сначала рассмотрим случай, когда целевой ДКА существует и булева формула выполнима. Использовались следующие параметры: $N \in [5; 10]$, $A = 2$, $S \in \{10N, 25N, 50N\}$. Каждый эксперимент был повторен 100 раз. Ограничение по времени установлено на 1800 с. Сравнялось предложенное решение, использующее предикаты нарушения симметрии, основанные на обходе в ширину, с лучшим на данный момент подходом, основанном на эволюционном алгоритме из [5]. Первые же эксперименты показали, что эволюционный алгоритм полностью выигрывает у нашего подхода при $K > 4$. Поэтому этот параметр менялся в диапазоне 1–4 %. Результаты показаны в Табл. 1, 2 и 3. Представлены только те случаи, которые успели решиться за отведенное время. Эти результаты показывают, что подход, основанный на поиске в ширину, находит решение быстрее, чем эволюционный алгоритм только тогда, когда N мало (< 7), уровень шума мал (1–4 %) и количество строк также мало ($< 50N$).

В последнем эксперименте рассматривался случай, когда целевой ДКА не существовал и, соответственно, булева формула была невыполнима. В этом эксперименте снова использовался случайно сгенерированный набор данных. Алгоритм по поиску ДКА запускался со следующими параметрами: $N \in [5; 7]$, $A = 2$, $S = 50N$, $K \in [1; 2]$ процента. Однако строки словаря генерировались по ДКА размером $(N + 1)$. Следует заметить, что эволюционный алгоритм из [5] не может точно определить, что ДКА, удовлетворяющего заданному словарю, не существует. С другой стороны, все методы, основанные на сведении к задаче SAT, могут справиться с этой проблемой. Поэтому сравнивалась собственная реализация компактного сведения к задаче SAT без использования предикатов нарушения симметрии с собственной реализацией с использованием предикатов нарушения симметрии, основанных на обходе в ширину. Каждый эксперимент был повторен 100 раз. Ограничение по времени было снова установлено на 1800 с. Результаты представлены в Табл. 4. Из нее

видно, что основанная на *BFS* стратегия значительно уменьшает среднее время установления того факта, что ДКА не существует.

Таблица 1

Среднее время при решении задачи построения ДКА по зашумленным данным, $S = 10N$

N	K	BFS, с	EA, с
5	2	0,22	1,22
5	4	0,59	1,1
6	2	1,05	2,94
6	4	3,34	2,85
7	1	4,34	21,36
7	3	17,22	19,16
8	1	17,89	30,29
8	2	163,92	19,8

Таблица 2

Среднее время при решении задачи построения ДКА по зашумленным данным, $S = 25N$

N	K	BFS, с	EA, с
5	1	0,54	2,77
5	2	2,42	1,8
6	1	6,3	11,65
6	2	13,3	4,8
7	1	31,01	17,24
7	2	286,76	13,11
8	1	239,46	21,73

Таблица 3

Среднее время при решении задачи построения ДКА по зашумленным данным, $S = 50N$

N	K	BFS, с	EA, с
5	1	4,2	6,07
5	2	12,87	3,05
6	1	20,76	20,39
6	2	107,94	11,28

Таблица 4

Среднее время и процент найденных решений за заданное время при решении задачи построения ДКА по зашумленным данным, когда целевой ДКА не существует

N	K	BFS, с	WO, с	Успех BFS, %	Успех WO, %
5	1	11,57	257,13	100	100
5	2	46,42	1296,71	100	30
6	1	110,05	-	100	0
6	2	581,73	-	100	0
7	1	995,27	-	89	0
7	2	-	-	0	0

Публикации

Ulyantsev V.I., Zakirzyanov I.T., Shalyto A.A. BFS-based symmetry breaking predicates for DFA identification // Language and Automata Theory and Applications. 2015. Vol. 8977. P. 611–622.

Литература

1. *Hopcroft J. et al.* Introduction to automata theory, languages, and computation. Boston, 2006. – 750 p.
2. *De la Higuera C.* A bibliographical study of grammatical inference // Pattern Recognition. 2005. Vol. 38. No 9. P. 1332–1348.
3. *Mernik M. et al.* Grammar inference algorithms and applications in software engineering // XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT 2009). Sarajevo, 2009. P. 1–7.

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

4. Heule M.J., Verwer S. Exact DFA identification using SAT solvers // Proceedings of the 10th International Colloquium Conference on Grammatical Inference: Theoretical Results and Applications (ICGI 2010). Valencia, 2010. P. 66–79.

5. Lucas S.M., Reynolds T.J. Learning deterministic finite automata with a smart state labeling evolutionary algorithm // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. Vol. 27. No 7. P. 1063–1074.



Камалиева Айсылу Насыховна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: aisylu.kamaliewa@yandex.ru

НИЗКОПОРОГОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР

А.Н. Камалиева

Научные руководители: профессор Т.А. Вартанян,
младший научный сотрудник – Н.А. Торопов

Введение

Развитие современных вычислительных систем и приборов требует миниатюризации элементов фотоники, в частности источников когерентного излучения. Однако уменьшение размеров лазеров традиционной конструкции ограничено величиной порядка длины излучаемой ими волны. До недавнего времени считалось, что сконструировать лазерную систему для телекоммуникационного диапазона с размерами меньшими нескольких сотен нанометров невозможно. Однако развитие оптики металлических наноструктур привело к появлению наноплазмоники, позволившей обойти это ограничение. Возбуждение локализованных плазмонов в металлических частицах нанометрового масштаба может привести к когерентности между окружающими их квантовыми излучателями, что позволит реализовать лазеры, размеры которых меньше длины волны генерируемого ими излучения.

Среди возможных перспективных применений нанолазеров не только область передачи и обработки данных в новых поколениях вычислительных устройств [1], но и область биофотоники [2, 3].

Как и любой другой лазер, принципиально нанолазер состоит из трех частей: резонатора, активной среды и источника накачки. В качестве активной среды могут быть использованы традиционные для лазерной техники органические красители, а также полупроводниковые квантовые точки. Отличительной чертой нанолазера является устройство его резонатора, функцию которого выполняет металлическая наночастица, поддерживающая плазмонные колебания. Разрабатываемые нанорезонаторы, помимо субволновых размеров, должны обладать сравнительно высокой добротностью, так как известно, что чем выше добротность, тем меньше потери энергии.

Концепция работы плазмонного нанолазера была предложена в 2003 году в теоретической работе Д. Бергмана и М. Штокмана. Ими же была введена и аббревиатура для такого устройства – спазер [4]. Чуть позднее в 2009 году группа Ногинова сообщила об

экспериментальной реализации спазера [5]. В данной работе сферическая золотая наночастица диаметром 44 нм, окруженная стеклоподобной оболочкой с красителем Oregon Green, демонстрировала узкую полосу вынужденного излучения на длине волны 531 нм. Несмотря на то, что в работе [5] приведены убедительные экспериментальные подтверждения того, что наблюдалось именно вынужденное излучение, интерпретация результатов эксперимента как свидетельства о работе спазера вызывает возражения, связанные прежде всего с тем, что в объеме коллоидного раствора, использованного в эксперименте, возможна реализация процессов, характерных для случайного лазера.

Таким образом, возникает задача создания композитной структуры, содержащей лишь один монослой плазмонных частиц, покрытых красителем, что исключает возможность влияния эффектов многократного рассеяния.

Методы исследования

В качестве материала для создания наночастиц было использовано серебро, так как наночастицы данного металла обладают плазмонным резонансом в видимой области спектра. Островковые пленки наночастиц серебра были созданы методом термического осаждения паров металла на кварцевые подложки в вакуумной камере *Kurt Lesker* при давлении остаточных газов порядка 10^{-7} Торр. Эквивалентная толщина островковой пленки определялась кварцевым датчиком. Форма и размер наночастиц определяют положение и ширину плазмонного поглощения. Ширина полосы плазмонного поглощения также зависит от эквивалентной толщины островковой пленки.

На рис. 1 представлены спектры поглощения островковой серебряной пленки с наночастицами с эквивалентной толщиной 10 нм. Согласно данным, полученным со сканирующего электронного микроскопа, до отжига поверхность наночастиц представляет собой неоднородный ансамбль сплюснутых наноостровков нерегулярной формы. При нагревании их форма и спектр поглощения начинают меняться. Изменение спектра поглощения происходит из-за диффузии атомов по поверхности наночастиц. Форма частиц в отожженной пленке близка к форме полусферы, а ее спектр поглощения менее уширен. Поэтому для дальнейших работ были использованы отожженные серебряные пленки.

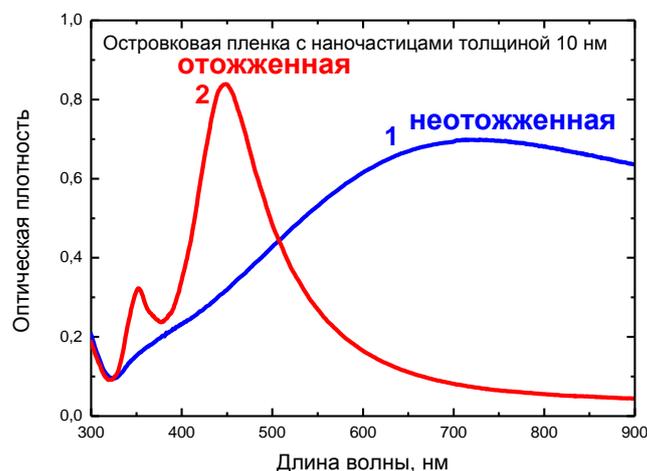


Рис. 1. Спектр поглощения островковой пленки с эквивалентной толщиной 10 нм:

1 – образец сразу после напыления, 2 – после отжига

Для создания спазера был выбран краситель кумарин, так как он обладает высоким коэффициентом усиления и спектрально близко расположен к полосам плазмонного резонанса серебряных наночастиц. Известно, что при близком расположении молекул к поверхности наночастиц флуоресценция молекул тушится металлом. Для того чтобы избежать этого, на поверхность наночастиц наносился тонкий полимерный слой (ПММА), который выполнял функцию изолирующего слоя. На поверхность наночастиц с ПММА

методом выпаривания наносился раствор кумарина в этаноле. Для сравнения полученный раствор также наносился на чистую кварцевую подложку.

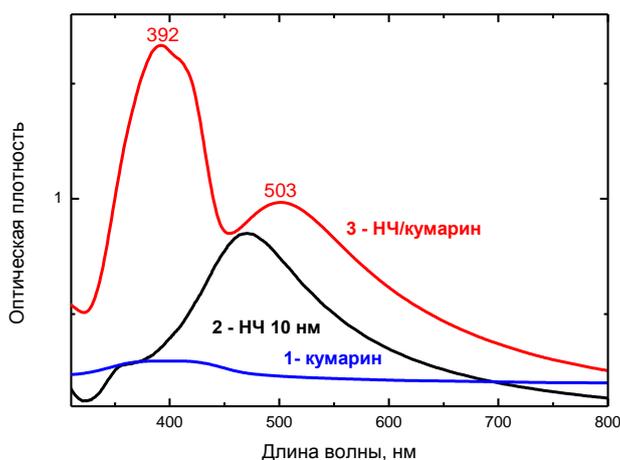


Рис. 2. Спектры поглощения

На рис. 2 представлены спектры поглощения: тонкой пленки кумарина (кривая 1), наночастиц серебра с эквивалентной толщиной 10 нм (кривая 2), тонкой пленки кумарина с наночастицами (кривая 3). В присутствии наночастиц наблюдается увеличение поглощения в 5,5 раз. Второй пик в спектре композита с максимумом на длине волны 503 нм связан со смещением плазмонного резонанса частиц.

Для снятия генерационных характеристик полученных композитных структур был собран экспериментальный стенд, схематически представленный на рис. 3

Для возбуждения молекул красителя кумарина использовался параметрический генератор света, накачиваемый третьей гармоникой Nd: YAG-лазера. Эксперименты были выполнены при работе генератора в импульсном режиме, длительность импульсов составляла – 10 нс, частота повторения импульсов 4 Гц.

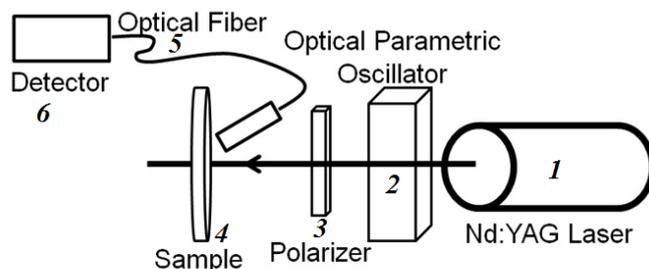


Рис. 3. Экспериментальная установка для снятия генерационных характеристик:
1 – Nd: YAG лазер, 2 – параметрический генератор света, 3 – поляризатор, 4 – образец,
5 – оптическое волокно, 6 – детектор

Флуоресцентный сигнал собирался с торца образца с помощью оптического волокна и подавался на многоканальный фотонный анализатор РМА-12 (Хамамацу, Япония). Длина волны возбуждения составляла 436 нм.

Основные результаты

На рис. 4 представлены спектры флуоресценции кумариновой тонкой пленки без наночастиц при различных энергиях накачки, которая варьировалась от 0,34 до 2,87 мДж. Данный выбор был обусловлен тем что, при значениях энергии накачки больше 2,87 мДж органика имеет тенденцию к разрушению, а при меньших, чем 0,34 мДж, флуоресцентный сигнал очень мал.

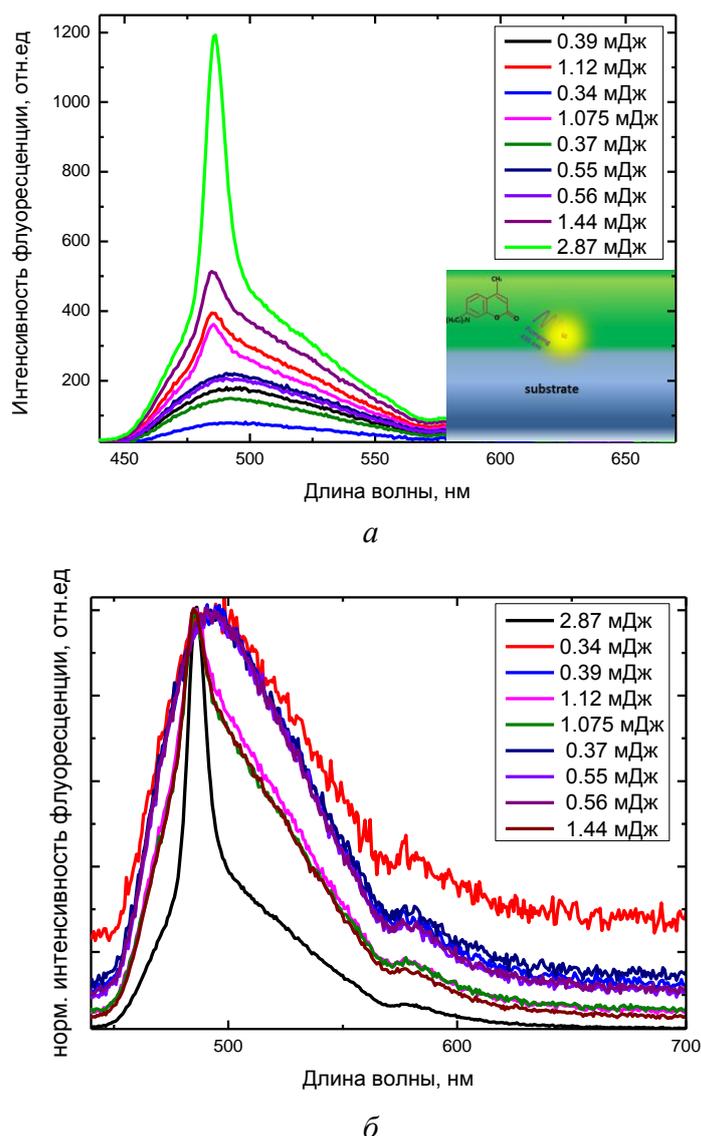


Рис. 4. а – спектры флуоресценции тонких пленок кумарина при разных энергиях накачки, длина волны возбуждения – 436 нм, б – нормированные спектры флуоресценции

Из рис. 4а видно, что с увеличением энергии накачки интенсивность флуоресценции возрастает, а при энергии 1,075 мДж и больше спектр начинает сужаться. Характер сужения наиболее отчетливо заметен в нормированном спектре флуоресценции (рис. 4б).

На рис. 5 представлены спектры флуоресценции для тонкой кумариновой пленки с наночастицами при различных энергиях накачки. Как и в образце без наночастиц, с увеличением энергии накачки интенсивность флуоресценции увеличивается. Однако в присутствии наночастиц флуоресценция молекул кумарина в девять раз больше, чем в их отсутствии.

Флуоресценция для тонких пленок кумарина с наночастицами с увеличением накачки возрастает нелинейно (рис. 6а) при этом имеется порог при 0,77 мДж. Для тонких пленок кумарина без наночастиц эта зависимость линейна (рис. 6б).

Для сравнения на рис. 7 представлены нормированные спектры флуоресценции образцов при минимальной энергии накачки 0,34 мДж и максимальной – 2,87 мДж. На рис. 7 видно, что в первом случае спектры флуоресценции обоих образцов идентичны. Во втором варианте в образцах с наночастицами в результате конкуренции мод флуоресценция намного слабее, чем пик генерации. В таком случае сужение спектра флуоресценции в образце без наночастиц можно интерпретировать как усиленное спонтанное излучение.

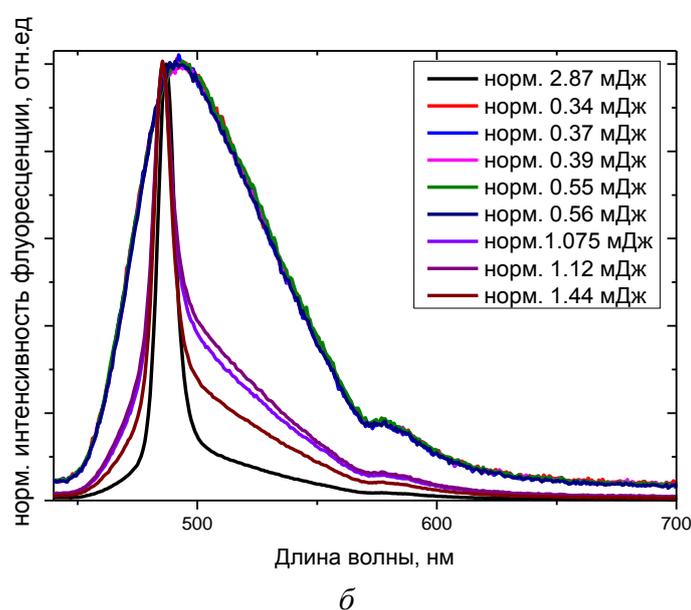
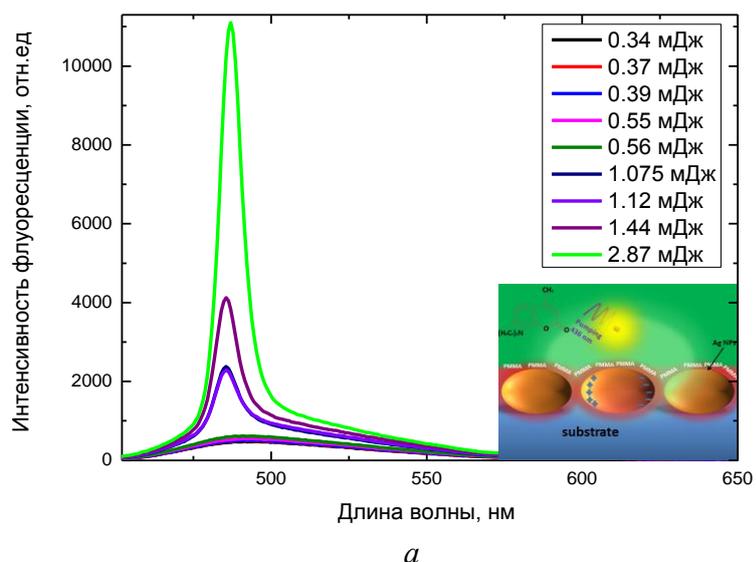


Рис. 5. а – спектры флуоресценции тонких пленок кумарина с наночастицами серебра при разных энергиях накачки, длина волны возбуждения – 436 нм, б – нормированные спектры флуоресценции

В случае, когда используется тонкая пленка, наблюдается вынужденное излучение, которое подтверждается следующими признаками: нелинейной зависимостью интенсивности флуоресценции от энергии накачки, усилением сигнала в 9,5 раз по сравнению с образцом без наночастиц, а также сужением спектра при энергиях накачки выше порогового значения.

Заключение

В работе созданы и исследованы композитные структуры на основе плазмонных наночастиц и органических молекул.

Для тонких пленок кумарина с наночастицами наблюдалось значительное увеличение поглощения, а также увеличение интенсивности флуоресценции в девять раз по сравнению с образцами без наночастиц. Анализ спектров тонких кумариновых пленок с наночастицами и без них показал, что при энергиях накачки больше 1,075 мДж флуоресцентный сигнал начинает сужаться. График зависимости интенсивности флуоресценции от энергии накачки для тонких кумариновых пленок без наночастиц имеет линейный характер, а для образцов с наночастицами, напротив, зависимость нелинейная с явно выраженным порогом. Таким образом, в тонких кумариновых пленках с наночастицами обнаружено

и продемонстрировано два признака вынужденного излучения: сужение и нелинейная зависимость. Сужение в образцах без наночастиц можно объяснить как усиленное спонтанное излучение.

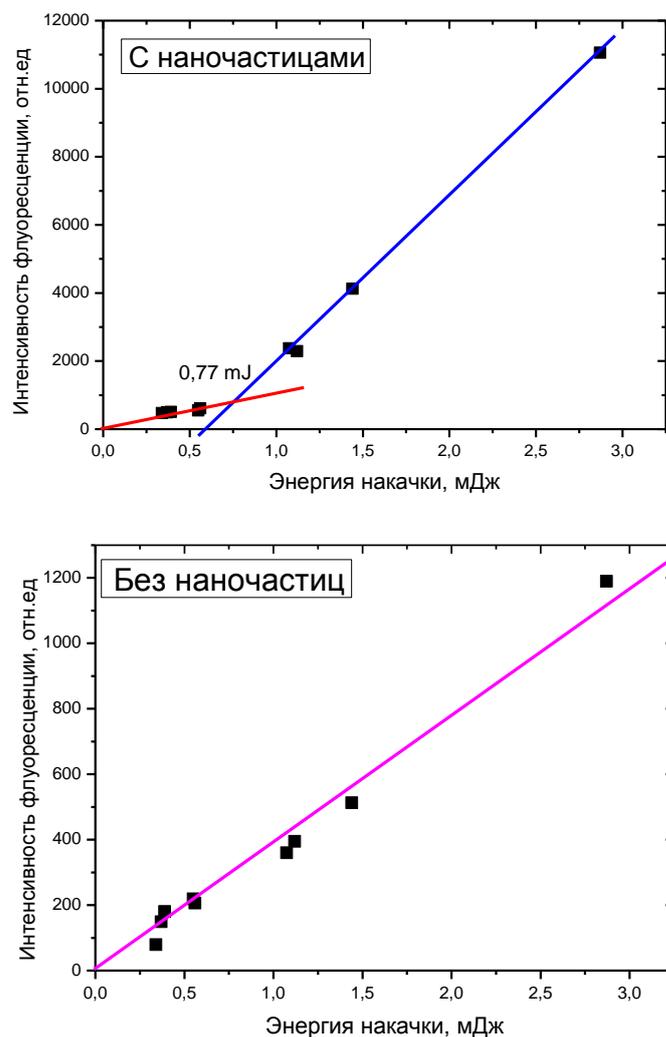


Рис. 6. Зависимость интенсивности флуоресценции тонкой пленки кумарина от энергии накачки

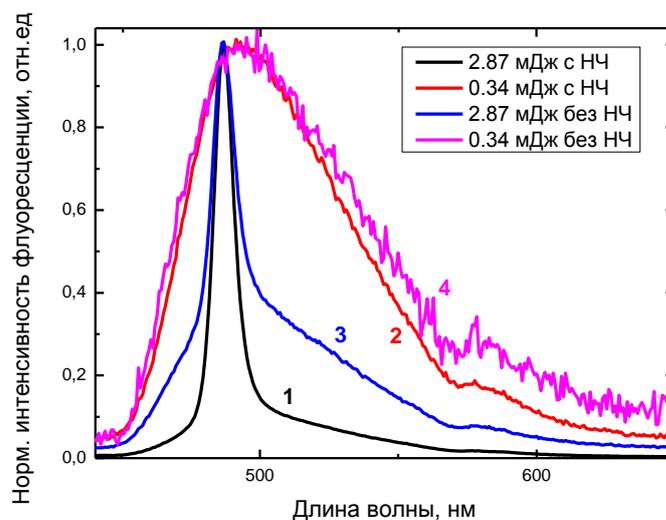


Рис. 7. Нормированные спектры флуоресценции для тонкой кумариновой пленки с наночастицами (1, 2) и без наночастиц (3, 4) при максимальной (2,87 мДж) и минимальной (0,34 мДж) энергиях накачки

Публикации

1. Kamaliev A.N. Optical properties of solid composite materials comprising plasmonic nanostructures and organic molecules // Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства: сборник трудов IV Международной конференции., г. Владимир, 2014. С. 82.
2. Камалиева А.Н. Усиление поглощения и флуоресценции молекул родамина в ближнем поле плазмонных наноструктур [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL:(http://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/3417/tonkie_organicheskie_plenki_s_nanochemicalami_serebra:_superlyuminescenciya_i_vynuzhdennoe_izluchenie.html). (дата обращения: 30.01.17).
3. Toropov N.A., Kamaliev A.N., Vartanyan T.A. Organic-inorganic planar hybrid materials for spasers // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9503. P. 95030A.
4. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Vartanyan T.A. Stimulated emission of organic dye molecules coupled nanostructured silver film // 23rd International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology». Saint-Petersburg, 2015. P. 202–204.
5. Камалиева А.Н. Исследование возможности получения вынужденного излучения тонких пленок красителей при взаимодействии с наночастицами // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015». СПб., 2015. С. 28–30.
6. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Vartanyan T.A. Thin films of organic dyes with silver nanoparticles: enhancement and spectral shifting of fluorescence due to excitation of localized surface plasmons // International Journal of Nanotechnology. 2016. Vol. 13. No 8/9. P. 642–647.
7. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Vartanyan T.A. Enhanced fluorescence and aggregation of rhodamine molecules dispersed in a thin polymer film in the presence of plasmonic nanostructures // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9884. P. 98843.
8. Камалиева А.Н. Тонкие органические пленки с наночастицами серебра: суперлюминесценция и вынужденное излучение [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: http://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/3417/tonkie_organicheskie_plenki_s_nanochemicalami_serebra:_superlyuminescenciya_i_vynuzhdennoe_izluchenie.html. (дата обращения: 30.01.17).
9. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Reznik I.V., Vartanyan T.A. Plasmon-assisted aggregation and spectral modification of the layered rhodamine 6G molecules // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. No 12. P. 562.

Литература

1. Leuthold J. et al. Plasmonic communications: light on a wire // Optics & Photonics News. 2013. Vol. 24. No 5. P. 28–35.
2. Gather M.C., Yun S.H. Single-cell biological lasers // Nature Photonics. 2011. Vol. 5. No 7. P. 406–410.
3. Radi Y. et al. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations // Physical Review Applied. 2015. Vol. 3. No 3. P. 037001.
4. Bergman D.J., Stockman M.I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems // Physical Review Letters. 2003. Vol. 90. No 2. P. 027402.
5. Noginov M.A. et al. Demonstration of spaser-based nanolaser // Nature. 2009. Vol. 460. No 7259. P. 1110–1113.



Карлагина Юлия Юрьевна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: jujukarlagina@corp.ifmo.ru

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ОКСИДНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОСТЕОИНТЕГРАЦИЮ И БИОСОВМЕСТИМОСТЬ ИМПЛАНТОВ

Ю.Ю. Карлагина

Научный руководитель – научный сотрудник Г.В. Одинцова

Значительная часть медицинских имплантов изготавливается из титана и его сплавов. Тем не менее вопрос их приживаемости по-прежнему остается открытым. При всей сложности этой проблемы установлено, что существенное влияние на биосовместимость и остеоинтеграцию титановых имплантов оказывает геометрическая структура поверхности, сказывающаяся на ее шероховатости и смачиваемости [1, 2]. Новые возможности управления морфологией поверхности, а также ее структурно-фазовым составом открываются при использовании лазерного излучения. Такое воздействие позволяет одновременно создавать как микро- и наноразмерные структуры на поверхности импланта, так и направленно менять ее состав.

Существующие методы структурирования поверхности (струйно-абразивная обработка корундом, стальной дробью и другие; гидротермальная и щелочная обработка; анодномикродуговое оксидирование; оксидное покрытие, нанесенное из газовой фазы; ультразвуковая обработка свободным абразивом) [3–5] не могут обеспечить ее развитый рельеф и оставляют загрязнения [6]. Другой вид обработки – с помощью фемтосекундных лазеров [3] – на сегодняшний день является слишком дорогостоящим для промышленного производства.

Как показали многие исследования, наличие микро- и нанорельефа на поверхности титановых имплантатов улучшает их биосовместимость с тканями живого организма и остеоинтеграцию. В работах [7–9] показано, что шероховатости, величиной в несколько нанометров, оказывают влияние на поведение белков, в то время как клетки чувствительны к структурам порядка 15 нм – 100 мкм. За счет увеличения площади поверхности сцепления импланта с костными тканями улучшается остеоинтеграция: структурированные импланты обладают лучшим сцеплением, чем импланты с полированной поверхностью, а протяженные параллельные канавчатые структуры оказывают влияние на поведение клеток – последние могут мигрировать по ним [2, 9]. Стоит отметить, что для некоторых частей импланта, например для абатмента дентального импланта, важна, наоборот, гладкая поверхность (с наименьшей шероховатостью) для того, чтобы уменьшить силу сцепления зубного налета и других загрязнений, способных провоцировать воспалительные явления в окружающих тканях. Кроме того, наличие оксидного слоя на поверхности импланта повышает его коррозионную устойчивость к средам организма [10].

Таким образом, является актуальным вопрос о разработке доступной технологии, позволяющей формировать развитый рельеф поверхности титанового импланта, обладающий такими механическими и физическими характеристиками, которые способны улучшить биосовместимость и ускорить процесс остеоинтеграции.

Широко распространенными во многих сферах производства на сегодняшний день являются относительно недорогие технологические комплексы на базе волоконных лазеров с наносекундной длительностью импульсов, обеспечивающих стабильную работу системы.

Цель проекта – исследование особенностей топографии поверхности титана, модифицированной излучением волоконного лазера с наносекундной длительностью импульсов, и ее влияния на смачиваемость и шероховатость как косвенные признаки скорости остеоинтеграции и биосовместимости.

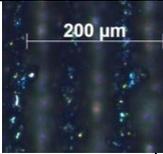
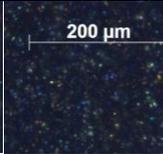
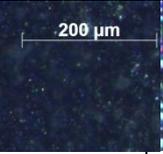
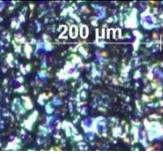
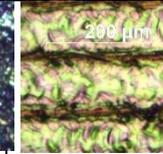
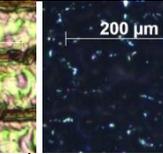
В результате выполнения работы были решены следующие задачи.

1. На поверхности титана ВТ1-0 сформированы оксидные структуры при различных комбинациях параметров лазерного воздействия с наносекундной длительностью импульсов.

Изменяя параметры лазерного воздействия, можно управлять топографией поверхности, что в свою очередь влияет на ее свойства. Поэтому в данной работе была поставлена задача формирования поверхностей с различной топографией. Этого можно достичь, меняя температуру нагрева поверхности лазерными импульсами и продолжительность лазерного воздействия путем корректировки значений таких параметров, как q – плотность мощности лазерного пучка в зоне обработки [$\text{Вт}/\text{м}^2$], N_x и N_y – шаг сканирования лазерными импульсами по осям X и Y , соответственно (Табл. 1).

Таблица 1

Сводная таблица режимов лазерного воздействия на поверхность образцов из титана марки ВТ1-0 и соответствующие им микрофотографии результатов

Режим №	1	2	3	4	5	6
$q, 10^{11} \text{ Вт}/\text{м}^2$	7,0	7,0	7,0	14,0	3,0	3,0
$N_x, \text{ мкм}$	3,3	3,3	3,3	50,0	0,8	0,8
$N_y, \text{ мкм}$	50,0	25,0	5,0	50,0	50,0	5,0
Микрофотография поверхности						

2. Исследованы особенности топографии поверхности образцов.

Изображения поверхностей отобранных образцов, полученных методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при увеличениях 500х–4 000х, приведены в Табл. 2.

Обработанная режимом № 1 поверхность представляет собой, судя по РЭМ-снимкам, периодическую структуру в виде параллельных канавок, оставленных последовательным сканированием лазерными импульсами поверхности в направлении оси X с шагом $N_x = 3,3$ мкм, а по оси Y с шагом $N_y = 50$ мкм, то есть импульсы не перекрывают друг друга. Период таких микроструктур составляет около 50 мкм, высота – 30 мкм, а характерный размер отдельных капель колеблется от 1,4 до 6,6 мкм.

При уменьшении шага сканирования по оси Y в два раза (режим № 2) на поверхности продолжает наблюдаться периодичность структуры порядка 40–60 мкм. Размер отдельных ее элементов составляет 8–30 мкм, высота – 31 мкм.

При еще большем уменьшении шага сканирования по оси Y (режим № 3) периодичность, присущая предыдущим двум образцам, пропадает. На поверхности формируется более неупорядоченная структура, высота которой составляет примерно 24 мкм, а характерный размер отдельных элементов равен 5–25 мкм.

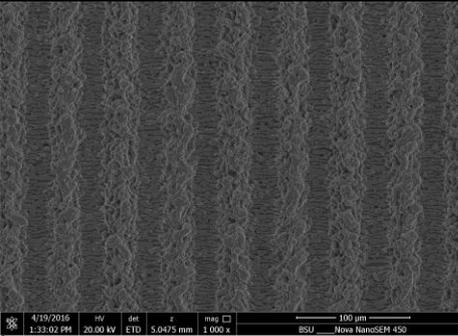
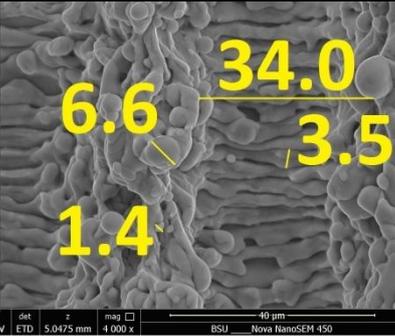
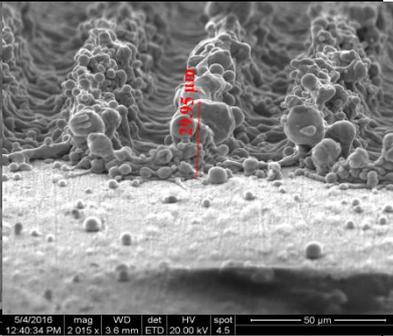
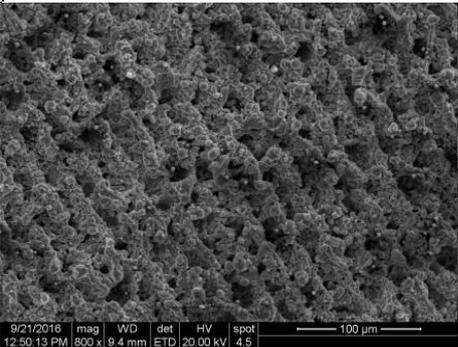
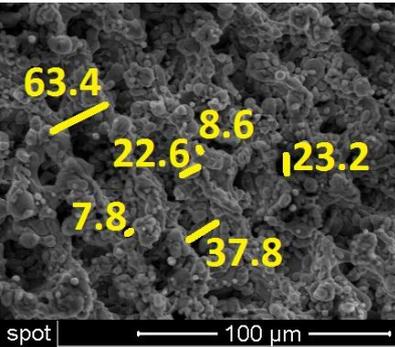
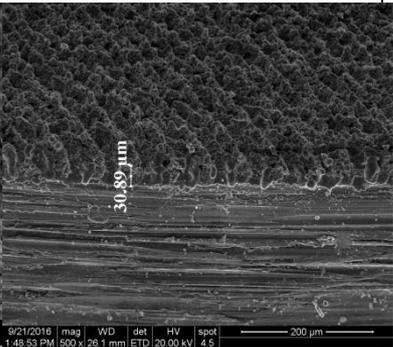
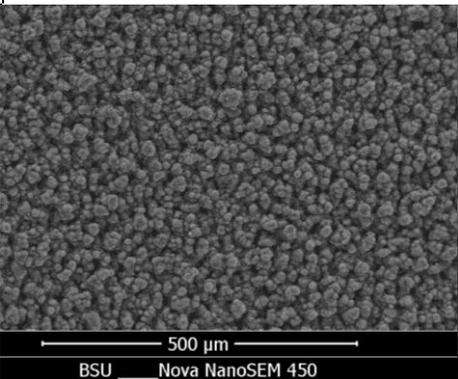
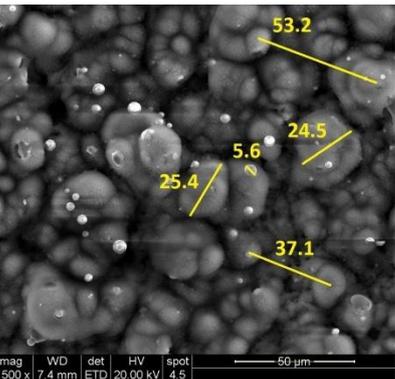
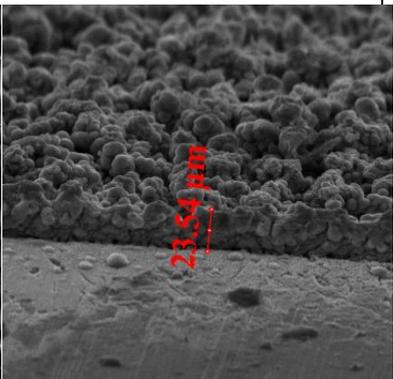
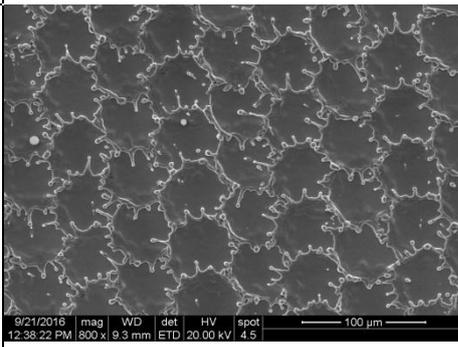
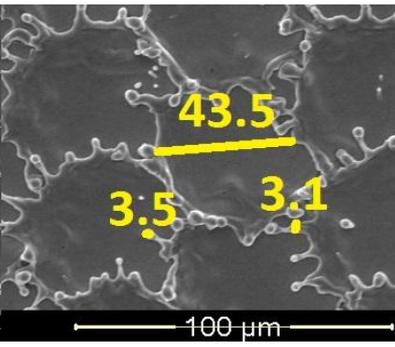
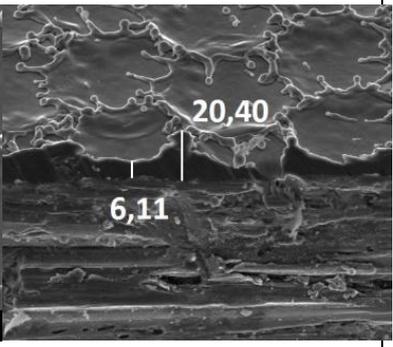
Режим № 4 образует на поверхности упорядоченную структуру, высота которой периодически меняется от 6 до 20 мкм. По РЭМ-снимкам можно сказать, что период таких структур порядка 44 мкм, а размер капель на поверхности – около 3 мкм.

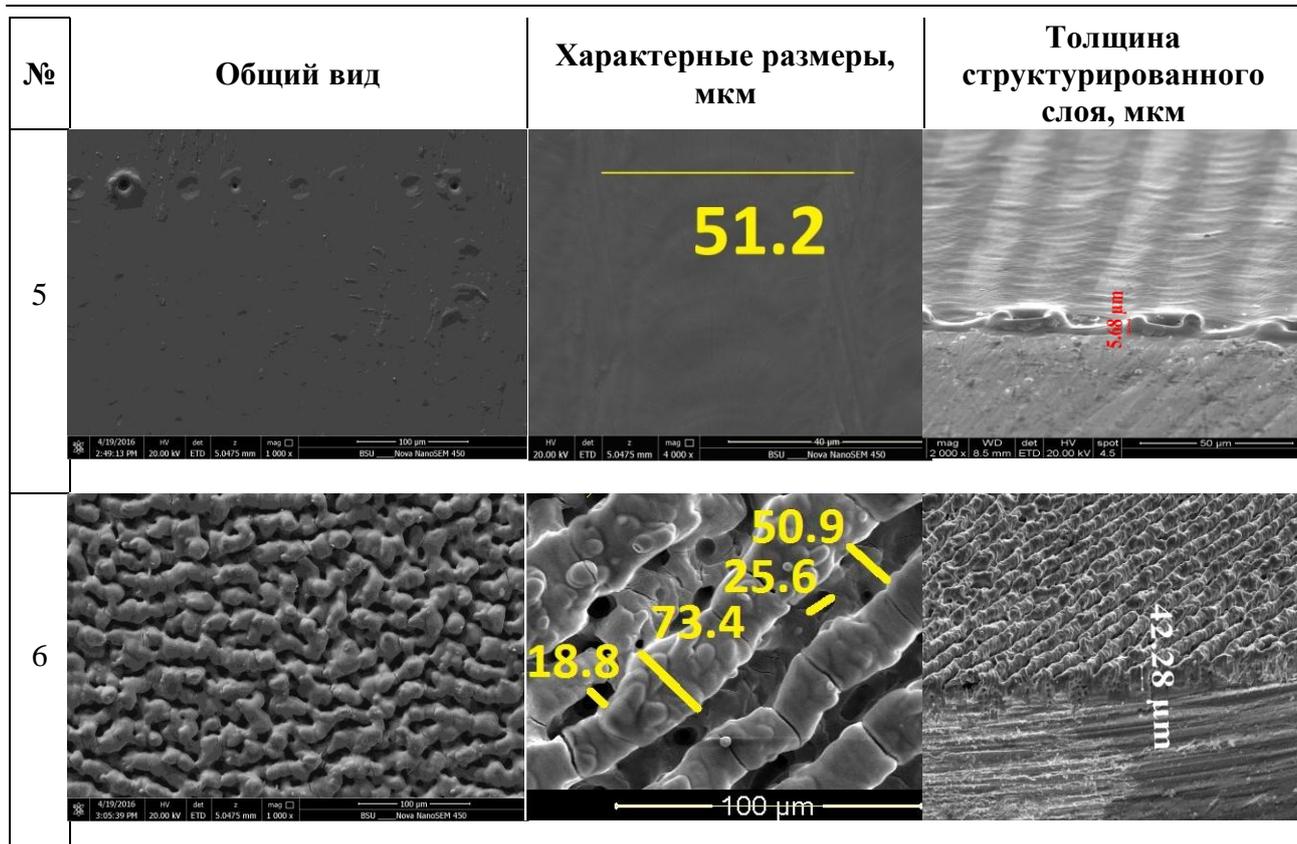
Относительно гладкий рельеф поверхности образует режим № 5, высота модифицированного слоя на краю составляет приблизительно 6 мкм. Можно сказать, что период такой структуры примерно равен диаметру лазерного пучка в зоне воздействия (фокусе оптической системы) и составляет 51 мкм.

При использовании того же значения плотности мощности и шага по оси X , но меньшего шага сканирования по перпендикулярной оси $N_y = 5$, образуются более вытянутые объемные микроструктуры со средним размером поперечного сечения около 70 мкм и высотой 42 мкм. Период этих структур – порядка 120 мкм.

Таблица 2

Снимки поверхности образцов, полученные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Увеличение варьировалось от 500х до 4 000х

№	Общий вид	Характерные размеры, мкм	Толщина структурированного слоя, мкм
1			
2			
3			
4			



Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что на поверхности всех образцов после лазерного облучения предложенными режимами преимущественно присутствуют Ti и O, то есть поверхность покрыта оксидным слоем.

3. Определена величина шероховатости R_a полученных структур методом профилометрии и измерена смачиваемость поверхностей титана марки VT1-0 после импульсного лазерного воздействия наносекундной длительности.

На профилометре *HommelTester T8000* были получены профили поверхностей образцов длиной 2 мм. На рис. 1 они расположены на одном общем графике. Рассчитанный для каждого образца параметр R_a приведен в Табл. 3 (θ – краевой угол смачивания).

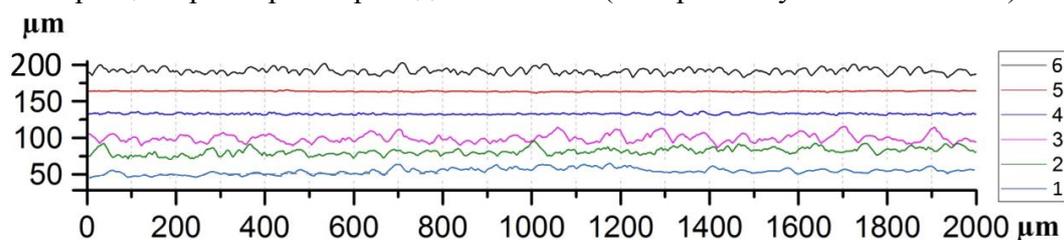


Рис. 1. Профили поверхностей полученных образцов при облучении режимами 1–6

Таблица 3

Результаты измерений смачиваемости поверхности образцов после их лазерной обработки

№ образца	R_a , мкм	Дистиллированная вода, θ_1°	Раствор для инъекций, θ_2°	Физраствор, θ_3°
1	3,7	119	124	122
2	2,89	98	91	119
3	4,22	109	100	115
4	0,7	49	60	58
5	0,33	81	71	76
6	2,91	87	78	78

Как известно, для повышения биосовместимости и увеличения скорости остеоинтеграции важна повышенная шероховатость поверхности, какой обладают образцы № 1, 2, 3, 6. Образцы № 4, 5 подходят для полировки поверхности.

Таким образом, хорошей шероховатостью ($Ra > 1$ мкм), но слабой смачиваемостью ($\theta > 90^\circ$) обладают образцы, обработанные режимами № 1, 2, 3. Хорошая смачиваемость ($\theta < 90^\circ$) и хорошая шероховатость присущи образцу после режима № 6. Хорошая смачиваемость и маленькая шероховатость ($Ra < 1$ мкм) – образцам после обработки режимами № 4, 5.

Заключение

В настоящей работе проведен анализ новых литературных данных по тематике проекта, показывающий перспективность использования лазерного структурирования поверхности титановых имплантов с целью повышения их биосовместимости и остеоинтеграции, а также представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность изменения таких свойств материала, как смачиваемость и шероховатость, за счет облучения лазерными импульсами наносекундной длительности.

Исследованы особенности топографии поверхности титана, модифицированной излучением волоконного лазера с наносекундной длительностью импульсов при разных комбинациях параметров воздействия, определены смачиваемость и шероховатость обработанных поверхностей, являющиеся косвенными признаками биосовместимости и остеоинтеграции.

Образцы № 1, 2, 3 обладают слабой смачиваемостью и достаточной шероховатостью. Образец № 6 – хорошими смачиваемостью и шероховатостью. Режимы, при которых были получены данные образцы, могут благотворно влиять на интеграцию живых клеток, так как этому способствует развитая поверхность.

Образцы № 4, 5 при малой шероховатости обладают достаточной смачиваемостью, поэтому такие режимы лазерного воздействия могут использоваться для полировки и маркировки поверхности, что востребовано при обработке верхней части дентальных имплантов – абатмента.

Результаты настоящего проекта являются началом исследования по разработке технологии создания биосовместимых нерезорбируемых покрытий, повышающих интеграционный потенциал медицинских титановых имплантов. Данная технология будет востребована на рынке, так как лазерный комплекс, на котором она реализуется, при некоторых модификациях позволит создавать разные виды рельефа – полированную поверхность и шероховатую – и быть конкурентоспособной с другими существующими технологиями. Коммерческая доступность данного комплекса и отсутствие расходных материалов при реализации технологии позволят внедрить его в производство.

Публикации

1. Вейко В.П., Одинцова Г.В., Горбунова Е.В., Андреева Я.М., Карлагина Ю.Ю., Романов В.В. Метод изменения цвета поверхности титана при локальном окислении наносекундными лазерными импульсами // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 243–248.
2. Карлагина Ю.Ю., Вейко В.П., Одинцова Г.В., Манохин С.С. Улучшение биосовместимости титана за счет микро- и наноструктурирования его поверхности импульсным излучением волоконного лазера // Физика – наукам о жизни. Первая российская конференция: тезисы докладов. СПб., 2016. С. 152.
3. Karlagina Yu.Yu., Odintsova G.V., Ageev E.I., Manokhin S.S., Kolobov Yu.R. Change of biocompatibility due to laser modification and oxidation of titanium surface // International Symposium «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-16): abstracts. SPb., 2016. P. 109.

Литература

1. Sykaras N. et al. Implant materials, designs, and surface topographies: their effect on osseointegration // The International Journal of Oral and Maxillofacial Implants. 2000. Vol. 15. No 5. P. 675–690.
2. Jones F.H. Teeth and bones: applications of surface science to dental materials and related biomaterials // Surface Science Reports. 2001. Vol. 42. No 3–5. P. 75–205.
3. Vorobyev A.Y., Guo C. Femtosecond laser structuring of titanium implants // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253. No 17. P. 7272–7280.
4. Bathomarco R.V. et al. Atomic force microscopy analysis of different surface treatments of Ti dental implant surfaces // Applied Surface Science. 2004. Vol. 233. No 1. P. 29–34.
5. Vanzillotta P.S. et al. Improvement of in vitro titanium bioactivity by three different surface treatments // Dental Materials. 2006. Vol. 22. No 3. P. 275–282.
6. Gaggl A. et al. Scanning electron microscopical analysis of laser-treated titanium implant surfaces – a comparative study // Biomaterials. 2000. Vol. 21. No 10. P. 1067–1073.
7. Brunette D.M. et al. Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications. Springer, 2012. – 1019 p.
8. Kasemo B., Gold J. Implant surfaces and interface processes // Advances in Dental Research. 1999. Vol. 13. No 1. P. 8–20.
9. Curtis A.S.G., Wilkinson C.D.W. Reactions of cells to topography // Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition. 1998. Vol. 9. No 12. P. 1313–1329.
10. Савич В.В. и др. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах. Минск, 2012. – 244 с.



Коваль Владислав Вячеславович
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: kovalvlad@yandex.ru

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ РЕШЕТОК ЛАЗЕРНОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ ДЛЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СХЕМ МИКРОБРАБОТКИ

В.В. Коваль

Научный руководитель – научный сотрудник М.М. Сергеев

В настоящее время в лазерной обработке материалов активно используются методы, основанные на регистрации интерференционной картины нескольких пучков в поле лазерной обработки. Применение такой микрообработки позволяет осуществлять формирование как одномерных, так двух- и трехмерных структур субмикронного размера [1–3]. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ), способные осуществлять разделение исходного светового пучка на заданное количество пучков, интенсивность каждого из которых может быть заранее рассчитана, крайне перспективны в схемах лазерной микрообработки. Частным случаем ДОЭ являются дифракционные фазовые решетки (ДФР), представляющие собой одномерный периодический микрорельеф на поверхности оптического материала, прозрачного для падающего на нее излучения. Такие ДФР способны разделять падающий на них пучок лазерного излучения на несколько, находящихся в одной

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

плоскости, причем соотношение энергии между дифрагировавшими пучками может регулироваться через параметры микро рельефа ДФР. Этим объясняется интерес к применению подобных решеток в двухлучевых интерференционных схемах лазерной микрообработки.

Экспериментальные методы

Формирование ДФР на пластине плавленного кварца проведено с использованием метода лазерно-индуцированной обработки микроплазмой (ЛИОМП [4]) на макете установки (рис. 1а). Она содержит: импульсный волоконный иттербиевый лазер (1) с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм, длительностью импульса $\tau = 4-200$ нс, частотой следования импульсов $\nu = 1-100$ кГц и двухкоординатное гальванометрическое сканирующее устройство (2) на базе приводов (G325DT GSI Lumonics). Объектив (3) с фокусным расстоянием $f = 210$ мм и полем обработки 100×100 мм создавал перетяжку лазерного пучка размером $d_0 = 50$ мкм; неподвижный координатный стол (4), на котором располагались пластины прессованного графита (5) и кварцевого стекла (6). Управление сканирующей системой и параметрами лазерного пучка осуществлялось с использованием компьютера (7).

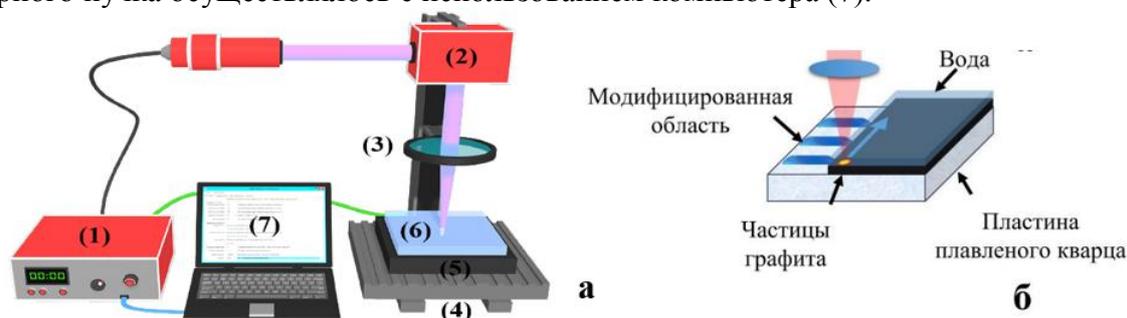


Рис. 1. а – экспериментальная установка формирования ДФР; б – этап очистки пластины плавленного кварца от частиц графита

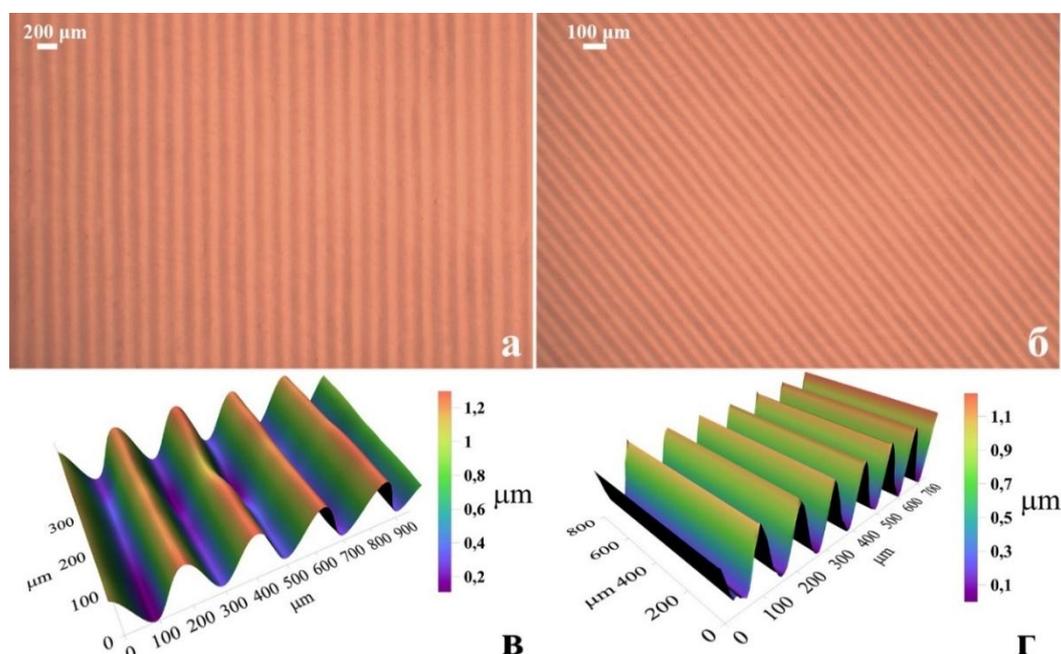


Рис. 2. Фотографии в отраженном свете: а – ДФР1; б – ДФР2; трехмерные профили поверхности: в – ДФР1; г – ДФР2

После процесса формирования ДФР поверхность плавленного кварца была полностью покрыта частицами графита. Ее очистка была проведена на той же экспериментальной установке (рис. 1б), при этом пластина графита – удалена из зоны обработки, а пластина

плавленого кварца – перевернута тыльной стороной вверх. Лазерное излучение фокусировалось на загрязненной стороне пластины, на которую предварительно наносился тонкий слой дистиллированной воды для минимизации ее повреждений в процессе очистки [5].

Ориентируясь на результаты исследований параметров структур, созданных технологией ЛИОМП, были изготовлены несколько ДФР, из которых для дальнейшего тестирования выбраны две. Одна из них, в дальнейшем именуемая первой, с глубиной рельефа $h = 1,4$ мкм и периодом $p = 200$ мкм была изготовлена при следующих параметрах лазерного воздействия – $P = 10$ Вт, $\nu = 60$ кГц, $V_x = 30$ мм/с; вторая ДФР с глубиной рельефа $h = 1,1$ мкм и периодом $p = 100$ мкм – при $P = 10$ Вт, $\nu = 60$ кГц, $V_x = 50$ мм/с. На рис. 2 приведены оптические фотографии, выполненные в отраженном свете на микроскопе *Carl Zeiss Axio Imager A1*, а также трехмерные фрагменты поверхности изготовленных решеток, выполненные на профилометре *Hommel Tester T8000*.

Интерференционная схема микрообработки

Изготовленные ДФР1 и ДФР2 были использованы в интерференционной схеме лазерной микрообработки. Экспериментальная установка (рис. 3а), состояла из волоконного иттербиевого лазера (1) ($\lambda = 1,07$ мкм, $\tau = 100$ нс, $\nu = 20$ кГц); тестируемой решетки (2), линзы с фокусным расстоянием $f_1 = 250$ мм (3), в фокальной плоскости которой наблюдалась интерференционная картина дифрагировавших пучков; пространственного фильтра – диафрагмы (4), которая отсекала нулевой дифракционный порядок, а также порядки меньшей интенсивности, и микрообъектива (5) с увеличением 10^x ($NA = 0,3$, $f_2 = 15$ мм), в фокальной плоскости которого располагалась структурируемая тонкая пленка хрома (6) толщиной 60 нм.

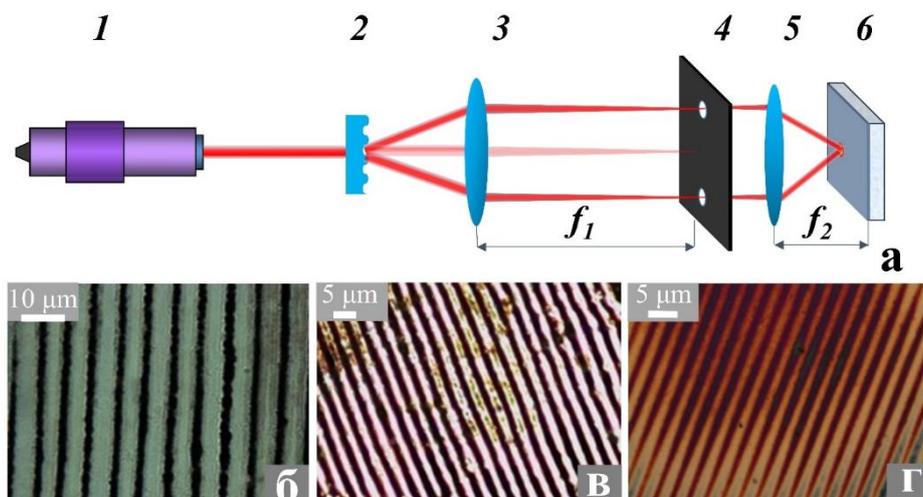


Рис. 3. а – экспериментальная установка для микроструктурирования тонких металлических пленок; примеры результатов обработки пленки с использованием: б – ДФР1; в, г – ДФР2

На рис. 3(б–г) показаны микрофотографии результатов обработки тонкой пленки хрома с использованием ДФР1 и ДФР2 при следующих режимах: частота следования импульсов $f = 20$ кГц, мощность излучения $P = 2$ Вт, время экспозиции $t \sim 5$ с. Видно, что период полос составил ~ 6 мкм при использовании ДФР1 и ~ 3 мкм – с ДФР2. Некоторые микродефекты, наблюдаемые вдоль полос на микрофотографии отпечатка интерференционной картины, связаны с тем, что для ее формирования использовался многоимпульсный режим обработки лазера с наносекундной длительностью импульса. Формирование интерференционной картины, являющейся результатом лазерной микрообработки, предпочтительнее осуществлять с использованием лазера с более короткой длительностью импульса (пикосекунды или фемтосекунды) в режиме микрообработки одиночным импульсом.

В настоящее время проводятся эксперименты по применению сформированных ДФР в схемах микрообработки, где в качестве источника излучения используется пикосекундный лазер. Вполне вероятно это будет способствовать устранению подобных микродефектов.

Период системы полос A в двухлучевой интерференционной картине, формируемой в плоскости обработки, определяется длиной волны излучения λ , используемой для ее формирования и углом θ между сходящимися пучками [6]:

$$A = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (1)$$

Угол θ для схемы, используемой в эксперименте, может быть выражен через расстояние между дифракционными максимумами ± 1 порядка и фокусное расстояние f_2 микрообъектива следующим образом:

$$\theta = \arctg \left(\frac{L_{\pm 1}}{2f_2} \right). \quad (2)$$

При использовании ДФР1 и ДФР2 угол θ , найденный из (2), и период интерференционной картины A , найденный из (1), составили соответственно $10,05^\circ$ и $3,04$ мкм и $5,07^\circ$ и $6,02$ мкм. На теоретическую зависимость периода интерференционной картины от угла падения θ пучков на плоскость обработки, рассчитанную по формуле (1), были нанесены полученные экспериментальные результаты (рис. 4). Таким образом, найденные по микрофотографиям результатов обработки, периоды системы полос в интерференционной картине удовлетворительно коррелируют с результатами расчетов. Следует отметить, что период полос интерференционной картины, записанной на пленке хрома, довольно велик. Как следует из формулы (1), он определяется длиной волны излучения λ и углом между сходящимися пучками θ и не может быть меньше, чем половина длины волны (что в условиях используемой схемы малореализуемо). Очевидными путями уменьшения периода является использование лазера с меньшей длиной волны (например, использование второй или третьей гармоники Nd:YAG-лазера) или короткофокусных микрообъективов с высоким увеличением (до $40\times$ и выше). Учитывая то, что расстояние между интерференционными максимумами ± 1 порядка примерно соответствует апертуре таких микрообъективов, это должно стать оптимальным решением для уменьшения периода полос интерференционной картины.

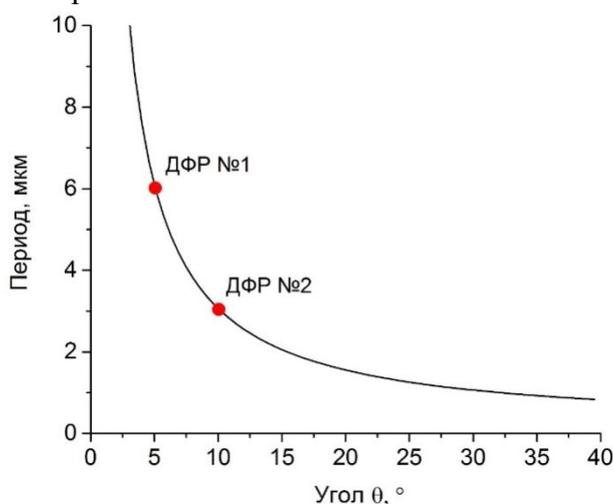


Рис. 4. Теоретическая зависимость периода интерференционной картины от угла падения θ пучков на плоскость обработки, на которую нанесены соответствующие экспериментальные результаты

Потери светопропускания в схеме установки для микроструктурирования тонких металлических пленок, обусловленные введением в схему ДФР (2) и диафрагмы (4), определялись измерением мощности в фокальной плоскости микрообъектива (5), первое из которых было выполнено без ДФР (2) и диафрагмы (4), а второе – при их введении в схему. В частности, потери на светопропускание при введении ДФР1 и диафрагмы составили ~42 %, для ДФР2 – ~63 %.

Заключение

Для изготовления ДФР с синусоидальным профилем на пластине из плавленого кварца была использована технология ЛИОМП. Эксперимент по тестированию ДФР в интерференционной схеме лазерной микрообработки показал, что формирование микроструктур с высоким разрешением может быть реализовано с использованием ДФР, изготовленных методом ЛИОМП. В ходе экспериментов по микроструктурированию пленки хрома, было установлено, что период полос, регистрируемых в поле обработки, удовлетворительно коррелирует с рассчитанными значениями периода двухлучевой интерференционной картины.

Публикации

1. Коваль В.В. Микроструктурирование тонких металлических пленок в схеме многолучевой интерференции лазерных пучков [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3367/3367.pdf> (дата обращения: 16.12.2016).
2. Koval V.V., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Kostyuk G.K. Recording of interference patterns on thin metal films by laser irradiation // International Symposium “Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies” (FLAMN-16): abstracts. SPb., 2016. P. 133–134.
3. Koval V.V., Rymkevich V.S., Kostyuk G.K., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P., Samokhvalov A.A. Micro-optical components fabrication by laser-induced micro plasma // The 24th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'16): abstracts. Galway, 2016. P. 133.

Литература

1. Kondo T. et al. Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 82. No 17. P. 2758–2760.
2. Zimmer K. et al. Excimer laser-induced etching of sub-micron surface relief gratings in fused silica using phase grating projection // Applied Physics A. 2002. Vol. 74. No 4. P. 453–456.
3. Xie Q. et al. Fabrication of nanostructures with laser interference lithography // Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 449. No 1. P. 261–264.
4. Zakoldaev R. et al. Laser-induced black-body heating (LIBBH) as a method for glass surface modification // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. 2015. Vol. 10. No 1. P. 15.
5. Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1 – general features, steam cleaning and shock processing // Optics and Lasers in Engineering. 2004. Vol. 41. No 2. P. 307–327.
6. Srikanth G. Measurement of period of interference patterns with sub-micron period // Optics and Laser Technology. 2007. Vol. 39. No 5. P. 918–921.



Ланцева Анастасия Андреевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: a.a.lantseva@gmail.com

ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОГО ПОДХОДА В РАМКАХ КРИМИНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Ланцева

Научный руководитель – доцент С.В. Иванов

Криминальная сеть представляет собой структуру, связывающую друг с другом представителей криминального рынка оборота наркотиков с присущими им функциональными ролями и индивидуальными свойствами, такими как пол, возраст, национальность, страна рождения. В работе [1] была отмечена аналогия между криминальными сетями и традиционными социальными сетями, широко распространенными в реальном мире. Однако в силу своей скрытой (*dark*) природы криминальные сети требуют особого подхода, связанного с необходимостью учета скрытых связей и высокой устойчивостью к разрушению из-за децентрализованной структуры и процессов самовосстановления потерянных связей после нарушения целостности структуры сети в результате внешнего воздействия. В более поздних исследованиях [2–4] функционирование криминальных сетей рассматривается в контексте сетевого анализа в симбиозе с экономической составляющей криминального рынка, что позволяет детализировать структуру преступных связей, выявить скрытые процессы и установить взаимосвязь между внешними воздействиями и устойчивостью сети. В рамках такого подхода было предложено рассматривать структуру криминальной сети как бизнес-процесса в рамках концепции *Value Chain* (цепочка поставок).

Научной целью проекта является создание методов моделирования городских процессов в рамках криминальных сетей, основываясь на сетевом подходе. Назначением проекта является формирование четкого понимания структуры криминальных сетей, а точнее рынков незаконного оборота наркотиков.



Рис. 1. Функциональные группы для Value Chain

Предыдущие традиционные представления структуры преступной сети в рамках теории графов не принесли весомых результатов, поэтому возникла необходимость в разработке новой структуры. Она отражает предпринимательскую сторону процесса культивирования каннабиса, так как сам процесс производства и реализации продукта (товара) является многоуровневым и взаимосвязанным, требующим четких этапов координации и организации. На рис. 1 представлена подробная схема *Value Chain* со всеми необходимыми связями между группами, занимающимися культивированием каннабиса.

Для работы с данными и с новой структурой сети был введен специальный формализм. Сеть, основанная на имеющихся данных, представляется стандартно в виде графа (G_{ds}), а криминальная сеть (модель сети) – это набор *Value Chains* (G_{vc}), где:

- $G_{ds}(N, E)$ – сеть, N – набор вершин (участников) сети, E – набор связей из датасета (« ds »);
- $G_{sub}(N_{sub}, E_{sub})$ – максимальная компонента связности (« sub ») в графе, где $G_{sub} \subseteq G_{ds}$, $N_{sub} \subseteq N$;
- $G_{vc}(N_{vc}, V)$ – сеть из *Value Chains* (« vc »), где $N_{vc} \subseteq N$, V – набор *Value Chains*;
- $N_{sub} = N_{vc} + N_r$, где N_{vc} – узлы из V , N_r – все оставшиеся узлы (« r »);
- $role[a]$ – роль узла « a » в *Value Chain*;
- $rules\{role[a]\}$ – правила для образования связей для узла « a ».

Данный формализм используется в описании алгоритма восстановления.

Под восстановлением понимается процесс, в котором каждый узел сети, не имеющий необходимых связей в рамках хотя бы одной цепочки, будет присоединен как минимум к одной уже существующей цепочке. Это естественным образом сформировало основу для алгоритма восстановления скрытых связей.

```

forall  $a \in N_r$ :
  • Define  $role[a] \in set\ of\ roles$ ;
  • Define  $rules\{role[a]\}$ 
  for  $i$  in  $k$ 
  {
    if  $rules_i == 0$ :
       $G_{sub}\text{-search}(\forall b_j) : rules_i == 1$ 
      if  $Shortest\ Path(a \rightarrow b_j) == 1$ :
        recover  $E(a, b_j)$ 
    ...
  }
  if  $\forall b_j : Shortest\ Path(a \rightarrow b_j) > 1$ :
     $k = 2$ 
    while  $rules_i == 0$ :
      if  $Shortest\ Path(a \rightarrow b_j) == k$ :
         $b = random(b_j)$ 
        recover  $E(a, b)$ 
         $rules_i = 1$ 
      else:  $k++$ 
  }

```

Рис. 2. Алгоритм восстановления

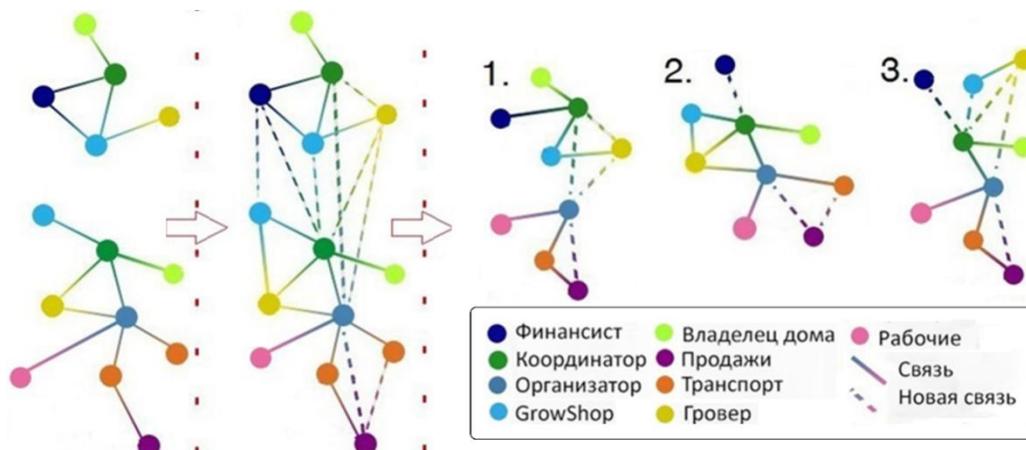


Рис. 3. Восстановление фрагмента сети с последующим выделением трех комбинаций цепочек

В этом случае криминальная сеть может рассматриваться как совокупность цепочек поставок, а их количество выступает в качестве метрики эффективности функционирования сети в целом. Однако процесс восстановления по своей природе имеет вероятностный характер, что приводит к возникновению ансамбля различных конфигураций криминальной сети, каждой из которых соответствует индивидуальный набор цепочек, при сохранении макроэкономических характеристик сети в целом (рис. 3).

Основной задачей при работе с криминальными сетями является исследование и оценка их устойчивости в результате удаления части узлов из сети, что соответствует арестам членов криминального сообщества в реальном мире. С этой целью были разработаны два семейства стратегий разрушения (рис. 4). Первое из них включает стратегии, основанные на стандартных свойствах сетей, таких как степень узла, а второе – на основе предложенной концепции *Value Chain*.

Для воспроизведения реальных свойств криминальных сетей, связанных с восстановлением утраченных связей после внешнего воздействия, каждый эксперимент с разрушением восстановленной сети сопровождается ее повторным восстановлением с использованием алгоритма восстановления связей, который применялся к исходной сети. В результате из ансамбля первично восстановленных сетей мы получаем новый ансамбль повторно восстановленных сетей для каждой из стратегий. Полученный ансамбль позволил провести анализ неопределенности результатов применения различных стратегий разрушения сети, который помогает в сравнении и оценке эффективности предложенных стратегий.

<p>а) <i>for num in 40:</i> <code>list = G_{vc}.search_most_degree(num)</code> <code>G_{vc}.remove(list)</code> <code>G_{vc}.algorithm_for_restoration</code></p>	<p>б) <i>for num in 40:</i> <code>list = G_{sub}.search_most_degree(num)</code> <code>G_{vc}.remove(list)</code> <code>G_{vc}.algorithm_for_restoration</code></p>
<p>в) <i>for num in 40:</i> <code>list = G_{vc}.search_most_popularVC(num)</code> <code>G_{vc}.remove(list)</code> <code>G_{vc}.algorithm_for_restoration</code></p>	<p>г) <i>while G_{vc}.count_vc != 0:</i> <code>node = G_{vc}.search_most_popularVC(1)</code> <code>G_{vc}.remove(node)</code> <code>G_{vc}.algorithm_for_restoration</code></p>

Рис. 4. Алгоритмы стратегий разрушений, основанных на степени узла:

а – в синтетической (восстановленной) сети; б – в начальной сети; на основе концепции *Value Chain*: в – наиболее часто проявляемые в различных цепочках; г – самый популярный узел

Рис. 5 демонстрирует процент разрушенных цепочек при применении разных стратегий. Из данного рисунка видно, что лучшие результаты дают стратегии, реализованные на основе концепции *Value Chain*, а стратегии, основанные на степени узлов в начальной сети (датасет) и синтетической сети (модель), – худшие. Следовательно, степень узла не влияет на становление цепочек. Данный феномен отчетливо прослеживается в результатах стратегии, основанной на степени узлов в синтетической сети.

Проводя общий анализ результатов всех стратегий, можно еще раз подтвердить, что стратегии, основанные на концепции *Value Chain*, дают лучший эффект, чем стратегии, основанные на традиционных свойствах узлов в графе. Это может быть оправдано тем, что полученная сеть является синтетической и субъективной, как уже упоминалось ранее. Тем не менее ее сильной стороной является то, что она имеет удобные и понятные показатели (характеристики) для анализа, которые отражают предпринимательскую сторону производства и реализации товара.

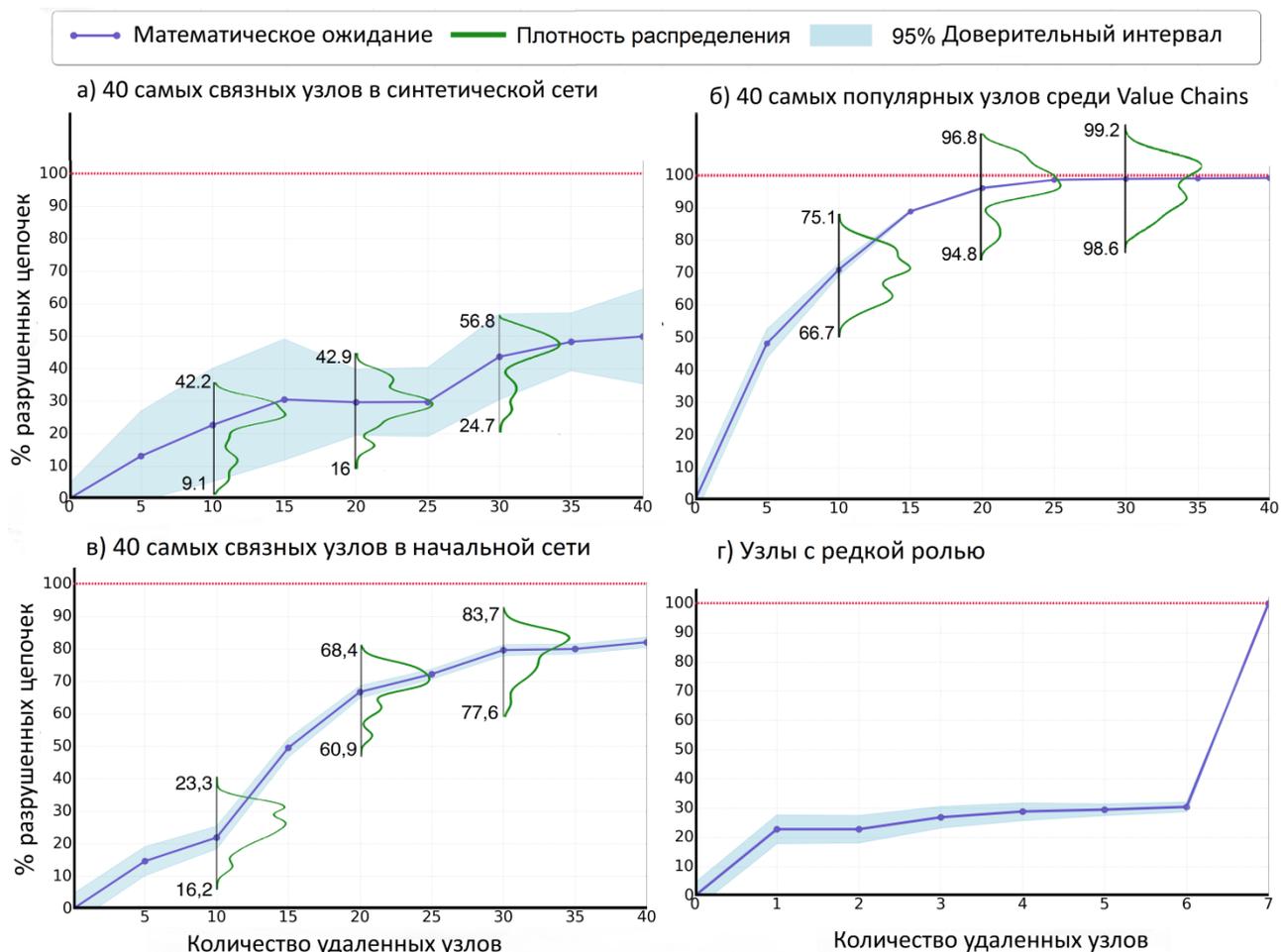


Рис. 5. Результаты работы стратегий разрушения: а – удаление вершин с наибольшей степенью в синтетической сети; б – удаление вершин с наиболее частым появлением в различных цепочках; в – удаление вершин с наибольшей степенью в начальной сети; г – удаление самого популярного узла в различных цепочках

Литература

1. Sparrow M.K. The application of network analysis to criminal intelligence: an assessment of the prospects // *Social Networks*. 1991. Vol. 13. No 3. P. 251–274.
2. Duijn P., Klerks P. Social network analysis applied to criminal networks: recent developments in Dutch law enforcement // *Networks and Network Analysis for Defense and Security*. Springer, 2014. P. 121–159.
3. Milwarda H.B., Raabb J. Dark networks as organizational problems: elements of a theory // *International Public Management Journal*. 2006. Vol. 9. No 3. P. 12–15.
4. Sloot P.M.A. et al. The relative ineffectiveness of criminal network disruption [Electronic resource] // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 4. No 4238. URL: <http://www.nature.com/articles/srep04238> (accessed: 15.11.16.).



Лобода Александр Александрович
 Факультет информационных технологий и программирования
 Кафедра компьютерных технологий
 E-mail: loboda@rain.ifmo.ru

РЕШЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ПОИСКА СВЯЗНОГО ПОДГРАФА МАКСИМАЛЬНОГО ВЕСА

А.А. Лобода

Научный руководитель – А.А. Сергушичев

Задача поиска подграфа максимального веса естественно возникает при проектировании различного рода сетей, в компьютерном зрении, вычислительной биологии. Задача является NP-трудной, однако на практике существуют эффективные решатели [1, 2], которые сводят ее к задаче смешанного целочисленного программирования (СЦП). При анализе сетей биохимических реакций возникает задача более общего вида [3]. Известные решатели этой задачи [4] неприменимы на практике. Более того, обобщенная задача не сводится тривиально к частным случаям.

В этом проекте был разработан алгоритм для решения обобщенной задачи, включающий:

- правила препроцессинга и декомпозиции, полученные путем модификации существующих правил для частной задачи;
- компактное линейное сведение к задаче СЦП;
- ограничения нарушения симметрии.

Также было проведено сравнительное тестирование алгоритма на частных случаях задачи с эффективными решателями *Heinz* и *Heinz2*.

Определение. Дан связный неориентированный граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин и E – множество ребер, весовая функция $\omega: (V \cup E) \rightarrow \mathbf{R}$. Обобщенная задача нахождения связного подграфа максимального веса состоит в поиске связного подграфа $G' = (V', E')$ такого, чтобы его суммарный вес был максимальным:

$$\Omega(G') = \sum_{v \in V'} \omega(v) + \sum_{e \in E'} \omega(e) \rightarrow \max.$$

Алгоритм состоит из трех частей: препроцессинга, декомпозиции и процесса сведения к задаче СЦП. Исчерпывающая реализация препроцессинга связана с применением двух правил. Во-первых, можно стянуть некоторые ребра. Пусть $e = (u, v)$, вес ребра неотрицателен, а $\omega(e) + \omega(v) \geq 0$ и $\omega(e) + \omega(u) \geq 0$, тогда такое ребро можно стянуть, поскольку в оптимальном решении не может присутствовать только одна из инцидентных ребру вершин. Во-вторых, можно избавиться от отрицательных цепей. Если вершина отрицательного веса инцидентно равна двум ребрам отрицательного веса, то она заменяется одним ребром с суммарным весом этих трех элементов. Это утверждение получено модификацией правила из [1].

Декомпозиция, позволяющая разбить задачу на несколько частей, представлена на рис. 1.

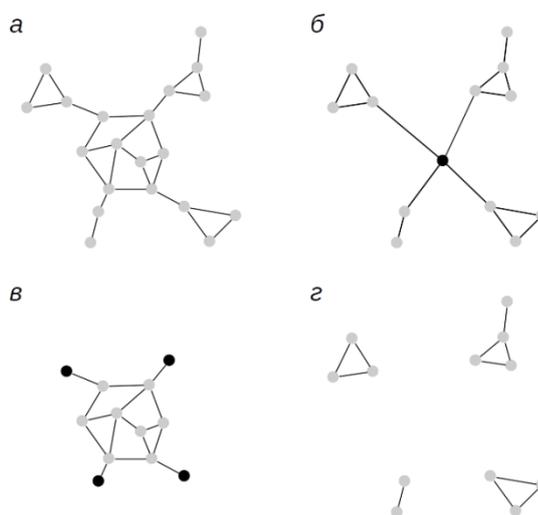


Рис. 1. Декомпозиция

Пусть на входе имеется экземпляр обобщенной задачи (рис. 1а). Сначала объединяем наибольшую двусвязную компоненту в одну вершину с нулевым весом и решаем корневую задачу для модифицированного таким образом графа с корнем в созданной вершине (рис. 1б). Затем заменяем каждую из компонент, ветвящуюся из наибольшей двусвязной компоненты, на одну вершину с весом, равным весу соответствующего подграфа в решении корневой задачи с предыдущего шага (рис. 1в). Далее пытаемся найти подграф с наибольшим весом, который лежит полностью в одной из этих ветвящихся компонент (рис. 1г).

И наконец, было предложено использовать следующее сведение к задаче СЦП. Пусть y_v – бинарная переменная, отображающая присутствие вершины в решении, w_e – бинарная переменная, отображающая присутствие ребра в решении. Кроме того, нелинейная модель из [4] использует дополнительные переменные, так как связность подграфа доказывается наличием дерева его обхода. Так переменная r_v отображает тот факт, что вершина v является корнем дерева обхода; переменная d_v определяет расстояние от вершины v до корня, а переменная x_{vu} равна 1, если ребро между u и v присутствует в дереве обхода и 0 – если нет. В дополнение к нелинейной модели из [4] использовались ограничения, представленные в Таблице. Результаты тестирования приведены на рис. 2.

Таблица

Сведение к задаче СЦП

Формула	Описание
$d_v + nr_v \leq n, \forall v \in V;$	Нулевое расстояние от корня до корня
$n + d_u - d_v \geq (n + 1)x_{vu}, \forall (v, u) \in A;$	Ограничение на расстояние до корня для остальных вершин
$n + d_v - d_u + \geq (n - 1)x_{vu}, \forall (v, u) \in A.$	
$d_v - d_u \leq n - (n - 1)w_e, \forall e = (v, u) \in E$	Ограничения нарушения симметрии, только дерево обхода в ширину может доказывать связность подграфа
$d_u - d_v \leq n - (n - 1)w_e, \forall e = (v, u) \in E$	

Точки обозначают экземпляр задачи, оси графиков – логарифмические шкалы времени работы различных решателей. Серые линии – вторые максимальные и минимальные по времени запуски теста. Как мы видим, предложенный решатель решает задачи быстрее, чем *Heinz* и сравним по скорости с *Heinz2*, который способен решать только вершинно-взвешенные задачи.

В результате выполнения проекта был разработан алгоритм решения обобщенной задачи поиска подграфа максимального веса. Тестирование показало, что программа может эффективно решать экземпляры задачи, возникающие при анализе сетей биохимических

реакций. Кроме того, предложенное сведение к задаче смешанного целочисленного программирования отличается простотой и компактностью.

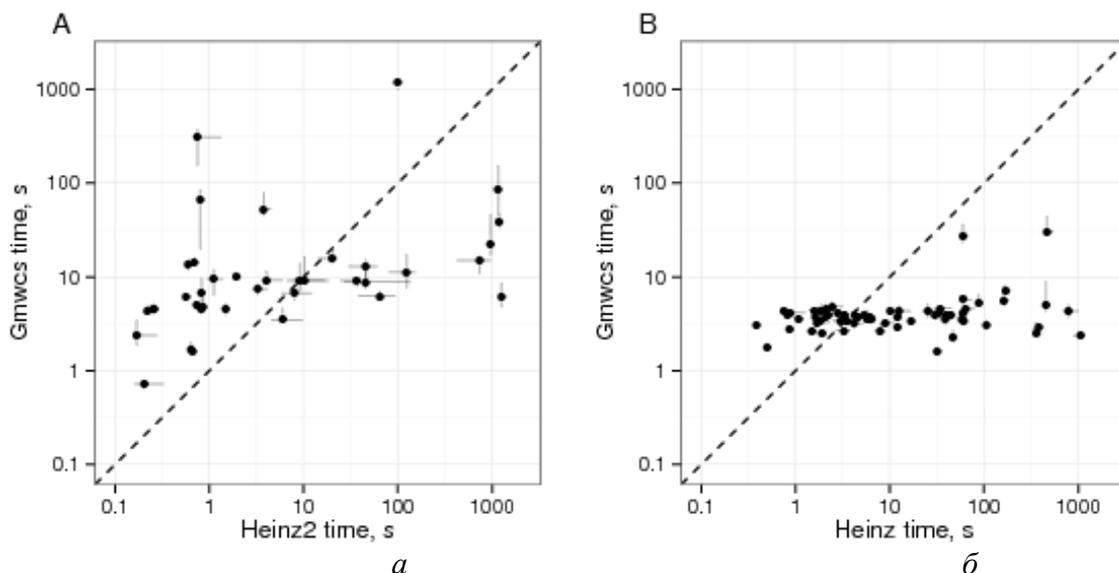


Рис. 2. Сравнение времени работы: а – предложенного решателя и Heinz2 на вершинно-взвешенных экземплярах задачи; б – предложенного решателя и Heinz на экземплярах обобщенной задачи

Публикации

Loboda A.A., Artyomov M.N., Sergushichev A.A. Solving generalized maximum-weight connected subgraph problem for network enrichment analysis // Algorithms in Bioinformatics. 2016. Vol. 9838. P. 210–221.

Литература

1. El-Kebir M., Klau G.W. Solving the maximum-weight connected subgraph problem to optimality [Electronic resource]. 2014. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.5308.pdf> (accessed: 25.12.16).
2. Álvarez-Miranda E. et al. The maximum weight connected subgraph problem // Facets of Combinatorial Optimization. 2013. P. 245–270.
3. Sergushichev A. GAM: a web-service for integrated transcriptional and metabolic network analysis // Nucleic Acids Research. 2016. Vol. 44. No W1. P. W194–W200.
4. Haouari M. et al. Enhanced compact models for the connected subgraph problem and for the shortest path problem in digraphs with negative cycles // Computers & Operations Research. 2013. Vol. 40. No 10. P. 2485–2492.



Марченко Олеся Николаевна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: m-olesya94@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО В ИК-ДИАПАЗОНЕ

О.Н. Марченко

Научный руководитель – начальник НТО Б.П. Папченко

Цели проекта – разработка и исследование параметрического генератора света (ПГС) на кристаллах КТА с перестраиваемой длиной волны в диапазонах 1,45–1,65 мкм и 3-4 мкм. Данное устройство может применяться в медицине: стоматология, диагностика, терапия и хирургия.

Использование лазеров в медицине принципиально отличается от других многочисленных технологических областей их применения гуманистической направленностью. Если у человека есть серьезные проблемы со здоровьем, то вопросы медицины становятся неизмеримо важнее любых других проблем. Лазерные медицинские технологии отличаются многоплановостью, комплексностью, разнообразием. Лазерная медицина включает воздействие лазерного излучения на различные части тела: кожу, кости, мышцы, жировые ткани, сухожилия, внутренние органы, глаза, зубные ткани и т. п., каждая из которых имеет сложное строение. Так в зубе можно отдельно рассматривать эмаль, дентин, пульпу. В коже – роговой слой, эпидермис, дерму. Все эти ткани имеют различные свойства как оптические (спектральные характеристики, коэффициент отражения, глубину проникновения излучения), так и теплофизические (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость), отличные от свойств других биотканей. Поэтому и характер воздействия на них лазерного излучения различен. В каждом случае необходимо выбирать индивидуальные параметры режима облучения: длину волны, длительность воздействия, мощность, частоту следования импульсов и т. п.

Серьезное различие свойств биотканей дает возможность применять специфические воздействия на них, например чрезкожное воздействие на патологические ткани (облучение подкожных тканей без существенного повреждения кожи). Каждая ткань в силу своей биологической природы неоднородна, имеет сложную микроструктуру. В состав мягких тканей входит значительное количество воды, в состав костей – различные минералы. Поэтому результат разрушающего (хирургического) воздействия на разные ткани излучателями с разными длинами волн будет иметь свои особенности как с точки зрения качества удаления биоткани, так и ее количества. Это означает, что существует несколько совершенно различных механизмов удаления биологических тканей: тепловой и низкоэнергетический коагуляционный с последующей резорбцией, взрывные механизмы, холодная абляция.

Интересно, что для осуществления терапевтического воздействия на определенную часть тела лазерное воздействие может быть направлено совсем на другой объект. Показательной является лазерная терапия, когда облучение крови, особых точек или проекций органов на коже человека (зоны Захарьина – Геда), стопе или ладони, области позвоночника оказывает воздействие на внутренние органы, весьма удаленные от области воздействия, и на весь организм в целом. Кроме того, поскольку организм представляет собой единое целое, результат воздействия продолжается достаточно долго после его

непосредственного окончания в течение дней, недель и даже месяцев. Такая сложность и комплексность лазерной медицины делает ее очень интересной для исследования и разработки новых технологий.

В ходе выполнения проекта разрабатывался лазерный излучатель с оптической схемой и конструкцией, позволяющий изменять в широких пределах его основные параметры (мощность, длительность и энергию импульса, частоту их следования, длину волны излучения, расходимость).

Устройство позволяет варьировать длину волны в диапазонах 1,45–1,65 мкм и 3–4 мкм. Выбранный диапазон длин волн связан со спектром поглощения (рис. 1) основных хромофоров биоткани (оксигемоглобин, вода, меланин) и соответствует пикам поглощения в спектре [1].

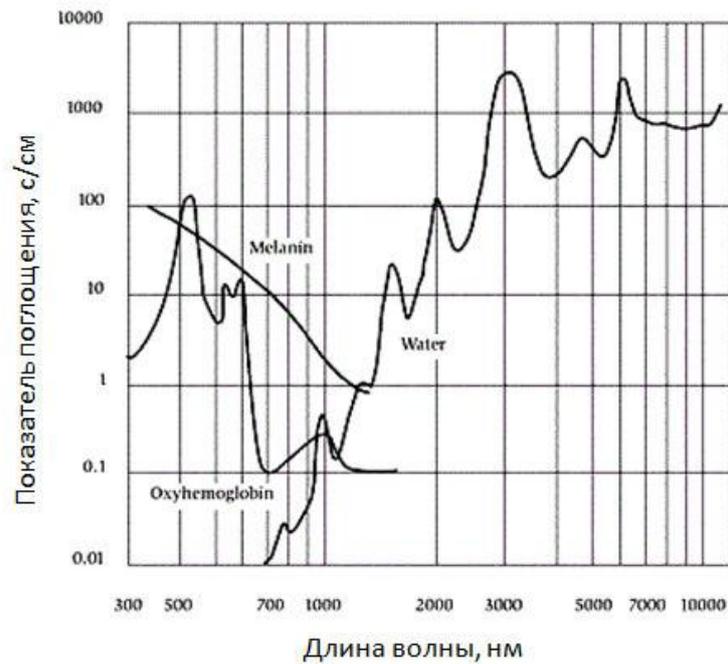


Рис. 1. Спектр поглощения основных хромофоров ткани в видимом и ИК-диапазонах

В результате проведения НИОКР разработана оптическая схема (рис. 2) ПГС на кристаллах КТА с перестраиваемой длиной волны в диапазонах 1,45–1,65 мкм и 3–4 мкм, спроектированы его оптические элементы [2, 3].

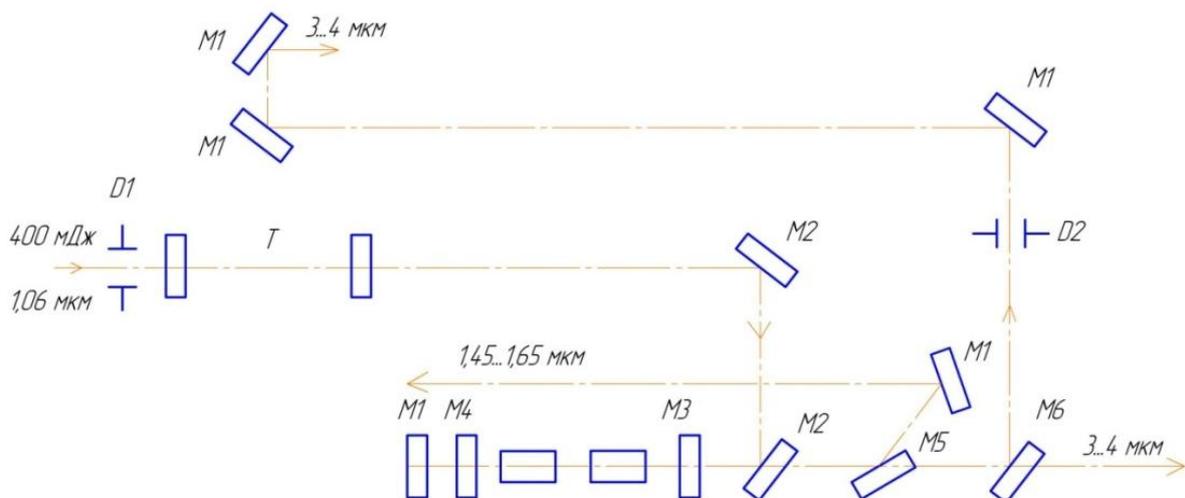


Рис. 2. Оптическая схема ПГС на кристаллах КТА с перестраиваемой длиной волны в диапазонах 1,45–1,65 мкм и 3–4 мкм: D1, D2 – диафрагмы; M1–M6 – зеркала

Оптические компоненты параметрического генератора перечислены в таблице, а параметры излучения накачки, являющегося входным оптическим сигналом для ПГС, соответствуют следующим значениям:

- длина волны излучения, мкм – 1,064;
- энергия в импульсе излучения, Дж – 1, не менее;
- частота следования импульсов излучения, Гц – 100;
- длительность импульса излучения, нс – ~ 15;
- диаметр пучка излучения накачки, мм – 9;
- расходимость излучения накачки, мрад – менее 1;
- распределение интенсивности в поперечном сечении пучка: гладкое, близкое к П-образному профилю.

Таблица

Оптические компоненты параметрического генератора

№	Оптические компоненты ПГС	Кол-во
КТА1	Преобразователь частоты Кристалл КТА для параметрического генератора Размер 9x10x18 мм ³	2
D2	Диафрагма стеклянная Ø25Ø9x3 мм	1
T2_10	Телескоп 1,3 ^x , Ø 9Øx7 мм	1
T2_15	Телескоп 1,5 ^x , Ø 9Øx6 мм	1
M8	Зеркало дихроичное, материал: CaF ₂ ; размер: Ø 25,4x3мм, α = 45°;	2
M9	Выходное зеркало плоское, материал: стекло CaF ₂ ; размер Ø 20x5 мм; α = 0°	1
M10	Зеркало дихроичное, материал: CaF ₂ ; размер: Ø 20x5 мм, α = 0°;	1
Si	Кремниевая пластинка Si, размер 15x50x3 мм	1
M11	Плоскопараллельная пластинка, материал: CaF ₂ размер: Ø 25,4x3мм	1
M6	Protected Gold Mirror 091-0030, Ø12,7x3 мм	5
D1	Диафрагма стеклянная Ø25xØ6x3 мм	1
W1	Защитное окно с брюстеровской ориентацией в горизонтальной плоскости Материал: кремниевая пластинка Si, размер 15x50x3 мм	1

Литература

1. Kingston R.H. Parametric amplification and oscillation at optical frequencies // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50. P. 472.
2. Kienle F. et al. Compact, high-pulse-energy, picosecond optical parametric oscillator // Optical Letters. 2010. Vol. 35. No 21. P. 3580.
3. Павлов В.В., Семьяшко В.В. Оптический параметрический генератор: учебное пособие. Казань, 2014. – 68 с.



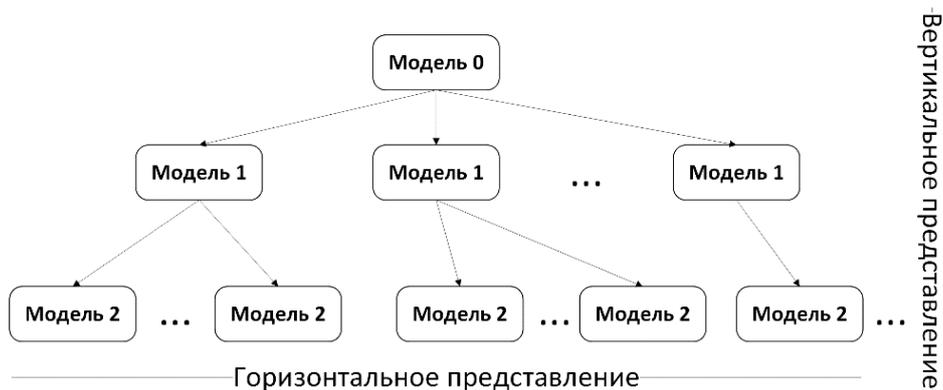
Мельник Михаил Алексеевич
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: mihail.melnik.ifmo@gmail.com

МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

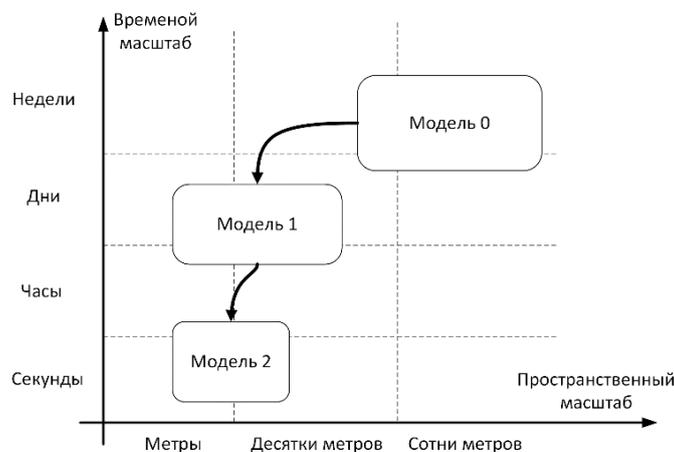
М.А. Мельник

Научный руководитель – доцент А.В. Калюжная

Цель работы – оптимизация вычислительного процесса приложений для многомасштабного моделирования сложных систем посредством планирования с учетом динамичности вычислительной среды, технологии виртуализации и шаблонов приложений. Методология выполнения работ основывается на анализе структуры многомасштабных моделей; использовании комплекса гибридных моделей оптимизации как классической задачи планирования композитных приложений, так и задачи разбиения вычислительных ресурсов на виртуальные машины.



а



б

Рис. 1. а – пример уровней многомасштабного приложения; б – временные и пространственные масштабы моделей

Приложения для многомасштабного моделирования [1–3] представляют собой набор вычислительных моделей, имеющих различные пространственные либо временные масштабы. Взаимодействие между моделями формирует уровни представления приложения, которые можно разделить на два класса: вертикальные и горизонтальные.

Вертикальные уровни создают иерархический каскад взаимосвязей моделей, таким образом определяя логическую последовательность между моделями, а также степень детализации отдельных задач. Горизонтальные уровни представляют собой сегментацию определенного компонента многомасштабной модели и способ взаимосвязи моделей данного масштаба между собой для покрытия всей области решаемой задачи. Пример структуры многомасштабного приложения приведен на рис. 1а. Указанные в примере модели имеют различный временной или пространственный масштаб, что иллюстрирует рис. 1б.

К особенностям вертикального представления можно отнести:

- каскадную структуру привязки «один ко многим»;
- глобальное упорядочивание взаимодействия моделей;
- итеративную вложенность;
- динамическую конкретизацию.

Горизонтальное представление охарактеризовано следующими свойствами:

- локальное упорядочивание взаимодействия моделей одного вертикального уровня;
- динамическая между модельная нагрузка;
- децентрализованность.

В терминах вертикального и горизонтального представлений выделены следующие шаблоны, схемы которых показаны на рис. 2:

– экстремальное масштабирование (*Extreme Scaling, ES*): преобладание вычислительных процессов одного масштаба, что позволяет при планировании отдавать им приоритет при распределении вычислительных ресурсов;

– тиражирование вычислений (*Replica Computing, RC*): наличие большого количества равнозначных расчетных задач, каждая из которых требует большого объема вычислительных ресурсов;

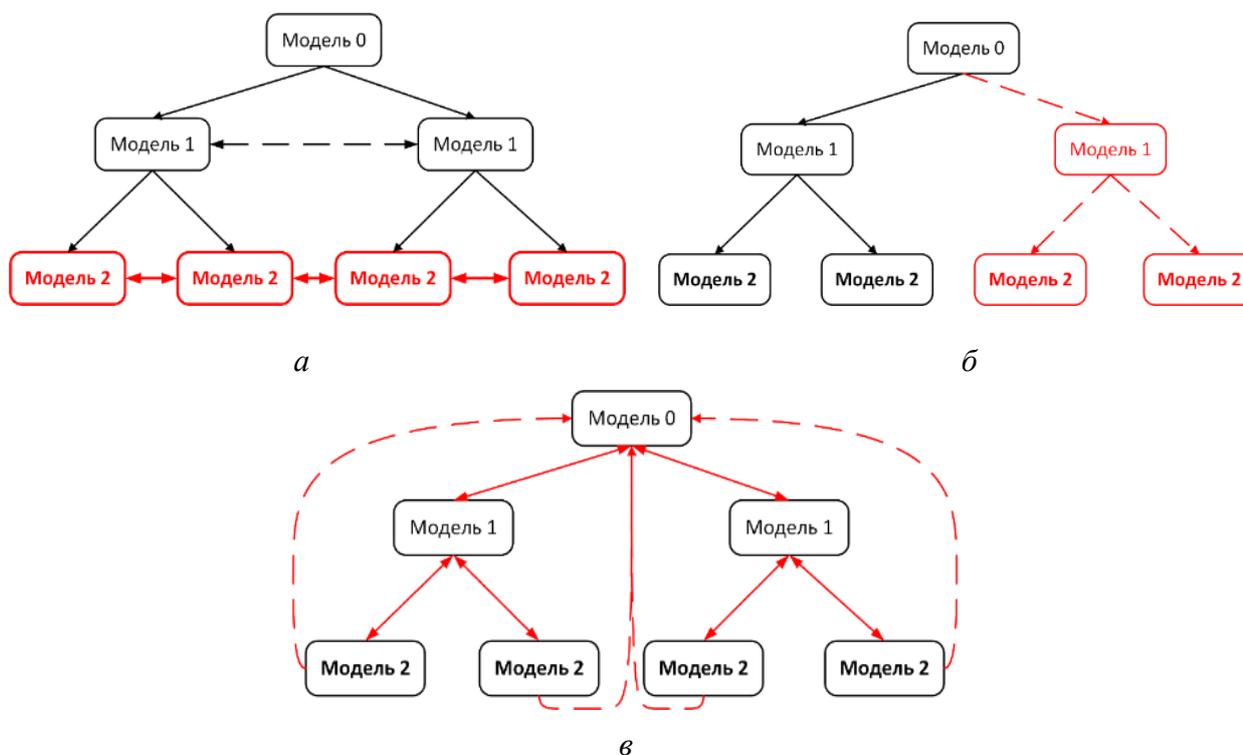


Рис. 2. Схемы шаблонов многомасштабных приложений: а – ES-шаблон; б – RC-шаблон; в – HMC-шаблон

– неоднородные многомасштабные вычисления (*Heterogeneous Multiscale Computing, НМС*): наличие моделей одного и того же явления в различных масштабах, связанных между собой параметрически (снизу вверх).

В первую очередь была разработана модель инфраструктуры для моделирования вычислительного процесса. Это дискретно-событийная модель выполнения потоков задач в распределенной среде [4–6]. Таким образом, модель представлена в виде двух основных сущностей: текущего состояния и очереди событий. Состояние включает описание вычислительной среды (вычислительные узлы и каналы передачи данных между ними), вычислительную нагрузку, модели производительности для вычисления времени выполнения определенных процессов и событий, текущее время, а также план исполнения задач, который содержит информацию как об уже вычисленных задачах, так и о тех, которые находятся на стадии вычисления или должны быть выполнены с указанием вычислительного узла, на котором задача была или будет осуществляться. Диаграмма последовательности обработки событий представлена на рис. 3.

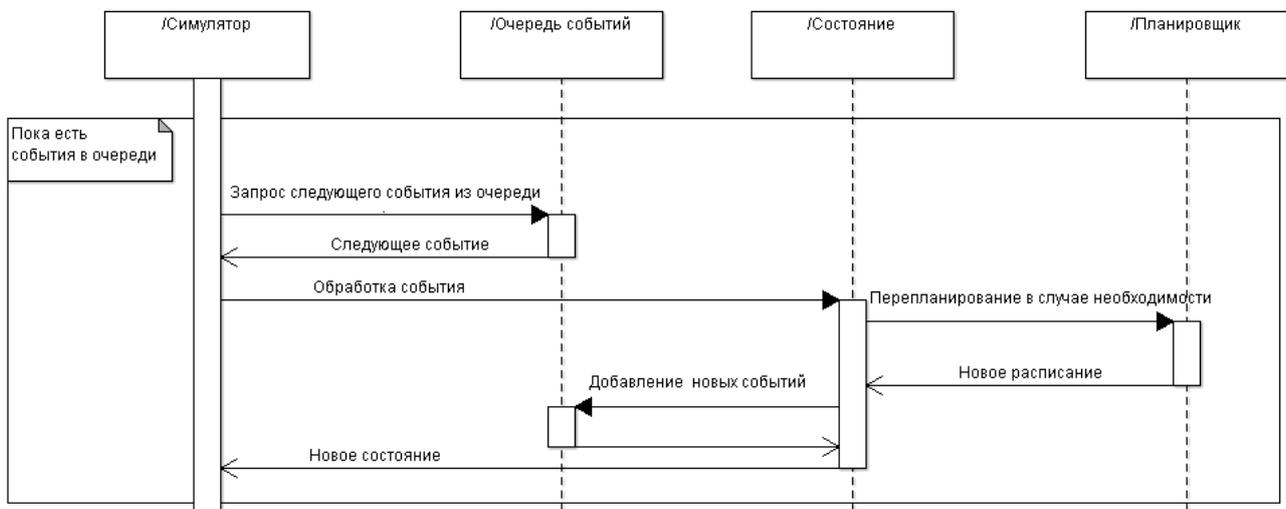


Рис. 3. Диаграмма последовательности обработки событий

Моделирование необходимо в случае работы с эволюционными алгоритмами [7] (такими как генетический алгоритм) для оценки качества решений, получаемых в ходе поиска оптимального решения. После того, как все задачи будут выполнены, моделирование прекращается, а результатом является состояние, содержащее как полученное расписание выполнения задач на узлах, так и конфигурацию вычислительной среды, которая могла быть изменена в ходе моделирования.

Разработанный алгоритм динамического планирования основан на гибридизации эвристического и метаэвристического алгоритмов. Схема динамического планирования заключается в следующем:

- определяется ситуация, требующая перепланирования;
- запускается быстрый *HEFT*-эвристический алгоритм [8];
- применяется *HEFT*-алгоритм;
- в фоновом режиме запускается генетический алгоритм;
- через определенный промежуток времени применяется решение, полученное с помощью генетического алгоритма.

Поскольку генетический алгоритм всегда содержит в своей начальной популяции один индивид, полученный с помощью *HEFT*-алгоритма, то его результат всегда будет не хуже *HEFT*. Принимая во внимание тот факт, что, помимо назначения задач на вычислительные узлы, мы также можем разбивать ресурсы на виртуальные машины, для решения поставленных задач был разработан коэволюционный генетический алгоритм с двумя разнородными популяциями:

- популяция назначения, где особь популяции представляет собой упорядоченный список с задачами и назначенными для них вычислительными узлами;
- популяция конфигурации ресурсов, где особь популяции представляет собой разбиение физических ресурсов на виртуальные машины, которым могут назначаться задачи в соответствии с первой популяцией.

В представлении особи из первой популяции в генетическом алгоритме, очередь задач и их назначение на ресурсы объединяются в один упорядоченный список.

Для реализации генетического алгоритма требуется описать операции скрещивания двух особей и мутации для каждой популяции, а также операцию склеивания двух популяций, после которой будет рассчитываться функция приспособленности для особей. Также нужно выбрать стратегию отбора, которая будет определять, какие особи выживут и останутся в следующей итерации алгоритма.

Особь, представляющая назначение на ресурсы, имеет вид упорядоченного списка из задач, вычислительных ресурсов и виртуальных машин на этих ресурсах: $mapParticle = [task_i, resource_j, node_k]$.

Особь, представляющая конфигурацию виртуальных машин на ресурсах, представляется в виде наборов отведенных *CPU* и *Memory* на виртуальные машины для каждого физического вычислительного ресурса: $confParticle = \{ \{cpu, memory\}_j \}$.

Для проведения экспериментальных исследований в разработанной модели исполнения приложений для многомасштабного моделирования были запущены различные сценарии для каждого из шаблонов (*ES*, *RC*, *HMC*) для композитного приложения, имеющего структуру, представленную на рис. 1а, но с варьированием отдельных как горизонтальных, так и вертикальных уровней. Во всех экспериментах предложенный коэволюционный генетический алгоритм *CGA* был сравнен с популярным эвристическим *HEFT*-алгоритмом по времени выполнения всего процесса многомасштабного моделирования. В ходе экспериментов была промоделирована гетерогенная вычислительная среда, состоящая из двух многоядерных вычислительных узлов, каждый из которых разбивается на некоторое количество виртуальных машин.

В случае шаблона *ES* варьировалась доля вычислительной нагрузки экстремального уровня по отношению ко всему объему вычислительной нагрузки, рис. 4а.

Для *RC*-шаблона варьировалось число повторяющихся блоков многомасштабного приложения, рис. 4б.

В случае *HMC*-шаблона варьировалась степень детализации модели, то есть высота дерева моделей нижнего уровня, результаты чего представлены на рис. 4в.

По результатам экспериментов, во всех случаях предложенный алгоритм позволил получить увеличение производительности до 36 %. В случае *ES*-шаблона можно заметить спад производительности после значения 0,85 %, что может быть объяснено тем, что дальнейшее увеличение доли нагрузки экстремального уровня приводит к упрощению структуры композитного приложения до одноуровневого, что уменьшает пространство поиска генетического алгоритма.

Заключение

В ходе выполнения данной работы были проанализированы шаблоны приложений для многомасштабного моделирования комплексных систем. Выделены три шаблона: экстремальное масштабирование, тиражирование вычислений и неоднородные многомасштабные вычисления. Для разработки генетического алгоритма планирования была создана модель выполнения композитных приложений на событийно-дискретной основе. Затем был разработан коэволюционный генетический алгоритм, позволяющий одновременно решать задачи планирования и оптимального разбиения вычислительных ресурсов на виртуальные машины. Различного типа экспериментальные исследования проводились для каждого из шаблонов. Во всех случаях предложенный алгоритм планирования *CGA* превзошел популярный *HEFT*-алгоритм планирования. Он работает в динамическом режиме,

используя преимущество как эвристических, так и метаэвристических алгоритмов, что показывает его эффективность для планирования приложений для многомасштабного моделирования.

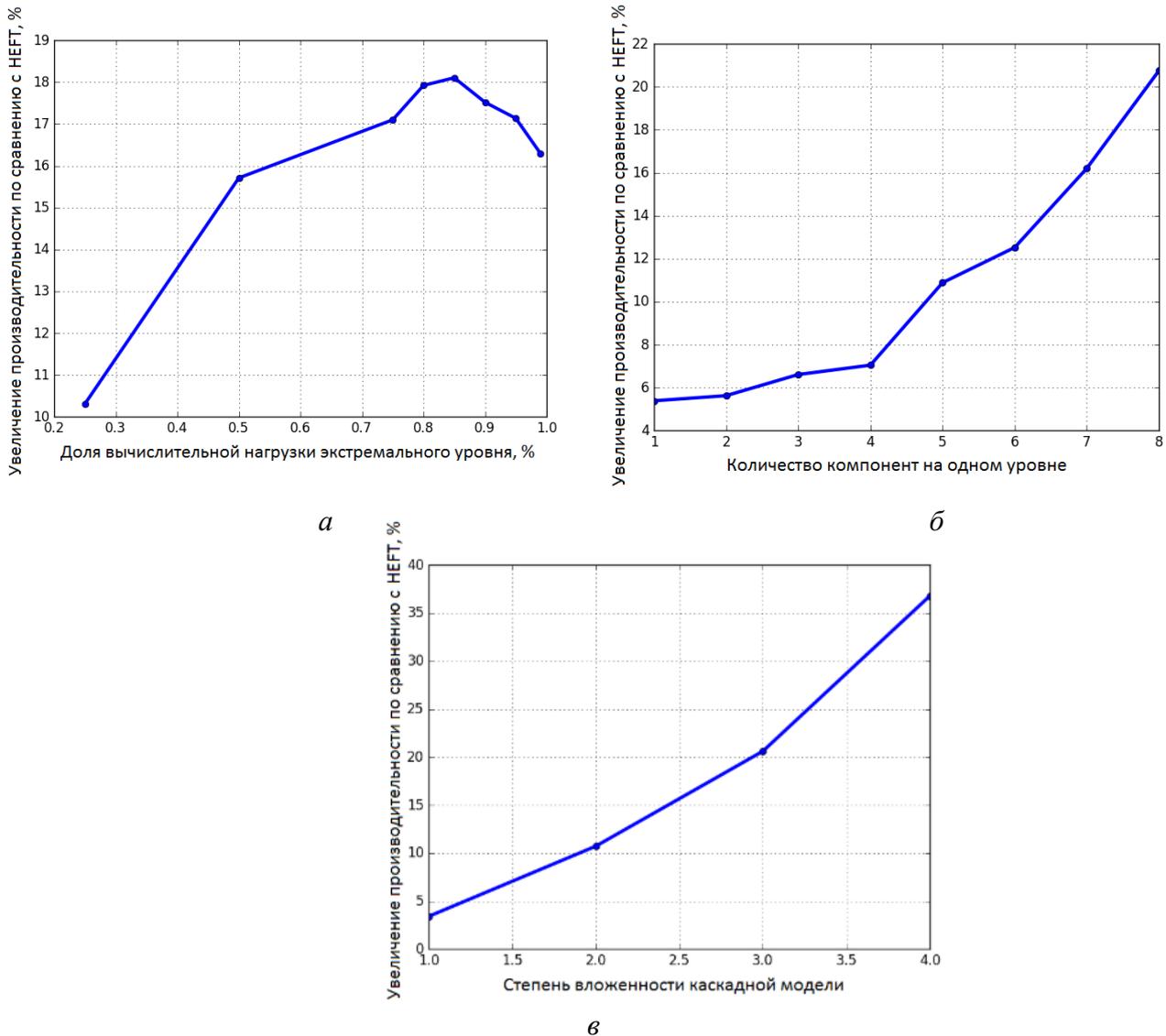


Рис. 4. Производительность CGA по отношению к HEFT для различных шаблонов и их параметров

Публикации

1. Visheratin A.A., Melnik M.A., Butakov N.A., Nasonov D.A. Hard-deadline constrained workflows scheduling using metaheuristic algorithms // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 66. P. 506–514.
2. Melnik M.A., Trofimenko T.B. Polyrhythmic harmony search for workflow scheduling // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 66. P. 468–476.
3. Nasonov D.A., Melnik M.A., Shindyapina N.M., Butakov N.A. Metaheuristic coevolution workflow scheduling in cloud environment // *7th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI)*. 2015. Vol. 1. P. 252–260.
4. Visheratin A.A., Melnik M.A., Nasonov D.A. Workflow scheduling algorithms for hard-deadline constrained cloud environments // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 80. P. 2098–2106.
5. Nasonov D.A., Melnik M.A., Radice A. Coevolutionary workflow scheduling in a dynamic cloud environment // *International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16*. 2016. P. 189–200.

Литература

1. Arakawa A., Jung J.-H. Multiscale modeling of the moist-convective atmosphere // Atmospheric Research. 2011. Vol. 102. No 3. P. 263–285.
2. Majda A.J. Multiscale models with moisture and systematic strategies for superparameterization // Journal of the Atmospheric Sciences. 2007. Vol. 64. No 7. P. 2726–2734.
3. Sloot P.M.A., Hoekstra A.G. Multi-scale modelling in computational biomedicine // Briefings in Bioinformatics. 2009. Vol. 11. No 1. P. 142–152.
4. Dongarra J.J. et al. Top500 supercomputer sites // Supercomputer. 1997. Vol. 67. P. 89–111.
5. Foster I., Kesselman C. The Grid 2: blueprint for a new computing infrastructure. 2003. – 748 p.
6. Rimal B.P. et al. A taxonomy and survey of cloud computing systems // 5th International Joint Conference on INC, IMS and IDC. 2009. P. 44–51.
7. Singh L., Singh S. A survey of workflow scheduling algorithms and research issues // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 74. No 15. P. 21–28.
8. Arabnejad H. List based task scheduling algorithms on heterogeneous systems: an overview // Doctoral Symposium in Informatics Engineering. – 2013. – С. 93



Мунько Анна Сергеевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: qveenanna-93@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК БРЭГГА

А.С. Мунько

Научный руководитель – доцент С.В. Варжель

Введение

В настоящее время волоконные брэгговские решетки (ВБР) рассматриваются как одни из наиболее перспективных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин [1]. К числу их основных преимуществ можно отнести: защищенность от воздействия электромагнитных полей, высокую чувствительность, радиационную стойкость, широкий динамический диапазон измерений, малые габариты, вес и ряд других.

Недостаток тензометрических ВОД связан с чувствительностью решеток Брэгга к температурным изменениям окружающей среды, что сказывается на искажении результирующего сигнала. Поэтому целью проекта являлась разработка такого чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга, который позволял бы исключать влияние температурных помех на процесс измерения деформаций.

Основная часть

В настоящем исследовании чувствительный элемент ВОД состоит из двух ВБР, записанных в оптическом волокне для одновременного измерения механического

напряжения и температуры. Запись волоконных решеток показателя преломления производилась на *KrF*-эксимерной лазерной системе типа «задающий генератор – усилитель» с использованием интерферометра Тальбота [2], представленного на рис. 1.

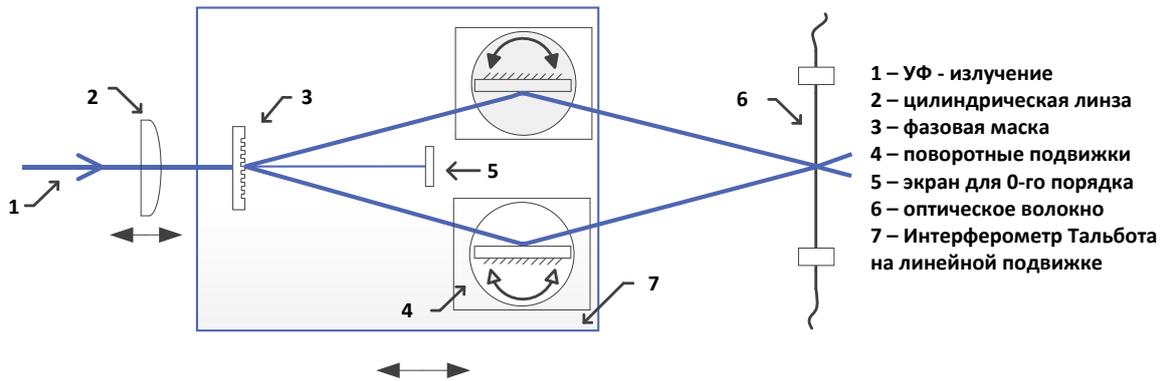


Рис. 1. Запись ВБР в схеме с интерферометром Тальбота

Для записи решеток Брэгга использовалось изотропное оптическое волокно с повышенной фоторефрактивностью [3], для чего концентрация диоксида германия (GeO_2) в его сердцевине была увеличена до 12 мол.%. Метод легирования заготовок для вытяжки оптического волокна диоксидом германия является эффективным и дающим неизменяемый во времени коэффициент приращения фоточувствительности [4].

В ходе исследования был проведен обзор существующих вариантов тензометрических датчиков, позволяющих измерять механические напряжения без помех, возникающих за счет температурных колебаний окружающей среды [5–7]. На основе изученных материалов определены параметры пробного чувствительного элемента, который состоит из двух ВБР, записанных на двух разных длинах волн брэгговского резонанса λ_1 и λ_2 со специально подобранными различными покрытиями. Решетки Брэгга в составе чувствительного элемента записаны на расстоянии 50 мм друг от друга, длина каждой из них составляет 14 мм. Спектральное расстояние между центральными длинами волн брэгговских резонансов двух ВБР ($\Delta\lambda$) равно 9,72 нм. Каждая решетка Брэгга имеет специально выбранное покрытие. Вследствие использования различных покрытий, ВБР в составе чувствительного элемента имеют различную чувствительность к деформации и почти одинаковую чувствительность к температуре.

Для проведения эксперимента был собран лабораторный стенд для осуществления температурного (рис. 2а) и механического воздействий (рис. 2б) на ВБР и контроля их спектральных характеристик. В качестве приемника использовался оптический спектроанализатор (ОСА) *Yokogawa AQ6370C* с диапазоном измерений 600–1700 нм и разрешающей способностью в 0,02 нм. Оптическое излучение с широкополосного источника излучения (ИИ) вводилось через Y-ответвитель в образец с записанными в него двумя ВБР, на который осуществлялось воздействие.

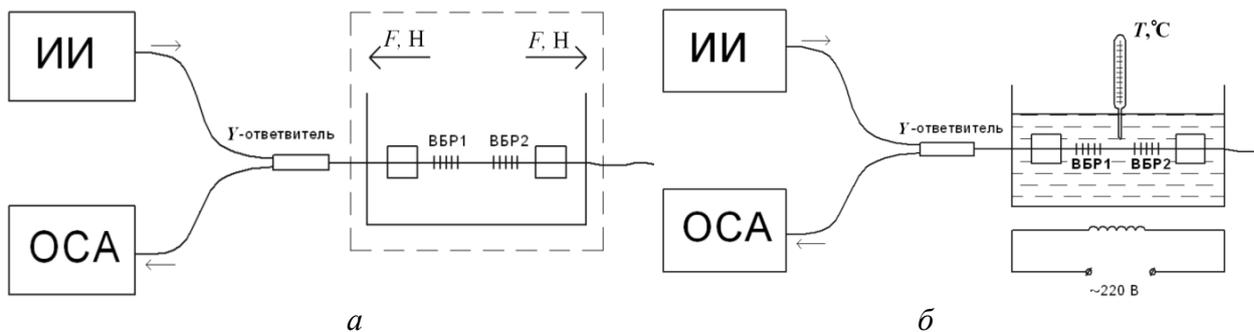


Рис. 2. Установки: а – для механического; б – температурного воздействий на ВБР и контроля их спектральных характеристик

На основе выполненных измерений построены спектры отражения чувствительного элемента при различных величинах температурных и механических воздействий (рис. 3). На верхнем графике представлены спектры отражения ВБР при комнатной температуре и температуре, равной $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из рисунка видно, что при изменении температуры спектральное расстояние между центральными длинами волн двух ВБР ($\Delta\lambda$) не изменилось, а при приложении силы в 1 Н и в 8 Н – увеличилось.

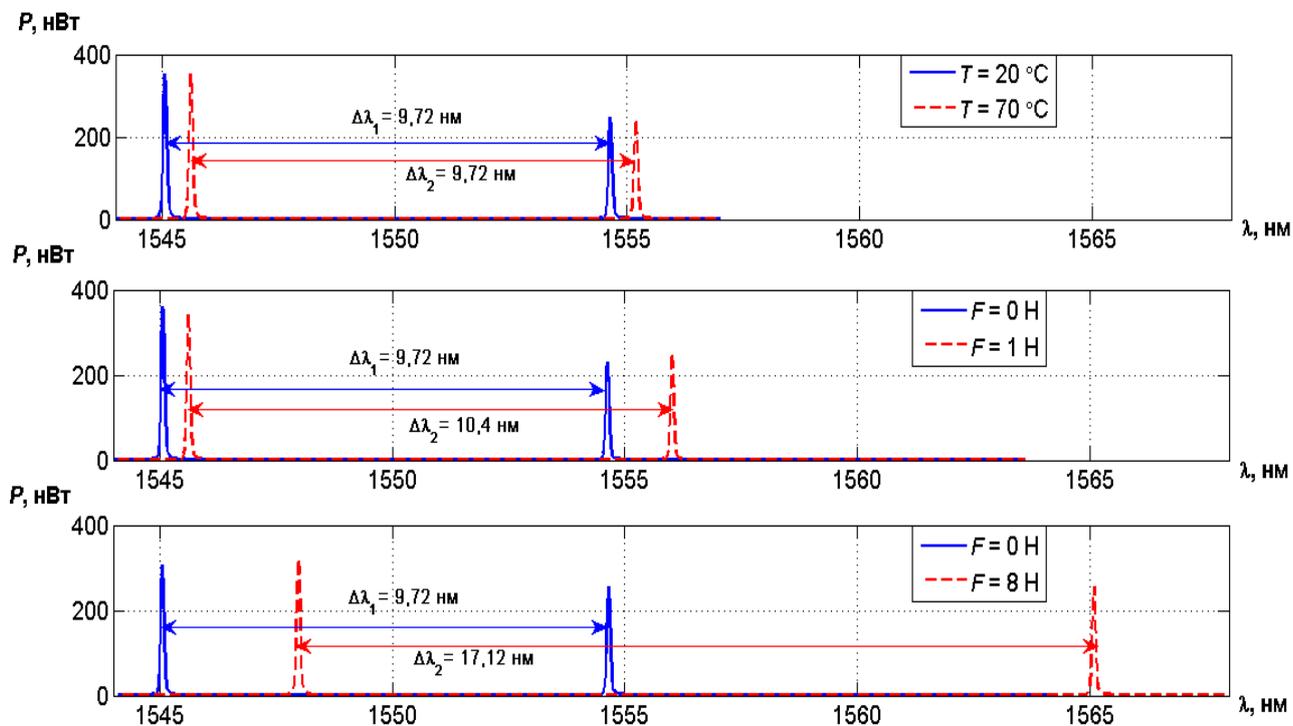


Рис. 3. Спектры отражения чувствительного элемента при различных температурных и механических воздействиях

На рис. 4 представлена зависимость величины $\Delta\lambda$ при изменении температуры от 5 до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. По графику видно, что температурные колебания окружающей среды практически не влияют на брэгговские решетки в составе чувствительного элемента, а следовательно, не влияют и на измерение приложенной механической силы. Из экспериментальных результатов была рассчитана теплочувствительность, равная $11,45 \pm 0,14\text{ пм}/^{\circ}\text{C}$ для ВБР₁ и $10,98 \pm 0,27\text{ пм}/^{\circ}\text{C}$ для ВБР₂.

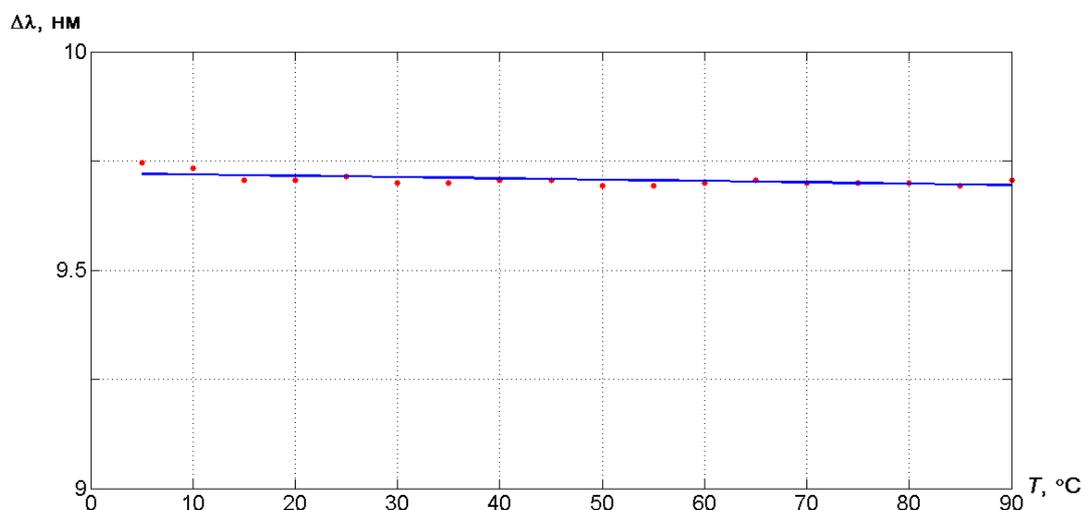


Рис. 4. Зависимость величины $\Delta\lambda$ от температуры в диапазоне измерений от 5 до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рис. 5 иллюстрирует характер изменения величины $\Delta\lambda$ при воздействии на чувствительный элемент силы в диапазоне от 0 до 8 Н. При приложении больших нагрузок был выявлен гистерезис, обусловленный физическими свойствами покрытий ВБР.

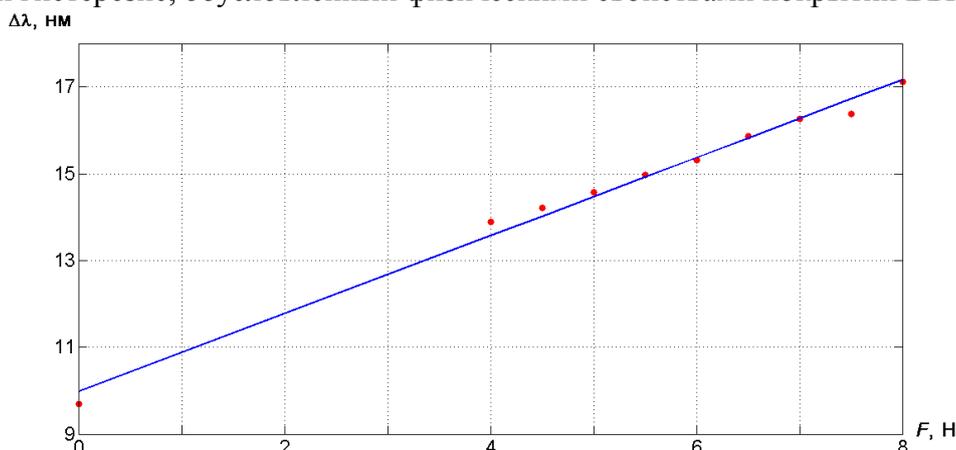


Рис. 5. Зависимость величины $\Delta\lambda$ от механических воздействий в диапазоне сил от 0 до 8 Н

Далее был найден оптимальный диапазон сил от 0 до 1 Н, при котором гистерезиса практически не было, и датчик работал стабильно, а также рассчитана его деформационная чувствительность, равная 600 ± 25 пм/Н для ВБР₁ и 1380 ± 2 пм/Н для ВБР₂.

Следует отметить, что упомянутые в работе параметры чувствительного элемента были предложены, исходя из удобства проведения лабораторных исследований, а также для большей наглядности полученных результатов. В зависимости от поставленных задач возможно их изменение. Так, например, для уменьшения размера чувствительного элемента датчика и снижения влияния градиента температур на качество измерения натяжения можно уменьшить расстояние между ВБР по меньшей мере до 10 мм, а также длину самих решеток Брэгга до 2-3 мм. Также есть возможность изменять спектральное расстояние между центральными длинами волн брэгговских резонансов двух ВБР.

Преимущество разработанного чувствительного элемента заключается в простоте и эффективности измерения. Отсутствие сварного соединения, компактный размер и использование только одного источника излучения для опроса пары ВБР повышает надежность и упрощает реализацию и эксплуатацию устройства. Кроме того, особенность устройства состоит в том, что подбором покрытий можно менять диапазон измерений и чувствительность датчика, сохраняя его стабильную работу.

Заключение

В рамках данного исследования разработан чувствительный элемент волоконно-оптического тензометрического датчика с использованием двух близкорасположенных ВБР с покрытиями, подобранными специальным образом, с помощью которого можно разделить влияние деформационного и температурного воздействий. Проверена работа чувствительного элемента при различных температурных условиях и силах деформации. В ходе исследований был определен диапазон сил от 0 до 1 Н, в котором датчик показал стабильную работу. Разработанный тип датчиков может применяться для изготовления весов и весоизмерительных систем, а также для измерения небольшой массы груза в фасовочных и дозирующих системах. Подобные датчики также могут быть использованы для контроля состояния несущих элементов конструкций, степени загрузки силосов, растяжения тросов и других целей.

Публикации

1. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Забиякин А.Н. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 241–245.

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

2. Мунько А.С., Варжель С.В., Куликов А.В., Коннов К.А., Грибаев А.И., Архипов С.В. Запись решеток Брэгга в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой подвергнутое водородной обработке // Сборник трудов III конференции «Будущее оптики» для молодых специалистов, кандидатов наук, аспирантов и студентов оптической отрасли и смежных дисциплин. СПб., 2015. С. 145–147.
3. Мунько А.С. Исследование методов уменьшения и компенсации влияния внешнего механического воздействия на сдвиг длины волны брэгговского резонанса волоконной решетки показателя преломления // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ специалистов Университета ИТМО. СПб., 2015. С. 7–10.
4. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Munko A.S., Arkhipov S.V., Konnov K.A. Interferometric writing of fiber Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // European Science and Technology: materials of the XII international research and practice conference. Munich, 2015. P. 100–104.
5. Мунько А.С., Варжель С.В., Петров А.Б. Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2650/2650.pdf> (accessed: 13.10.16).
6. Munko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V., Gribaev A.I., Konnov K.A., Belikin M.N. The study of the thermal annealing of the Bragg gratings induced in the hydrogenated birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012015.
7. Варжель С.В., Мунько А.С., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В. Запись решеток Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутом водородной обработке // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 74–78.
8. Архипов С.В., Стригалева В.Е., Солдатова Н.С., Варжель С.В., Мунько А.С., Смирнова Ю.Д. Зависимость эффективности записи брэгговских решеток в двулучепреломляющих оптических волокнах от ориентации напрягающей эллиптической оболочки // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 11. С. 79–82.
9. Arkhipov S.V., Strigalev V.E., Varzhel' S.V., Smirnova I.D., Soldatova N.S., Palanjyan D.A., Munko A.S., Petrov A.A. Birefringent optical fibers axial positioning technique for fiber Bragg gratings writing // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. No 12. P. 541.

Литература

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. Л., 1991. – 256 с.
2. Stam A.M. et al. Interferometric writing of fiber Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // European Science and Technology: materials of the XII international research and practice conference. Munich, 2015. P. 100–104.
3. Васильев С.А. et al. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
4. Chojetzki C. et al. High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings – arrays and single gratings of type II // Optical Engineering. 2005. Vol. 44. No 6. P. 060503.
5. Guan B.O. Discrimination between strain and temperature with a single fiber Bragg grating // Microwave and Optical Technology Letters. 2002. Vol. 33. No 3. P. 200–202.
6. Kang H.K. Simultaneous monitoring of strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fibre-optic sensors // Smart Materials and Structures. 2003. Vol. 12. No 1. P. 29–35.
7. Yoon H.J. In situ strain and temperature monitoring of adaptive composite materials // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2006. Vol. 17. No 12. P. 1059–1067.



Мухина Ксения Дмитриевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: mukhinaks@gmail.com

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОМПЛЕКСНЫХ КОНТАКТНЫХ СЕТЯХ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНЫ И ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

К.Д. Мухина

Научный руководитель – главный научный сотрудник А.В. Бухановский

Известно, что научная визуализация является не только одним из наиболее мощных и эффективных способов представления, но и успешным методом анализа и обработки разнородных данных. Визуальный анализ позволяет специалисту взаимодействовать с имеющимися данными, несмотря на их объем, и предполагать некоторые гипотезы. Подтверждение этих гипотез может быть осуществлено как с помощью визуального исследования, так и с помощью методов математической статистики и машинного обучения. Визуальный анализ имеет ряд положительных сторон, выделяющих его среди других подходов [1]:

- с его помощью легко обрабатываются неоднородные и сильно зашумленные данные;
- визуальное исследование является интуитивно понятной техникой и не требует серьезных знаний в математических и статистических алгоритмах.

Таким образом, визуальное исследование данных позволяет проводить быструю обработку и дает лучший результат в тех случаях, когда автоматические алгоритмы не способны решить поставленную задачу.

Отдельный класс задач как анализа данных, так и непосредственно визуального анализа составляет анализ графов. С помощью графа можно обозначить связи между набором дискретных объектов, поэтому такое представление часто используется для различных сетевых структур, которые являют собой множество взаимосвязанных объектов. Особое место среди всех сетевых структур занимают комплексные сети. Они отличаются от обычных большими размерами, динамикой, наличием нескольких режимов и наличием различного уровня неопределенностей. В динамических комплексных сетях узлы и связи могут менять свое состояние, появляться и исчезать в зависимости от различных условий.

Цель проекта – разработка и описание методов визуального анализа динамических процессов в комплексных контактных сетях с учетом специфики области медицины и здравоохранения. Практическое значение исследования заключено в возможности использования предложенных методов и разработанного программного средства для визуального анализа динамических процессов в комплексных контактных сетях как в сфере медицины и здравоохранения, так и в сетях, относящихся к различным областям науки.

Анализ динамических сетей требует методов и метрик, учитывающих временное измерение сети. Простейший подход представляет собой объединение всех подграфов сети в единый статический граф, однако при этом вся информация о времени не сохраняется и не учитывается. Другой распространенный метод анализа динамических сетей предполагает разделение процесса на два этапа: анализ по времени и по структуре.

При структурном анализе фиксируется некоторый конкретный момент времени, и сеть исследуется аналогично тому, как если бы она была статической: применяются различные подходы из теории графов такие, как выделение определенных узлов или подграфов, расчет

характеристик сети или выявление структурных паттернов. При анализе по временным срезам исследуется некоторый набор узлов и изменения, происходящие с ним в рамках некоторого временного промежутка. Совмещение временного и структурного подхода к анализу сетей позволяет полноценно исследовать процессы, имеющие место в сети.

Выделение наиболее важных узлов и связей, равно как кластеров и сообществ в сети позволяет не только многое сказать о структуре сети на этапе ее предварительного анализа, но и играет ключевую роль для различных процессов на данной сети. Для визуального выделения интересных элементов в сети было использовано два основных способа:

- управление визуальными характеристиками сети: изменение размера, цвета, формы узлов при изменении атрибутов узла или достижения параметром какого-либо значения, например при увеличении степени узла;

- управление физикой узлов, их размещением в пространстве, то есть влияние на взаимодействие узлов между собой. Часто структура сети или ее размер оказываются таковыми, что изменение цвета или размера не позволяет провести четкую идентификацию интересующего узла. В таких случаях целесообразно менять позицию узлов в зависимости от исследуемых параметров, таким образом даже при беглом взгляде на сеть соответствующие узлы будут визуально отделимы от остальных.

Не менее важным аспектом визуализации сетевых структур является непосредственная визуализация процессов, происходящих в них. Визуальный анализ динамических сетевых структур позволяет не только подтвердить или опровергнуть статистические характеристики, полученные с помощью математических вычислений, но и сфокусироваться на конкретных узлах или связях в сети, выявить их свойства и особенности, которые могут оказать существенное влияние на дальнейшие исследования.

Одним из примеров процесса в сети является распространение информации между ее узлами. Для визуализации подобного процесса важно не только корректно показать динамику, но и правильно расставить акценты: например, при визуализации передачи информации успешный исход гораздо важнее попытки контакта.

Для визуального анализа процессов в сети ситуация аналогична:

- управление визуальными характеристиками: например, изменяя цвет узлов или ребер, можно отобразить сам процесс как передачи информации или сигнала, так и появления или удаления элемента, изменяя прозрачность объекта.

- управление физикой: событие, произошедшее в сети, ведет за собой изменение взаимодействия между объектами. Например, при удалении ребра узлы перестают притягиваться друг к другу.

Таким образом, ясно, что приложение для визуального анализа должно позволять пользователю осуществлять контроль как над внешним представлением узлов (цветом, размером, интенсивностью), так и над их взаимодействием между собой, а также положением относительно наблюдателя.

Обзор программного комплекса

В основу приложения легла разработка института наукоемких компьютерных технологий Университета ИТМО *Fusion Framework* [2]. Данная платформа позволяет разрабатывать приложения для научной визуализации, используя в качестве основного языка программирования C#.

Используя графический интерфейс приложения, пользователь может управлять визуальными характеристиками сети, например, такими как размеры узлов или прозрачность и толщина ребер, прямо во время процесса визуализации.

Размер узлов может задаваться и фиксированным значением, и с помощью специальной функции, зависящей от какого-либо параметра. На данный момент в приложении расчет размера осуществляется с помощью одного из двух вариантов: либо с помощью линейной интерполяции между максимальным и минимальным значениями, либо, в случае если разница между ними слишком велика, с помощью функции арктангенса.

Для упрощения процесса визуального анализа различным типам узлов в графе можно сопоставить различные цвета, помимо этого для визуализации дополнительного процесса, например, распространения информации в сети, применяется переключение между режимами. Цветовая палитра также может быть задана пользователем перед запуском программы или выбрана из уже имеющихся. Если узел содержит какую-либо текстовую информацию, например имя или название, то ее также можно вывести на экран прямо на текстуре узла либо рядом с ним. После обработки всех команд пользователя все данные о сети передаются на графический процессор (GPU). Для ускорения визуализации основные расчеты по раскладке графа происходят там. В качестве основного алгоритма была выбрана силовая модель с адаптивным шагом вычислений [3]. Положение узлов вычисляется, исходя из их взаимодействия, и определяется с помощью двух сил: отталкивания (в качестве нее выступает сила, аналогичная кулоновскому взаимодействию) и притяжения, которая выражается через закон Гука. В некоторых случаях формулы для расчета сил взаимодействия могут быть модифицированы пользователем с помощью поправочных коэффициентов. Сила, действующая на одну вершину, вычисляется по следующей формуле:

$$F_i = \sum_{\substack{j=1..n \\ i \neq j}} \frac{q_j}{|v_i - v_j|^2} \cdot \frac{v_i - v_j}{|v_i - v_j|} + \sum_{\substack{e_{ij} \in E \\ j=1..n}} w_{ij} (|v_i - v_j| - l_{ij}) \cdot \frac{v_i - v_j}{|v_i - v_j|},$$

$$|v_i - v_j| < d$$

где $|v_i - v_j|$ – расстояние между двумя вершинами, q_j – заряд вершины, e_{ij} – ребро между вершинами v_i и v_j , w_{ij} – вес соответствующего ребра и l_{ij} – его длина. Помимо этого, для того чтобы обеспечить позиционирование графа в центре визуализируемой области, действует дополнительная сила притяжения к центру. В случае если визуализируемая сеть содержит элементы разных типов/классов или предполагается, что физическое положение узлов несет какую-то дополнительную информацию, аналогичная сила используется для того, чтобы притянуть узлы к конкретной точке, оси или области.

Сеть косвенных контактов врачей и пациентов

Для отображения статических данных, не изменяющихся с течением времени, приоритетной задачей является корректное отображение структуры самой сети: всех узлов сети и взаимосвязей между ними, что позволит извлечь максимум информации. В рамках данной работы в качестве эксперимента по визуальному выделению групп данных в условиях недостатка информации было реализовано визуальное представление динамического графа путей пациентов на основе данных карт лечения медицинского центра им. Алмазова. Исходные данные представляли собой выборку из 216 пациентов, посещавших клинику в 2014 году. Каждый узел графа представляет собой врача или сотрудника центра, к которому было зафиксировано обращение пациента. Ребром между двумя узлами является эпизод перехода пациента от одного врача к другому, соответственно один и тот же пациент может совершать переход между двумя врачами несколько раз. В результате визуализации (рис. 1) было выявлено два явных сильно связанных кластера.

Подробное исследование сети и последующие консультации с сотрудниками центра показали, что крупнейшие кластеры оказались специалистами, принадлежащими к двум дублирующим отделениям центра, занимающимся лечением пациентов с острым коронарным синдромом. Наличие обособленных узлов может быть объяснено малой выборкой исходных данных. Однако в медицинских картах пациентов отсутствовала какая-либо информация о принадлежности сотрудников к отделениям. Кластер меньших размеров содержит преимущественно заведующих отделениями, старший обслуживающий персонал (старшие медсестры и ординаторы), врачей-кардиологов и сотрудников физиотерапевтического отделения, в то время как больший кластер сотрудников более равномерен по своему содержанию. Наиболее сильно связывающими эти кластеры узлами

является младший медицинский персонал, такой как регистраторы, медсестры или ординаторы.

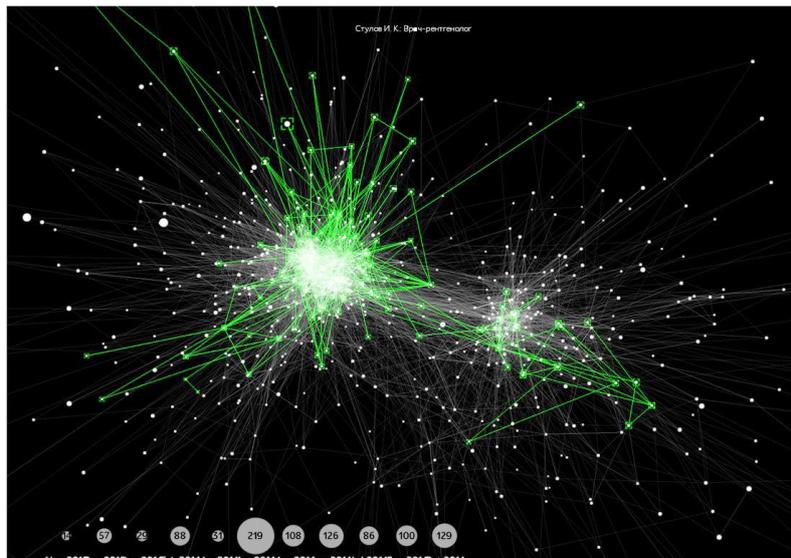


Рис. 1. Пример визуализации динамического графа: сеть косвенных контактов врачей и пациентов

Для каждого пациента внутри его маршрута были выделены динамические циклы, определены наиболее популярные узлы (сотрудники центра) и наиболее часто встречающиеся пути лечения (очередность врачей и процедур). Также был выявлен пульсирующий характер активности перемещений пациентов: дневной ритм и недельный. Активность в выходные дни в разы меньше, чем в будние, несмотря на то, что большинство пациентов поступает в центр по скорой помощи либо через перевод из другого учреждения. Таким образом, с помощью визуального анализа данных о картах лечения пациентов была выявлена информация о структуре медучреждения и особенностях его работы.

Визуальный анализ представляется эффективным методом для исследования динамических процессов в комплексных сетях в условиях современного мира с непрекращающимся ростом доступной информации для анализа, но с сохранением неопределенности о природе и структуре данных при этом.

В данной работе были усовершенствованы методы визуального анализа процессов в сетях с помощью введения ряда динамических паттернов, наличие которых в сети позволяет сразу определить как особенности процесса, в случае если сеть основана на реальных данных, так и его правдоподобность, в случае модельных данных.

Публикации

Karsakov A.S., Moiseev A.P., Mukhina K.D., Ankudinova I.N., Ignatieva M.A, Krotov E., Karbovskii V.A., Kovalchuk S.V., Konradi A.O. Toolbox for visual explorative analysis of complex temporal multiscale contact networks dynamics in healthcare // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 80. P. 2107–2118.

Литература

1. Keim D.A. Information visualization and visual data mining // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2002. Vol. 8. No 1. P. 1–8.
2. Bezgodov A.A. et al. The framework for rapid graphics application development: the multi-scale problem visualization // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 51. P. 2729–2733.
3. Egorov D.A., Bezgodov A.A. Improved force-directed method of graph layout generation with adaptive step length // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 66. P. 689–696.



Набиуллина Резида Даниловна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: rezida2105@mail.ru

Ж-АГРЕГАТЫ В МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ: САМООРГАНИЗАЦИЯ, ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Р.Д. Набиуллина

Научный руководитель – доцент А.А. Старовойтов

В последнее время повышенный интерес вызывают металлоорганические структуры, состоящие из металлических наночастиц и органических красителей. В таких структурах наблюдались такие эффекты, как гигантское комбинационное рассеяние, изменение скорости спонтанного радиационного распада, аномальный высокий квантовый выход флуоресценции молекул и фотоиндуцированные химические реакции вблизи металлических частиц [1]. Благодаря этим свойствам такие структуры широко используются в биомедицине, фотоэлектрических устройствах, излучающих свет или преобразующих оптическую энергию в электрическую, а также для создания когерентного наноизлучателя.

Цель проекта – выявление общих закономерностей самоорганизации и фотоиндуцированного формирования молекулярных J-агрегатов цианиновых красителей на островковых пленках из наночастиц серебра. Объектом исследования являются металлоорганические структуры, представляющие собой наночастицы Ag, покрытые тонким слоем цианиновых красителей.

Островковые пленки толщиной от 2 до 8 нм были получены методом вакуумного напыления в установке *Kurt Lesker PVD 75*. В спектре оптической плотности островковой пленки наблюдается интенсивный максимум, обусловленный плазмонным поглощением наночастиц серебра. Широкий плазмонный резонанс вызван неоднородным уширением за счет разных размеров наночастиц.

В качестве молекул красителя были использованы цианиновые красители одного гомологического ряда с разной длиной цепи сопряжения: псевдо-, моно- и дикарбоцианины. Красители разной концентрации наносились методом центрифугирования на спин-коатере из насыщенного раствора в этаноле. Толщина получаемого слоя красителя варьировалась от 30 до 50 нм. Для дистанцирования молекул красителя от наночастиц серебра использовался синтетический полимер метилметакрилат (ПММА), который, как и краситель, наносился методом центрифугирования.

Для цианиновых пленок на диэлектрических подложках, как было показано ранее [2], можно выделить следующие группы молекулярных форм: *all-trans*-изомеры, *cis*-изомеры, димеры и J-агрегаты. Аналогичные молекулярные формы наблюдались и на слоях сплошного серебра [3]. Поскольку ближнее поле наночастиц серебра не вызывает значительных изменений молекулярного состава слоя красителя, можно считать, что молекулярные формы, образующиеся на островковой пленке, похожи на те, что образуются в органической (рис. 1). В ходе работы было обнаружено, что спектры поглощения металлоорганических пленок представляют собой не простую сумму поглощения молекул и плазмонного резонанса наночастиц. Из графиков видно, что для монокарбоцианина поглощение слоя в области J-агрегатов молекул красителя увеличилось в 4 раза, а для дикарбоцианина почти в 10 раз (рис. 1б, 1с). Усиление поглощения красителя связано с тем,

что его молекулы находятся в ближнем поле наночастиц, в которых возбуждены резонансные плазмонные колебания. В случае псевдокарбоцианина поглощение в полосах всех молекулярных форм увеличивается в пять раз, однако наблюдается спектральный провал в области *J*-агрегатов (рис. 1а), причиной которого является «сильное связывание» плазмон-экситона [4].

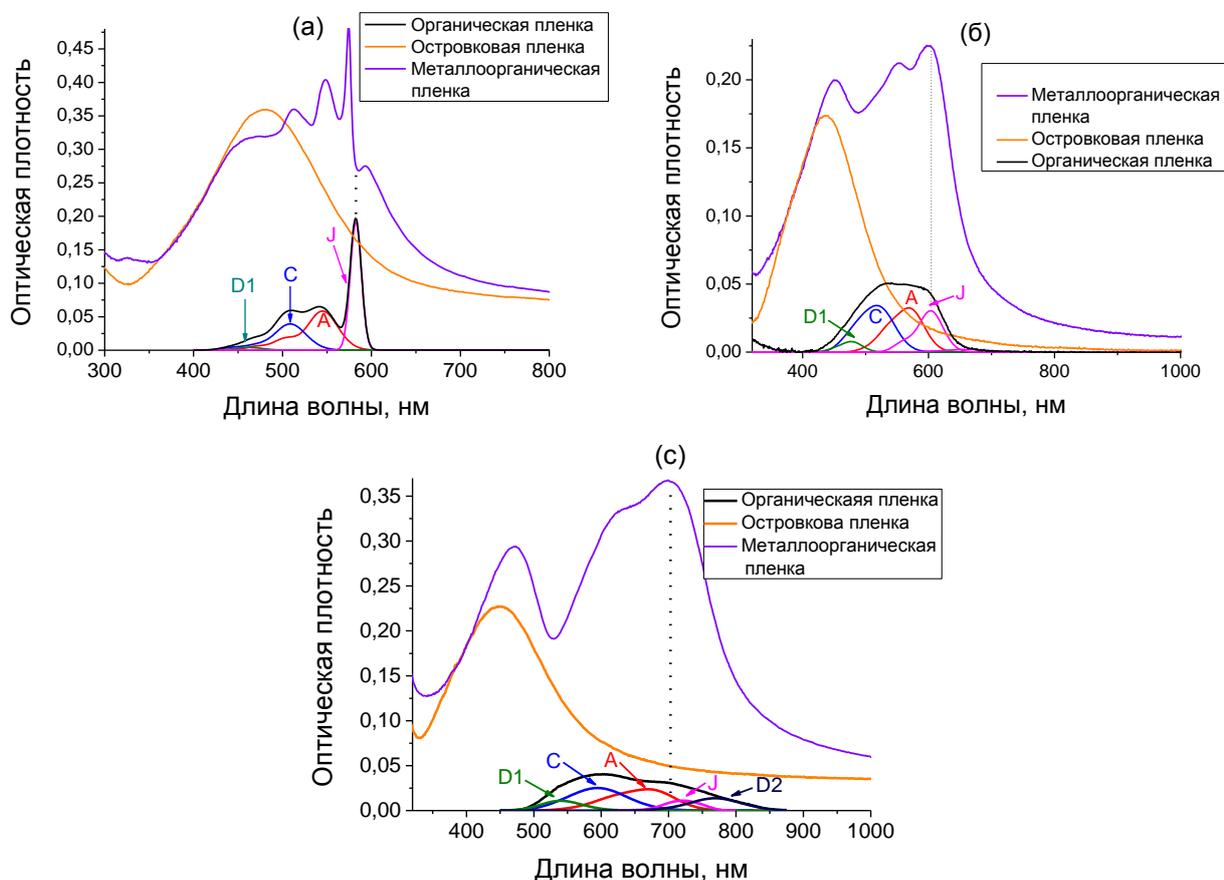


Рис. 1. Спектры оптической плотности островковых и металлоорганических пленок, а также спектры поглощения органической пленки: а – псевдо-, б – моно- и с – дикарбоцианина. В спектрах органических пленок выделены формы: *all-trans*- (A) и *cis*-изомеры (C), димер (D1, D2) и *J*-агрегаты (J)

Для получения зависимости оптических свойств от формы наночастиц были рассмотрены слои цианиновых красителей, нанесенные на островковые пленки серебра эквивалентной толщины от 2 до 8 нм. При нанесении одинакового количества моно- и дикарбоцианина наблюдалось увеличение поглощения всех их молекулярных форм по мере увеличения толщины серебряной пленки (рис. 2б, 2с). Для псевдокарбоцианина, в отличие от моно- и дикарбоцианина, наблюдался спектральный провал в области максимума поглощения *J*-агрегата (рис. 2а), который уменьшается по мере увеличения толщины серебряной пленки.

Для уточнения положения полосы *J*-агрегата в спектре металлоорганической структуры были исследованы спектры ее флуоресценции. В случае монокарбоцианина при сопоставлении спектров поглощения молекулярных форм органической пленки и флуоресценции металлоорганической структуры максимум флуоресценции на 665 нм можно связать со свечением *J*-агрегатов.

При условии дистанцирования наночастиц Ag от молекул красителя слоем ПММА наблюдается влияние толщины изолирующего слоя на оптические свойства металлоорганических структур, о чем свидетельствуют спектры поглощения (рис. 3) и флуоресценции (рис. 4). Из графиков видно, что нанесение ПММА приводит к сдвигу максимума плазмонного резонанса. При увеличении эквивалентной толщины ПММА до

45 нм уменьшаются оптические свойства металлоорганических структур, что связано с отсутствием влияния ближнего поля серебряных наночастиц на молекулы красителя.

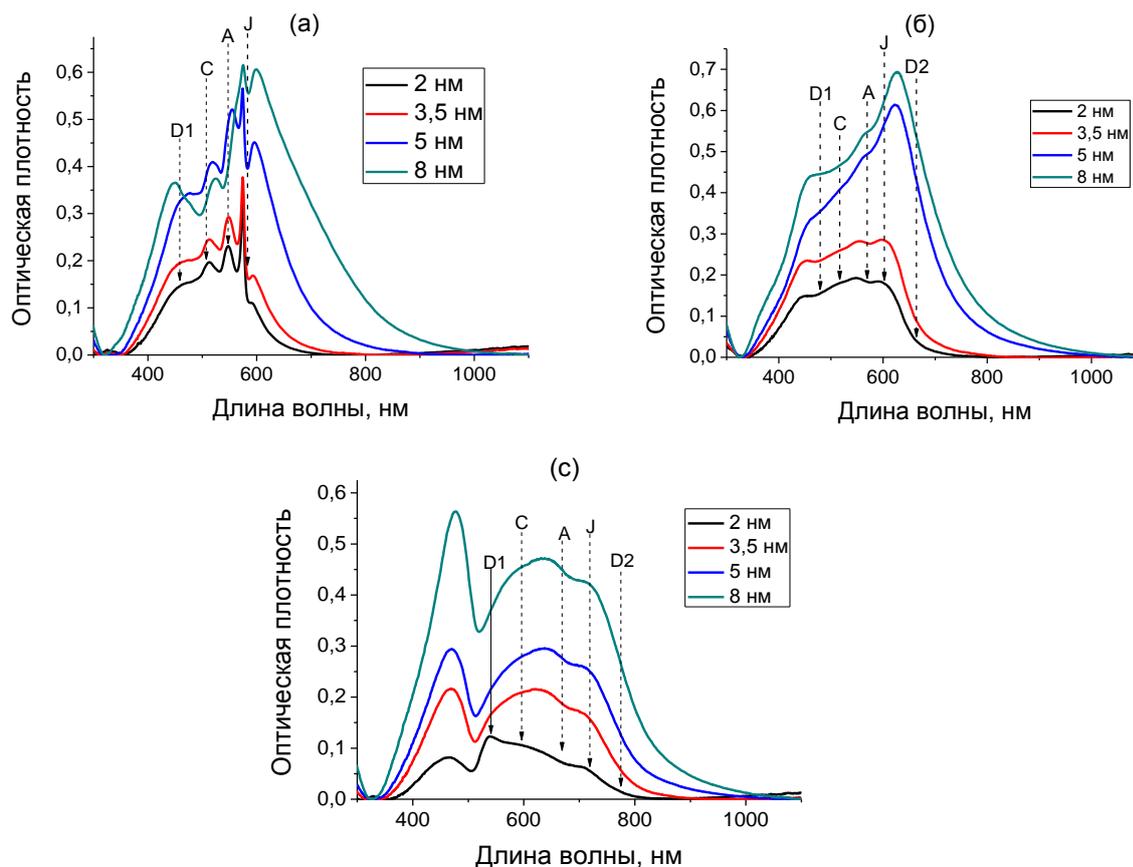


Рис. 2. Спектры поглощения: а – псевдо-, б – моно- и с – дикарбоцианина, нанесенные на островковые пленки разной эквивалентной толщины от 2 до 8 нм

После воздействия резонансным лазерным излучением на длине волны 532 нм с плотностью энергии 30 мДж/см² спектр органической пленки необратимо меняется. Поглощение агрегатов уменьшается, а интенсивность поглощения мономеров – увеличивается. Такая зависимость, очевидно, связана с термическим развалом агрегатов на мономеры. В псевдокарбоцианине наблюдается уменьшение всех молекулярных форм, что связано с разрушением при резонансном воздействии на *all-trans*-изомер.

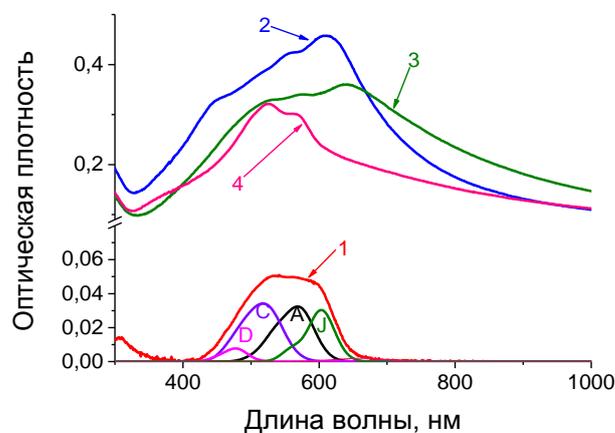


Рис. 3. Спектры поглощения органической пленки монокарбоцианина (1) и оптической плотности металлоорганических структур: 2 – без ПММА; 3 – с ПММА толщиной 14 нм; 4 – с ПММА толщиной 45 нм. В спектрах органических пленок выделены формы: А – *all-trans*- и С – *cis*-изомеры; D – димер и J – J-агрегаты

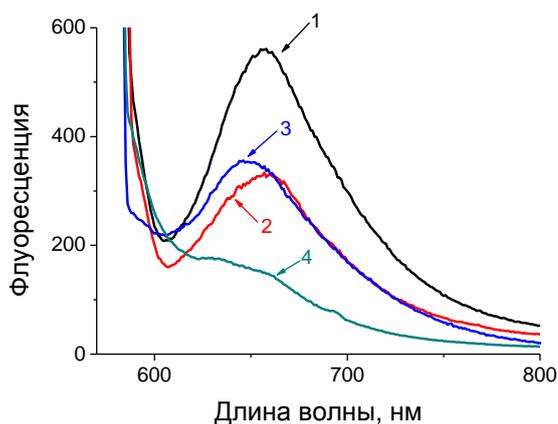


Рис. 4. Спектры флуоресценции молекул монокарбоцианина в металлоорганических структурах: 1 – без ПММА; 2 – с ПММА (толщина 4,6 нм); 3 – с ПММА (толщина 23 нм); 4 – с ПММА (толщина 45 нм)

В металлоорганических структурах при выборе плотности энергии в 8 мДж/см^2 , которая не влечет изменения спектра наночастиц, прослеживалось возрастание поглощения в области как для димеров, так и для *J*-агрегатов (рис. 5). В металлоорганических пленках с псевдокарбоцианином поглощение в области димеров уменьшается, а поглощение в полосе *J*-агрегатов, как и в полосе *all-trans*-изомеров – увеличивается. Можно предположить, что формирование *J*-агрегатов в слоях происходит из других молекулярных форм и сопровождается уменьшением их концентрации. Следует отметить, что плотность энергии в 8 мДж/см^2 не приводила к изменениям ни островковых пленок, ни органических, однако, вызывала фотоиндуцированные изменения в металлоорганических структурах.

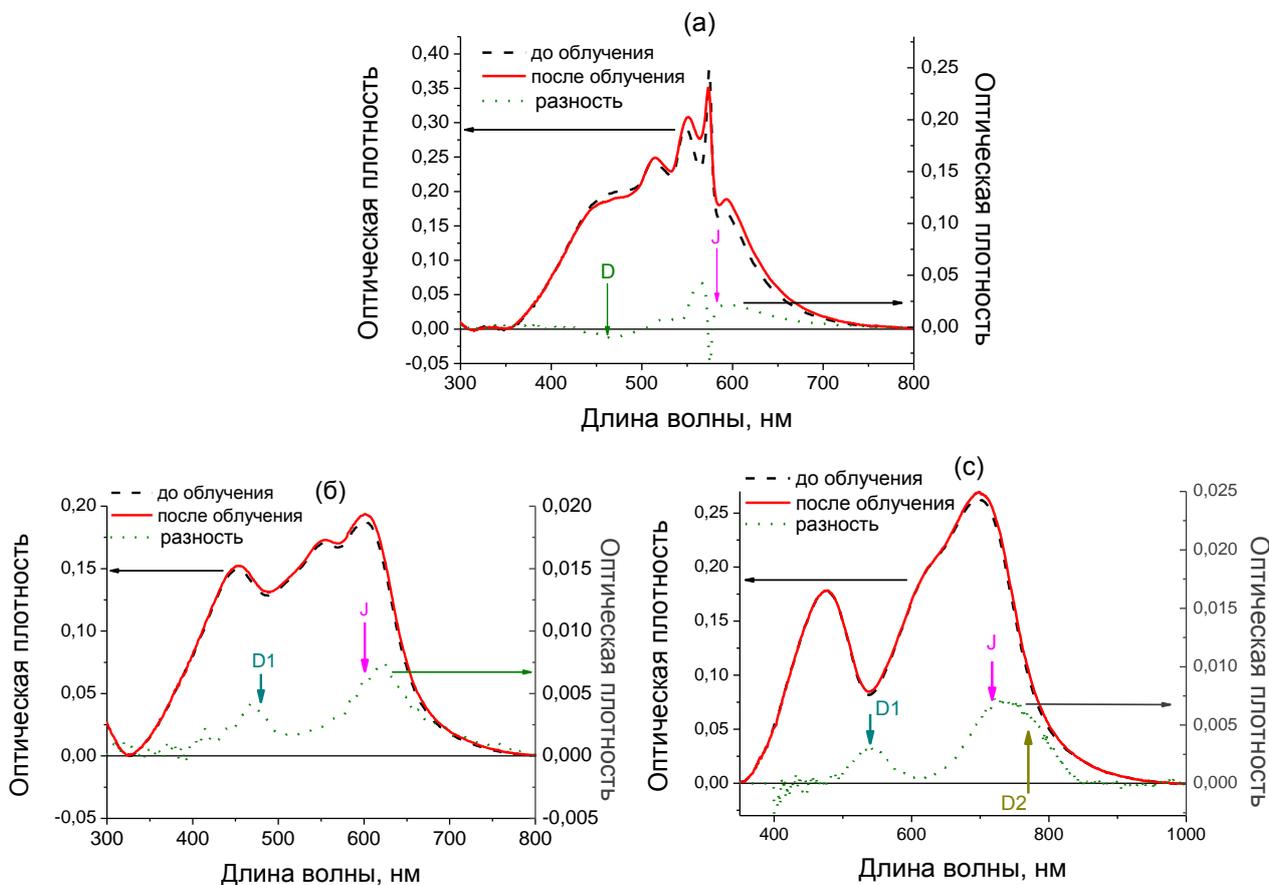


Рис. 5. Спектры поглощения металлоорганических структур: а – псевдо-, б – моно-, с – дикарбоцианина – до и после облучения. Пунктирная кривая демонстрирует фотоиндуцированные изменения в спектрах поглощения

Заключение

В данной работе были исследованы металлоорганические структуры на основе островковых пленок серебра, покрытых слоем цианинового красителя.

Показано, что их поглощение не является суммой поглощения слоя цианинового красителя и плазмонного резонанса наночастиц серебра, так как компоненты гибрида влияют друг на друга. В присутствии наночастиц поглощение молекул красителя в полосе J-агрегатов увеличилось в 4 и 10 раз для моно- и дикарбоцианина соответственно. В металлоорганической пленке с псевдокарбоцианином поглощение молекулярного слоя увеличивается также до 10 раз, однако в максимуме поглощения J-агрегатов наблюдается спектральный провал, вызванный переносом энергии в результате сильного связывания при плазмон-экситонном взаимодействии.

Рассмотрена возможность дистанцирования молекул красителя от наночастиц посредством изолирующего слоя ПММА для уменьшения тушения флуоресценции красителя за счет переноса возбуждения на наночастицы серебра. После воздействия резонансным светом на длине волны 532 нм и плотностью энергии в 8 мДж/см² наночастицы серебра не меняют свою морфологию, а в спектрах металлоорганических структур наблюдается увеличение в полосах агрегатов – димеров и J-агрегатов. Для получения фотостимулированных изменений в органических пленках без наночастиц необходима плотность энергии в три раза больше.

Публикации

1. Starovoytov A.A., Nabiullina R.D., Toropov N.A. Self-organization and photo-induced formation of cyanine dye aggregates on the plasmonic Ag nanoparticles // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9884. P. 98843P.
2. Набиуллина Р.Д. Фотоника тонких пленок с J-агрегатами цианиновых красителей и серебряными наночастицами [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3506/3506.pdf> (дата обращения: 03.11.16).
3. Старовойтов А.А., Торопов Н.А., Набиуллина Р.Д. Самоорганизация и фотоиндуцированное формирование нанокластеров органических молекул на поверхности плазмонных наноструктур // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 83–86.
4. Starovoytov A.A., Nabiullina R.D., Toropov N.A. Modification of the photonic properties of cyanine thin films by near fields of plasmonic nanostructures // Proceeding of TNT Conference. Toulouse, 2015. P. 21.
5. Набиуллина Р.Д., Старовойтов А.А., Торопов Н.А. Формирование J-агрегатов и их флуоресценция в тонких пленках полиметиновых красителей с наночастицами Ag [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1252/1252.pdf> (дата обращения: 03.11.16).
6. Набиуллина Р.Д., Старовойтов А.А., Торопов Н.А. Фотоника органических молекул в ближнем поле плазмонных наночастиц, покрытых слоем диэлектрика // Сборник трудов VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». СПб., 2014. С. 301–303.
7. Набиуллина Р.Д., Старовойтов А.А., Торопов Н.А. Влияние полимерного изолирующего слоя на оптические свойства молекул цианинового красителя в ближнем поле серебряных наночастиц // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 336–337.

Литература

1. Медведев А.С. Теоретическое исследование спектров поглощения и рассеяния света гибридными металлоорганическими наночастицами: дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2013. – 141 с.

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

2. *Калитеевская Е.Н. и др.* Влияние структуры молекулы цианинового красителя на компонентный состав молекулярных слоев // *Оптика и спектроскопия*. 2016. Т. 120. № 3. С. 163–173.
3. *Старовойтов А.А. и др.* Изомерный и агрегатный состав нанометровых слоев полиметиновых красителей на диэлектрической и металлической поверхностях // *Сборник трудов VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012»*. СПб., 2012. С. 585.
4. *Antosiewicz T.J. et al.* Plasmon-exciton interactions in a core-shell geometry: From enhanced absorption to strong coupling // *ACS Photonics*. 2014. Vol. 1. № 5. P. 454–463.



Нехороших Артем Николаевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: becks94@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ РЕКТИФИКАЦИИ

А.Н. Нехороших

Научный руководитель – доцент И.Б. Фуртат

Предложено два робастных алгоритма управления: алгоритм, разработанный на базе модифицированного метода бэкстеппинга, и алгоритм, использующий наблюдатель, основанный на левых разностях. При решении предполагается, что измерению доступен только выходной сигнал объекта, и имеется ряд предположений: параметры и структура объекта неизвестны, объект является минимально фазовым, известна верхняя граница его относительной степени.

В работе приведены результаты численного моделирования процесса ректификации, доказывающие работоспособность предложенных схем управления, оказавшихся более эффективными по сравнению с классическим оптимальным регулятором.

Введение

Для качественного управления процессом ректификации требуется создание простых и надежных регуляторов. На сегодняшний день предложено множество решений данной проблемы. Например, в [1] исследуется модель ректификационной колонны и синтезируется алгоритм оптимального нечеткого управления, в случае когда параметры объекта управления известны. Однако в [2] отмечено, что процессы, протекающие в ректификационной колонне, достаточно чувствительны к изменениям внешних потоков. Таким образом, даже малые различия параметров модели и прототипа приведут к невозможности выполнения заданных показателей качества или к потере устойчивости, в случае проектирования системы управления с помощью алгоритма [1] и других, синтезированных в предположении полной определенности параметров объекта управления. В [2] для управления процессом ректификации, математическая модель которого описывается системой неопределенных линейных дифференциальных уравнений, синтезировался регулятор при помощи метода H_∞ -оптимизации. Однако структура регулятора [2] и расчет настраиваемых параметров довольно

сложны, поэтому возникает интерес решить задачу управления ректификационной колонной, математическая модель которой описывается системой параметрически и функционально неопределенных дифференциальных уравнений.

Постановка задачи

На основе данного обзора сформулируем основные цели и задачи, поставленные при выполнении исследовательской работы.

Цели:

- разработать новые эффективные алгоритмы управления в условиях параметрических и структурных неопределенностей и внешних возмущений;
- применить разработанные схемы для управления процессом ректификации.

Задачи:

- синтезировать регулятор на базе модифицированного метода бэкстеппинга;
- синтезировать регулятор с использованием наблюдателей, основанных на левых разностях;
- синтезировать оптимальный регулятор для сравнения эффективности работы предложенных регуляторов;
- исследовать качество переходных процессов модели ректификационной колонны, используя классический оптимальный и предложенные регуляторы;
- сделать вывод об эффективности работы предложенных алгоритмов.

Синтез регуляторов

Для решения задачи управления процессом ректификации были предложены два алгоритма: модифицированный метод бэкстеппинга и использование наблюдателя, вычисляемого при помощи левых разностей.

Для сравнения работоспособности замкнутой системы при использовании предложенных регуляторов также применялся классический оптимальный регулятор.

Метод бэкстеппинга. Синтез регулятора проводился методом бэкстеппинга в соответствии с [3].

Так как объект управления имеет относительную степень равную единице, то введем фильтр состояния в виде:

$$\dot{v}_1(t) = -k_0 v_1(t) + u(t), \quad (1)$$

где $k_0 > 0$ – параметр, определяемый разработчиком.

Сигнал управления сформируем как:

$$u(t) = -c_1 \mu^{-1} e_1(t) + k_0 v_1(t), \quad (2)$$

где $c_1 \mu^{-1} > 0$ – параметр, определяемый разработчиком; $e_1(t) = y(t) - y_m(t)$ – ошибка слежения выхода $y(t)$ за эталонным сигналом $y_m(t)$.

Численные исследования показали, что для обеспечения заданных характеристик процесса ректификации числовые параметры в (1) и (2) необходимо выбрать в виде $k_0 = 0,015$ и $c_1 \mu^{-1} = 50$.

Использование наблюдателей, основанных на левых разностях. Синтез регулятора с использованием наблюдателей, основанных на левых разностях, проводился в соответствии с [4].

Так как объект управления имеет относительную степень, равную единице, то необходимо оценить только первую производную ошибки. Управление запишется в виде:

$$u(t) = -\alpha \left[d_0 e(t) + \frac{d_1}{h} (e(t) - e(t-h)) \right], \quad (3)$$

где $\alpha > 0$, $d_0 > 0$, $d_1 > 0$ – параметры, определяемые разработчиком; h – величина запаздывания; $e_1(t) = y(t) - y_m(t)$ – ошибка слежения выхода $y(t)$ за эталонным сигналом $y_m(t)$.

Численные исследования показали, что для обеспечения заданных характеристик процесса ректификации, числовые параметры в (3) необходимо выбрать в виде: $\alpha = 50$, $d_0 = 30$, $d_1 = 0,05$ и $h = 0,001$ с.

Классический оптимальный регулятор. Синтез оптимального регулятора проводился в соответствии с [5].

Зададим функционал качества в виде:

$$J_\rho = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\mathbf{e}_\rho^T \mathbf{Q}_m \mathbf{e}_\rho + u^T \mathbf{R}_m u) dt, \quad (4)$$

где $\mathbf{e}_\rho = \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{A}_m \mathbf{e}$ – динамическая ошибка слежения; $\mathbf{e}(t) = (y_m(t) - y(t); \int_0^t [y_m(\tau) - y(\tau)] d\tau)^T$ – расширенный вектор ошибки слежения выхода $y(t)$ за эталонным сигналом $y_m(t)$;

$\mathbf{A}_m = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,1 \end{pmatrix}$ – динамическая матрица ошибки; $\mathbf{Q}_m = \begin{pmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{pmatrix}$; $R_m = 0,05$ – весовые матрицы ошибки слежения и управления соответственно.

Оптимальное управление, минимизирующее функционал качества (4), запишется как:

$$u^*(t) = -\mathbf{K}_x \mathbf{x}(t) - K_r y_m(t), \quad (5)$$

где $\mathbf{K}_x = [1,0682 \ 0,1684 \ 0,0640 \ 0,0263 \ 0,0119 \ 0,0052 \ 0,0019 \ -0,0005 \ -0,0117 \ -0,0002 \ -0,1008 \ -0,0141]$ – коэффициенты обратных связей; $K_r = -0,4802$ – коэффициент прямой связи.

Исследование динамики переходных процессов

В работе исследовалось влияние параметрических неопределенностей объекта управления на вид переходных процессов замкнутой системы. Математически данный вид неопределенностей заключен в динамических матрицах \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 .

Также исследовалось влияние внешних неконтролируемых возмущений, заданных в виде гармонических сигналов, амплитуды которых равны 1 % от номинальных значений.

На рис. 1–3 представлены переходные процессы по управлению (мольному расходу флегмы) и разности между желаемой и реальной концентрациями верхнего продукта (ошибке регулирования) при использовании каждого из регуляторов. Синим цветом обозначены переходные процессы в отсутствие параметрических неопределенностей, красным – при наличии неопределенностей первого вида (динамическая матрица \mathbf{A}_1), зеленым – при наличии неопределенностей второго вида (динамическая матрица \mathbf{A}_2). Усредненные значения получены при отсутствии внешних неконтролируемых возмущений.

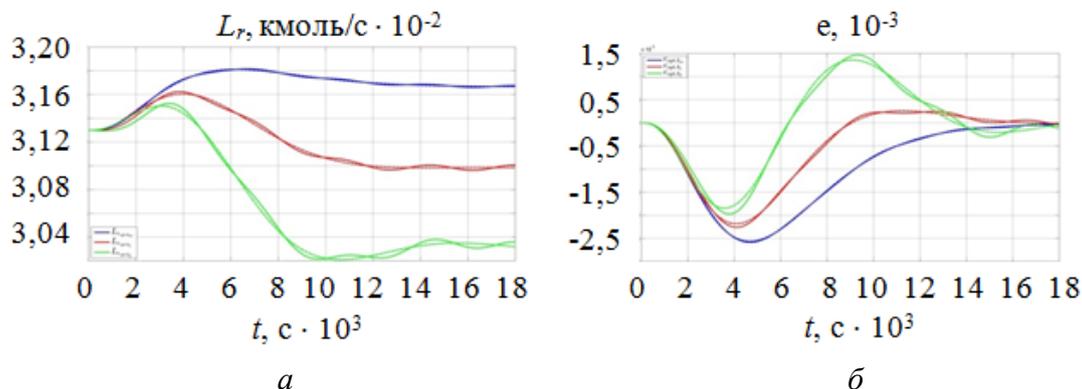


Рис. 1. Исследование динамики переходных процессов при использовании оптимального регулятора (5): а – мольный расход флегмы; б – ошибка регулирования

Из рисунков видно, что появление внешних гармонических возмущений вызывает появление гармонической составляющей в кривой переходного процесса. Параметрические неопределенности увеличивают значение перерегулирования и максимальное значение установившейся ошибки.

Перерегулирование по управлению почти не изменяется при использовании различных регуляторов, но увеличивается примерно в два раза при изменении динамической матрицы объекта управления. Максимальное его значение составило 4 %.

Все регуляторы обеспечивают время переходного процесса $t_{\text{пн}} = 18000$ с (5 ч) при соответствующих значениях установившейся ошибки. Регулятор, синтезированный с помощью метода бэкстеппинга, позволяет свести максимальное значение ошибки до 10^{-6} , что на три порядка меньше, чем при применении классического оптимального регулятора. Регулятор, использующий наблюдателей, основанных на левых разностях, позволяет еще в два раза уменьшить ошибку, а также ее размах.

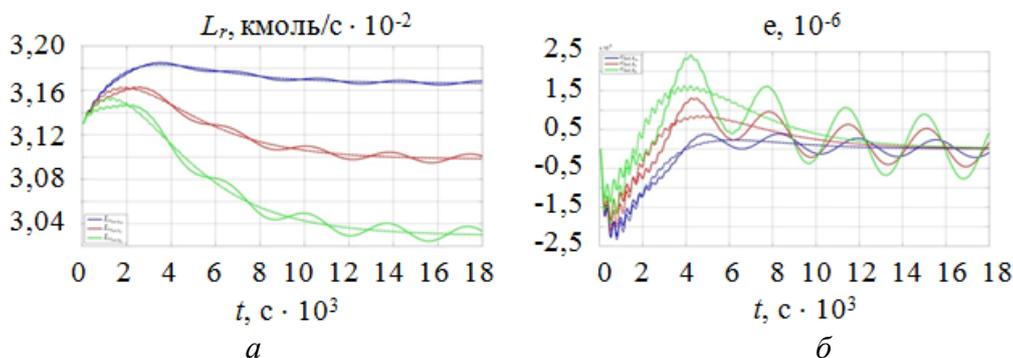


Рис. 2. Исследование динамики переходных процессов при использовании метода бэкстеппинга (1, 2): а – мольный расход флегмы, б – ошибка регулирования

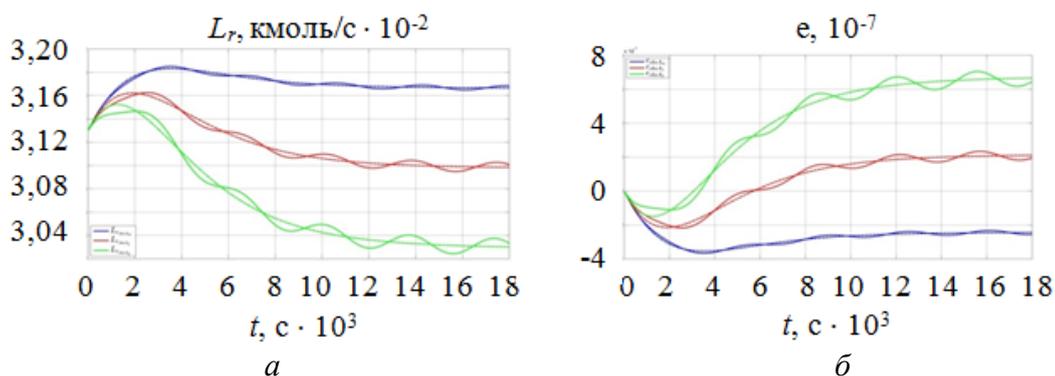


Рис. 3. Исследование динамики переходных процессов при использовании непрерывного наблюдателя с левыми разностями (3): а – мольный расход флегмы, б – ошибка регулирования

Заключение

В ходе выполнения проекта были разработаны два робастных алгоритма управления. Один – на базе модифицированного метода бэкстеппинга, а второй использует наблюдатель, основанный на левых разностях.

В отличие от ранее известных методов, созданных на базе метода бэкстеппинга, была предложена система управления, робастная по отношению к структурным неопределенностям объекта управления. Это позволяет синтезировать единственную систему управления для объекта управления с неизвестным динамическим порядком.

Для оценки производных использовался наблюдатель, приближенное дифференцирование в котором осуществлялось с помощью левых разностей, что позволило сформировать систему управления, не содержащую динамических составляющих.

Предложенные схемы управления показали эффективность применения по сравнению с использованием классического оптимального регулятора при численном моделировании процесса ректификации, который описывается системой параметрически и структурно неопределенных дифференциальных уравнений.

Таким образом, заявленные результаты исследования полностью выполнены.

Публикации

1. *Фуртат И.Б., Нехороших А.Н.* Метод бэкстеппинга для структурно неопределенных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 61–67.
2. *Furtat I.B., Tarasov M.S., Nekhoroshikh A.N.* Adaptive algorithm for linear systems with input delay // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No 13. P. 306–311.
3. *Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N., Tarasov M.S.* Robust algorithm using delay for multi-agent systems // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No 13. P. 25–30.
4. *Нехороших А.Н.* Метод бэкстеппинга для структурно неопределенных объектов // Сборник трудов XVIII Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб., 2016 (в печати).
5. *Фуртат И.Б., Нехороших А.Н.* Робастный алгоритм управления линейными объектами с запаздыванием по состоянию // Сборник трудов XVIII Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб., 2016 (в печати).

Литература

1. *Бухтияуи К. и др.* Оптимальное нечеткое управление для снижения энергопотребления в дистилляционных колоннах // Автоматика и телемеханика. 2005. № 2. С. 36–45.
2. *Skogestad S. et al.* Robust control of ill-conditioned plants: high-purity distillation // IEEE Transaction on Automatic Control. 1988. Vol. 33. No 12. P. 1092–1105.
3. *Фуртат И.Б., Нехороших А.Н.* Метод бэкстеппинга для структурно неопределенных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 61–67.
4. *Фуртат И.Б.* Робастный статический алгоритм управления линейными объектами // Автоматика и телемеханика. 2015. № 3. С. 94–107.
5. *Groves K.P. et al.* Reference command tracking for a linearized model of an air-breathing hypersonic vehicle // Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. San Francisco, 2005. P. 2901–2914.



Перцева Елизавета Андреевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра сетевых и облачных технологий
E-mail: pertseva.lizaveta@gmail.com

РАЗРАБОТКА КАТУШКИ ТЕСЛА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Е.А. Перцева

Научный руководитель – доцент К.С. Горшков

Цель работы – теоретически и практически изучить катушку Тесла.

Катушка Тесла представляет собой высокочастотный резонансный трансформатор без ферромагнитного сердечника. С помощью катушки Тесла можно получить высокое напряжение на вторичной обмотке, под действием которого в воздухе происходит

электрический пробой, подобный разряду молнии. Устройство было изобретено Николой Теслой и названо в его честь [1].

Простейший трансформатор Тесла состоит из двух катушек – первичной и вторичной, а также разрядника, конденсатора, тороида и терминала. Первичная катушка обычно содержит несколько витков провода большого диаметра или медной трубки, а вторичная около 1000 витков провода меньшего диаметра. Первичная катушка вместе с конденсатором образуют колебательный контур, в который включен нелинейный элемент – разрядник [2].

Вторичная катушка также образует колебательный контур, где роль конденсатора главным образом выполняют емкость тороида и собственная межвитковая емкость самой катушки. Вторичную обмотку часто покрывают слоем эпоксидной смолы или лака для предотвращения электрического пробоя [2].

Таким образом, трансформатор Тесла представляет собой два связанных колебательных контура, что и определяет его замечательные свойства и является главным отличием от обычных трансформаторов.

После достижения между электродами разрядника напряжения пробоя в нем возникает лавинообразный электрический пробой газа. Конденсатор разряжается через разрядник на катушку. Поэтому цепь колебательного контура, состоящего из первичной катушки и конденсатора, остается замкнутой через разрядник, и в ней возникают высокочастотные колебания. Во вторичной цепи возникают резонансные колебания, что приводит к появлению на терминале высокого напряжения [2].

Рабочая модель катушки Тесла была собрана по схеме, представленной на рис. 1.

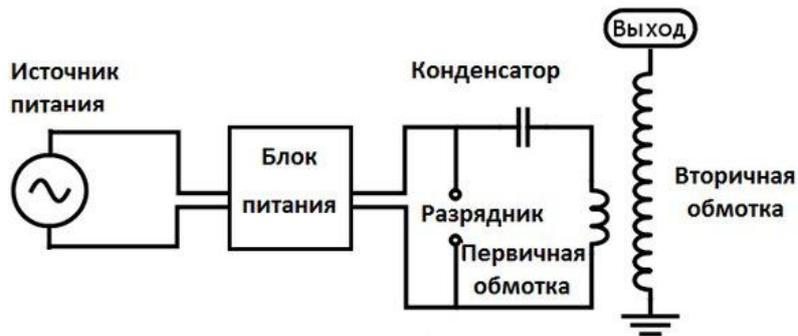


Рис. 1. Рабочая схема катушки Тесла

Для этого были использованы следующие элементы.

1. Вторичная катушка (однослойная), состоящая из ПВХ-трубы диаметром 0,05 м и высотой 0,55 м (для обмотки катушки была задействована часть трубы длиной 0,475 м), на которую было намотано 1000 витков медной проволоки (ПЭТВ-2) диаметром 0,4 мм (использовано около 125 м проволоки). Для фиксации намотки витки были покрыты клеем БФ-4 (ГОСТ 12172-74).

2. Первичная катушка (коническая), изготовленная из медной проволоки диаметром 6 мм и длиной 4 м. Она представляет собой конус высотой 13 см (семь витков). Диаметр первого витка 8 см, седьмого – 18 см.

3. Блок питания *MeanWell RS-25-48*, исполняющий функции понижающего трансформатора и диодного столба. Был выбран понижающий трансформатор, а не повышающий, как в оригинальной схеме, так как в противном случае не было бы возможности обеспечить соблюдение правил техники безопасности.

4. Конденсатор металлопленочный К78-2 (1000 пФ, 315 В).

5. Разрядник, изготовленный из двух строительных металлических уголков, двух шурупов и четырех гаек.

Был проведен эксперимент с лампочкой. Суть его заключается в том, что лампочка загоралась при поднесении ее ко вторичной катушке. Эксперимент оказался успешным.

Отдельно стоит упомянуть возможные опасности и побочные эффекты, возникающие при использовании высокоомощных катушек Тесла (мною была произведена сборка

маломощной катушки). В первую очередь стоит опасаться сильных разрядов, которые испускает вторичная катушка в воздух, так как их мощность может достигать тысяч ватт. В этих ситуациях также происходит перенасыщение воздуха озоном, что в свою очередь ведет к переизбытку озона в крови, что может повлечь за собой в лучшем случае головные боли, а в худшем – сильнейшее отравление с дальнейшими негативными последствиями.

В ходе исследовательской работы была проанализирована доступная теоретическая информация о принципах работы катушки Тесла и возможных элементах схемы, проведена сборка рабочей схемы и эксперимент с зажиганием лампочки на расстоянии. Были выявлены как преимущества катушки Тесла, например возможность передачи электричества по воздуху, так и отрицательные моменты, связанные с внесением помех в работу других приборов, что делает невозможным широкое использование высокомошных катушек Тесла.

Литература

1. Усольцев А.А. Общая электротехника. СПб., 2013. – 305 с.
2. Яннини Б. Удивительные электронные устройства / пер. с англ. С.О. Махарадзе. М., 2008. – 400 с.



Письмак Алексей Евгеньевич
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: alexey.pismak@cs.ifmo.ru

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.Е. Письмак

Научный руководитель – ассистент И.В. Перминов

Современные направления в области информационных технологий все больше ориентированы на интеллектуальную обработку данных. Одним из наиболее часто встречаемых представлений данных является текст на естественном языке. В простейшем случае для его автоматической обработки могут быть использованы грамматические или синтаксические анализаторы. Однако для интеллектуальной обработки текстовой информации требуется анализ и выделение семантических характеристик текста. Для решения такого рода задач необходимы соответствующие инструменты. Одним из них является семантическая сеть – направленный граф дефиниций, ребрами которого являются семантические отношения.

Ключевая проблема, возникающая при построении такого графа, – трудоемкость решения. Из этого вытекает необходимость в разработке алгоритмов автоматического формирования семантической сети. Для решения этой задачи могут быть использованы различные словарные источники, которые содержат такого рода информацию.

Цель данного проекта – повышение качественных характеристик смысловой обработки текстовой информации. Для достижения цели в рамках проекта были выполнены следующие задачи:

- проведено исследование словарных источников, содержащих семантическую информацию;

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- спроектированы и реализованы алгоритмы разбора семантической информации из внешних источников;
- импортированы полученные данные в семантическую сеть.

Повышение качества обработки текста достигается за счет использования семантической сети с высокими метриками связности при больших, по сравнению с существующими решениями, объемах дефиниций (узлов семантического графа).

В рамках проекта было проведено исследование слабоструктурированного словарного источника *Wiktionary*. На основе структуры русскоязычных словарных статей этого источника была построена первичная семантическая сеть, узлы которой связаны отношением вида «смысл – лексема».

Процессы анализа и построения семантической сети были автоматизированы. Реализованы алгоритмы разбора словарных статей вышеуказанного источника, которые автоматизируют скачивание словарных статей, выполняют анализ их структуры и построение объектно-ориентированной модели смысловых значений и связей между ними. В работе предложен метод автоматического формирования семантической сети из слабо структурированных источников, описанный в статье [1]. Предложен также способ оценки семантической близости смысловых значений в англоязычных словарных статьях [2].

Первичная семантическая сеть была доработана путем восстановления и генерации семантических связей между смысловыми значениями. Для этого было реализовано четыре алгоритма, повышающих связность первичной семантической сети.

- *Bidirectional Links (BDL)* – алгоритм, восстанавливающий симметричные семантические связи, например «синоним – антоним», «мероним – холоним» и т. д. Алгоритм оперирует смысловыми значениями, которые ссылаются на лексемы друг друга.

- *Link to Single Sense (LSS)* – алгоритм, восстанавливающий связи между смысловыми значениями, единственными для заданной лексемы.

- *Synonym Based Algorithm (SBA)* – алгоритм, восстанавливающий семантическую связь, основываясь на синонимии смысловых значений.

- *Hyperonym Based Algorithm (HBA)* – алгоритм, восстанавливающий семантические связи, основываясь на общей гиперонимии двух заданных смысловых значений.

Полученные алгоритмы будут представлены на восьмой международной конференции по обнаружению, инженерии и управлению знаниями [3] и опубликованы. Количественные метрики полученных результатов представлены в Таблице. В результате была получена семантическая сеть с 155 129 связей и 101 993 связных узлов.

Таблица

Результаты восстановления семантических связей

Алгоритм	BDL	LSS	SBA	HBA
Количество восстановленных связей	32 562	57 814	5 455	1 484
Количество сгенерированных связей	0	57 814	0	0
Процент восстановленных связей	~ 16	~ 28	~ 2,4	~ 0,7

Для сформированной семантической сети была разработана объектная модель словарных статей, представленная на рис. 1. Она отображает метод хранения полученных данных в графовой базе данных *OrientDB*, где вершинами графа являются смысловые значения, а ребрами – семантические отношения.

Перспективная область использования полученной системы – автоматическая обработка текстов с применением семантических фреймов [4].

Древовидная структура семантической сети, построенная на гиперонимии, позволит вводить обобщения понятий, избегая прямого указания смысловых значений. Фактически, высокая связность сети позволит осуществлять точную смысловую выборку данных из текста, используя язык, базирующийся на идее семантических фреймов [4]. Области применения такого программного обеспечения многообразны: перевод, смысловой поиск в тексте, фильтрация текста и т. д.

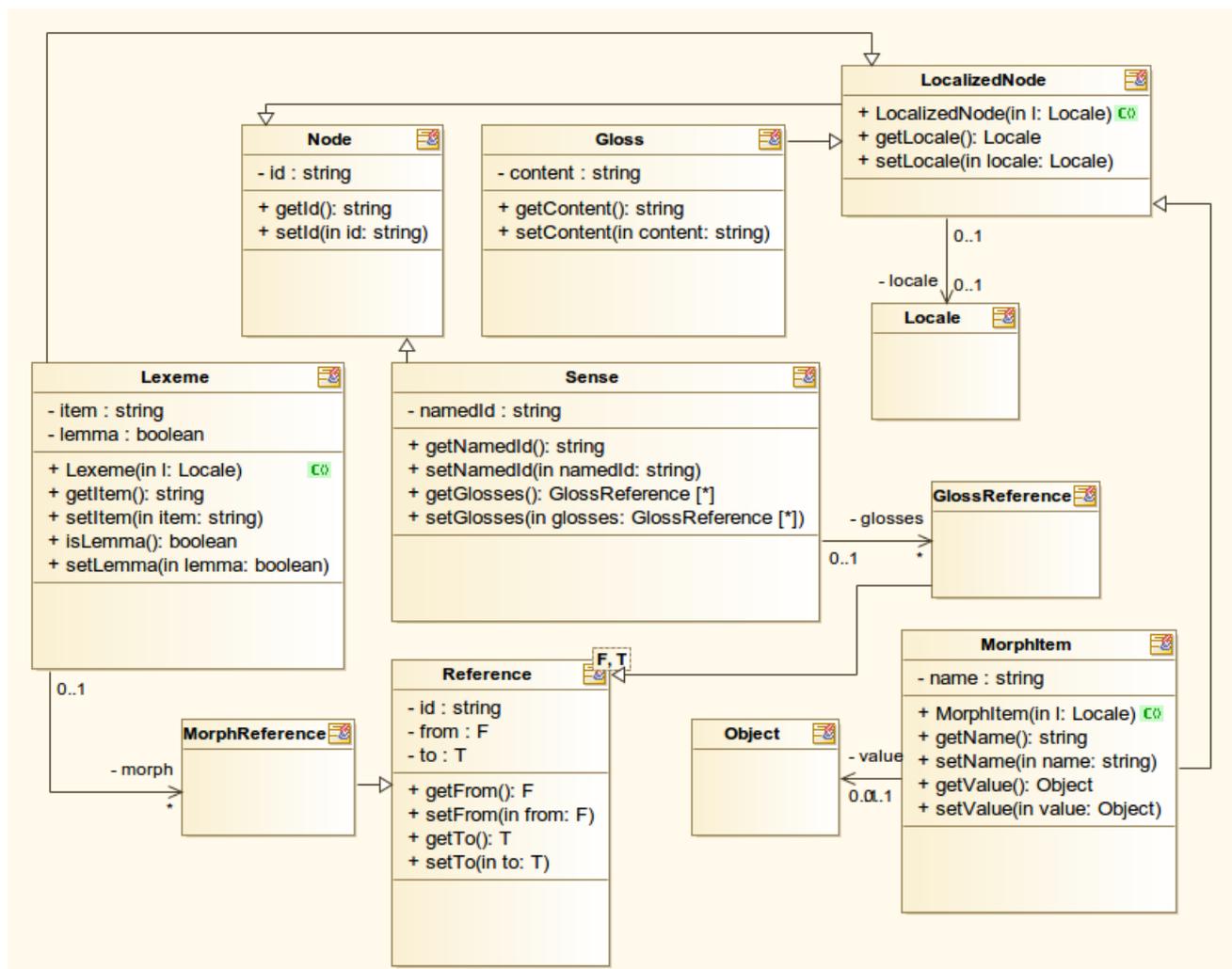


Рис. 1. Объектная модель для хранения данных в графе

Публикации

1. Письмак А.Е., Харитонова А.Е., Цона Е.А., Клименков С.В. Оценка семантической близости предложений на естественном языке методами математической статистики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 324–330.
2. Письмак А.Е., Цона Е.А., Харитонова А.Е., Клименков С.В. Метод автоматического формирования семантической сети из слабоструктурированных источников // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 74–78.
3. Цона Е.А., Романов И.Л., Письмак А.Е. Импорт электронного каталога в семантическую сеть [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2991/2991.pdf> (дата обращения: 15.07.16).
4. Клименков С.В., Письмак А.Е., Яркеев А.С. Импорт семантических связей в словарь из внешних источников [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых

ученых. Электронное издание. 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2998/2998.pdf> (дата обращения: 15.07.16).

5. *Klimenkov S.V., Tsopa E.A., Pismak A.E., Yarkeev A.S.* Reconstruction of implied semantic relations in Russian Wiktionary // Proceedings of the 8th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. Porto, 2016. Vol. 2. P. 74–80.

Литература

1. *Письмак А.Е. и др.* Метод автоматического формирования семантической сети из слабоструктурированных источников // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 74–78.

2. *Письмак А.Е. и др.* Оценка семантической близости предложений на естественном языке методами математической статистики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 324–330.

3. KEOD 2016: 8th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management [Electronic resource]. URL: <http://www.keod.ic3k.org> (accessed: 01.06.16).

4. *Богданова В.А.* Расширяемая грамматика фреймов Филлмора // Сборник трудов VII Научно-практической конференции молодых ученых «Вычислительные системы и сети (Майоровские чтения)». 2016. С. 117–119.



Рымкевич Владимир Сергеевич
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: hellmapper@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТЕКЛА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ МАССИВОВ

В.С. Рымкевич

Научный руководитель – научный сотрудник М.М. Сергеев

Одним из ключевых параметров лазерной обработки является создание однородного распределения энергии по сечению пучка в плоскости его перетяжки [1]. Отсутствие однородного распределения энергии излучения в фокальной плоскости линзы приводит к неоднородным условиям микрообработки материала в зоне лазерного воздействия. Эффективное решение этой серьезной проблемы – использование методов сглаживания пучка по теории оптической дифракции [2]. Были предложены, изготовлены и протестированы различные виды оптических элементов, сглаживающих пучки [3, 4]. Частным случаем таких дифракционных оптических элементов (ДОЭ) являются случайные фазовые пластины (СФП), которые привлекают всеобщее внимание [5] из-за их высокой дифракционной эффективности, удобства контроля за формой фокального пятна, низких оптических потерь и высокого коэффициента использования энергии. СФП с бинарной

структурой (БСФП) эффективно применяются для гомогенизации низкокогерентного лазерного излучения. В данной работе рассмотрена проблема записи многоуровневых микрооптических элементов и их массивов.

Экспериментальные методы

Формирование карты глубин, а также СФП на пластине плавленного кварца проводилось на макете лазерной установки (рис. 1а), используя метод лазерно-индуцированной обработки микроплазмой [6]. Источником излучения служил импульсный Yb: волоконный лазер (1) с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм, длительностью импульса $\tau = 4\text{--}200$ нс, частотой следования импульсов $f = 1\text{--}100$ кГц. Перемещение лазерного пучка осуществлялось с помощью двухкоординатного гальванометрического сканирующего устройства (2). Объектив (3) создавал в области фокуса пятно лазерного пучка размером $d_0 = 50$ мкм; на неподвижном координатном столе (4) располагались пластины прессованного графита (5) и кварцевого стекла (6). Управление системой осуществлялось с использованием компьютера (7). Очистка поверхности от частиц графита была проведена на той же установке (рис. 1б), при этом пластина графита была удалена из зоны обработки, а образец перевернут тыльной стороной вверх. Лазерное излучение фокусировалось на загрязненной стороне, на которую предварительно наносился тонкий слой дистиллированной воды для минимизации повреждений поверхности в процессе очистки [7].

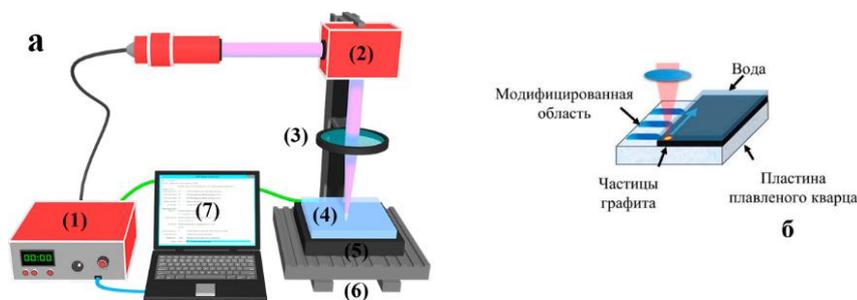


Рис. 1. а – экспериментальная установка формирования карт глубин и СФП; б – этап очистки пластины плавленного кварца от частиц графита

Геометрические характеристики сформированных образцов были исследованы на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Axio Imager A1* и на профилометре *Hommel Tester T8000*. Предварительное тестирование СФП выполнено на макете установки с использованием Nd: YAG лазера ($\lambda = 1064,57$ нм, CW, single frequency). Изготовленная дискретная случайная фазовая пластина была применена в схеме цветной лазерной маркировки с использованием Yb: волоконного лазера.

Основные достигнутые результаты

Исследование зависимости глубины записанных ячеек от параметров обработки проводилось с использованием метода профилометрии. Обработка информация о рельефе поверхности ячеек и режимах обработки была выполнена с помощью разработанной для этой цели программы *Profiles Manager* (рис. 2а), которая входит в ранее созданный комплекс ПО *LIVBH Pipeline*. На вход программе (рис. 2б) подавалось облако точек, описывающее поверхность имеющейся карты глубины, а также задавались параметры, при которых происходила эта запись.

Далее происходил этап анализа поверхности: из облака точек выделялись отдельные профили, которые служили исходными данными для дальнейшей фильтрации и обработки. Поверхность образца с записанной картой глубин не всегда была параллельна считывающему зонду, в некоторых случаях она имела изломы (рис. 2а), поэтому перед началом поиска ячеек проводилось исправление профиля с помощью вычитания из него верхней базовой линии. Была сделана собственная реализация поиска базовой линии, основанная на разложении профиля в ряд Фурье. После автоматического анализа профилей

выполнялась визуализация полученных данных и через интерфейс программы в них вручную вносились корректировки. Профиль был сохранен в формате базы данных (.ddb) и электронной таблицы (.xlsx) для последующего статистического анализа. Для этой цели было записано 15 карт глубин с различными режимами обработки на стекле марки КУ-1. Варьировались как режимы обработки, так и длительность импульса лазерного излучения, с которым происходила запись (Таблица). Полученные карты глубин были исследованы методом профилометрии и проанализированы с помощью ПО, описанного выше.

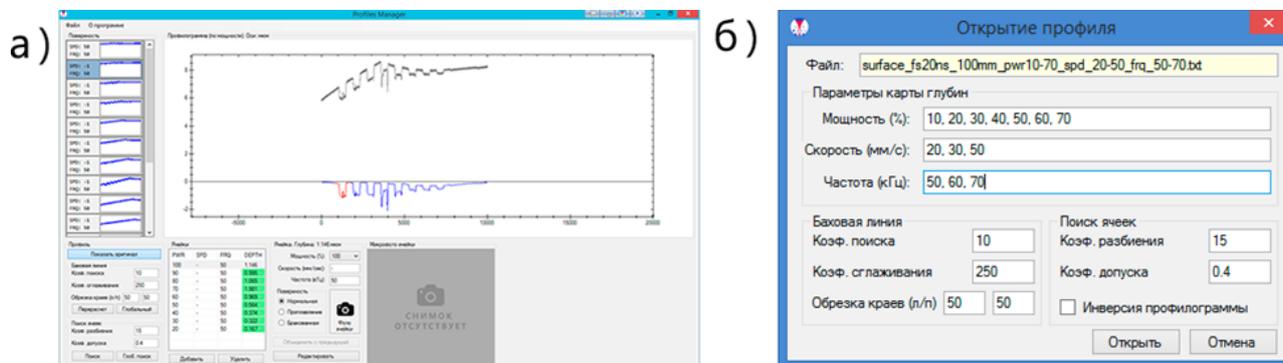


Рис. 2. а – интерфейс программы Profiles Manager. На графике отображены оригинальная (серая) и исправленная (синяя), а также профилограмма, с выбранной ячейкой (красная); б – окно открытия профилограмм

Таблица

Параметры записи карт глубины

Параметр	Значение									
Мощность, Вт	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Частота, кГц	20	30	40	50	60	70	80			
Скорость сканирования, мм/с	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Длительность импульса, нс		4	20	50	100					

Для проведения статистического анализа наиболее удобным было объединение скорости сканирования и частоты следования импульса в коэффициент перекрытия пучка по оси X по выражению [8]:

$$l_x = 1 - \frac{v}{d \cdot f} \quad (1)$$

где v – скорость сканирования, мм/с, d – диаметр пучка, мм, f – частота следования импульсов, Гц. Мощность излучения, длительность импульса и диаметр пучка в фокусе были переведены в плотность мощности лазерного излучения q_0 [9]:

$$q_0 = \frac{P_{\text{ср}}}{S \cdot f \cdot \tau} = \frac{P_{\text{ср}}}{0.25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot f \cdot \tau} \quad (2)$$

где q_0 – плотность мощности лазерного излучения, Вт/см²; $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность излучения, Вт; d – диаметр пучка, см; f – частота следования импульсов, кГц; τ – длительность импульса, нс.

Частота появления дефектов (рис. 3а) определялась как количество ячеек с проплавлением или браком к общему числу ячеек с данными параметрами. На диаграмме видно, что чем больше коэффициент перекрытия и меньше плотность мощности, тем меньше вероятность получить ячейку с дефектом. Обратная ситуация с относительной глубиной (рис. 3б). Здесь чем больше плотность мощности и коэффициент перекрытия, тем больше относительная глубина ячейки. Можно заключить, что наилучшей областью режимов

обработки для последующего формирования СФП является область с коэффициентом перекрытия более 97 % и плотностью мощности излучения менее $6 \cdot 10^7$ Вт/см².

Опираясь на принцип работы бинарной фазовой пластины и получаемые результаты [10, 11], был разработан новый шаблон фазовой пластины – дискретная фазовая пластина (ДСФП). Она подобна бинарной, состоит из ячеек, каждая из которых обеспечивает сдвиг фазы на произвольную величину, находящуюся в диапазоне от 0 до π или от π до 2π (рис. 4).

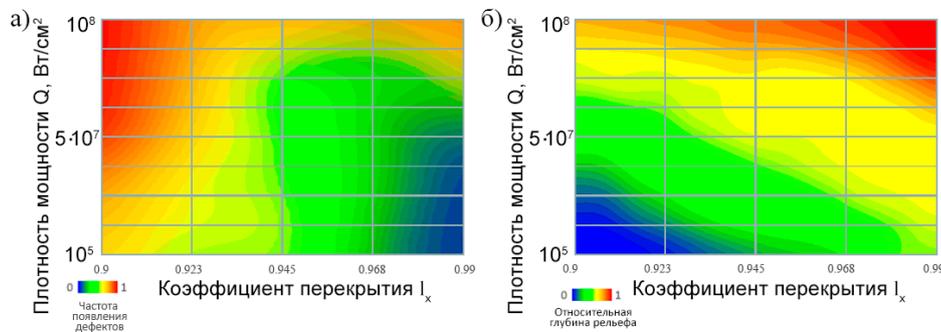


Рис. 3. Диаграммы: а – частота появления дефектов, б – относительная глубина рельефа

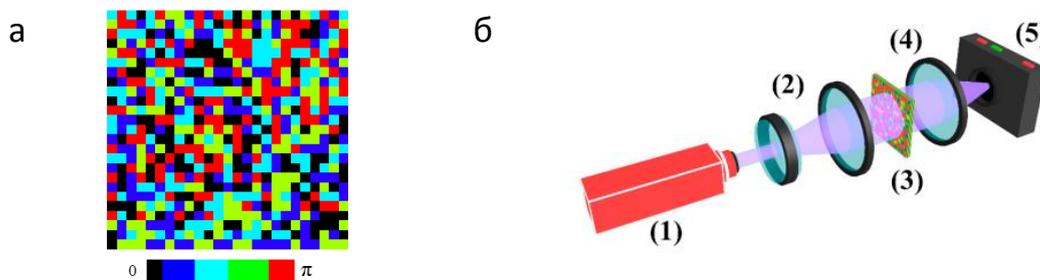


Рис. 4. а – дискретная случайная фазовая пластина с пятью уровнями фазового сдвига, б – установка для исследования случайных фазовых пластин

Формирование ДСФП было выполнено с помощью доработанного метода *LIBBH*. Нарботанная база глубин позволила создать ячейки с шагом по глубине порядка 150 нм в пределах от 0,15 до 8 мкм.

Первичное тестирование сформированных методом *LIBBH* случайных фазовых пластин было проведено на установке, оснащенной He-Ne лазером (рис. 4б). Пучок лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм, генерировался He-Ne лазером (1), расширялся телескопической системой (2), затем проходил через установленную СФП (3) и фокусировался собирающей Фурье-линзой (4) на матрице ПЗС-камеры (5).

Тестирование образцов было проведено по следующей схеме. Сначала регистрировалось исходное распределение интенсивности. Затем в расширенный пучок вводилась случайная фазовая пластина, и регистрация проводилась вновь. Наконец, чтобы проверить, как СФП исправляет искаженный пучок и формирует равномерное распределение, в исходный пучок вносились искажения и проводилась первичная регистрация распределения в фокусе собирающей линзы. Затем, как и в предыдущем случае, была внесена СФП и проведена регистрация распределения интенсивности. После окончания процедуры полученные данные обрабатывались для составления заключения о работоспособности фазовой пластины.

Образец ДСФП был записан на пластине плавленного кварца со следующими параметрами: размер элемента массива 200 мкм, длина волны излучения $\lambda = 0,633$ мкм. Чтобы упростить исследование такой пластины методом профилометрии, количество используемых сдвигов фаз было ограничено пятью: 0, $\pi/4$ (175 нм), $\pi/2$ (352 нм), $3\pi/4$ (528 нм), π (703 нм). Результаты анализа, выполненные под микроскопом в отраженном

свете, представлены на рис. 5а, а в линейно-поляризованном свете в скрещенных поляризаторе и анализаторе на рис. 5б.

Анализ микрофотографий в линейно-поляризованном свете в скрещенных поляризаторе и анализаторе показал, что термонапряжения и другие дефекты поверхности отсутствуют. Профилометрические данные подтвердили, что записанные глубины близки к проектируемым.

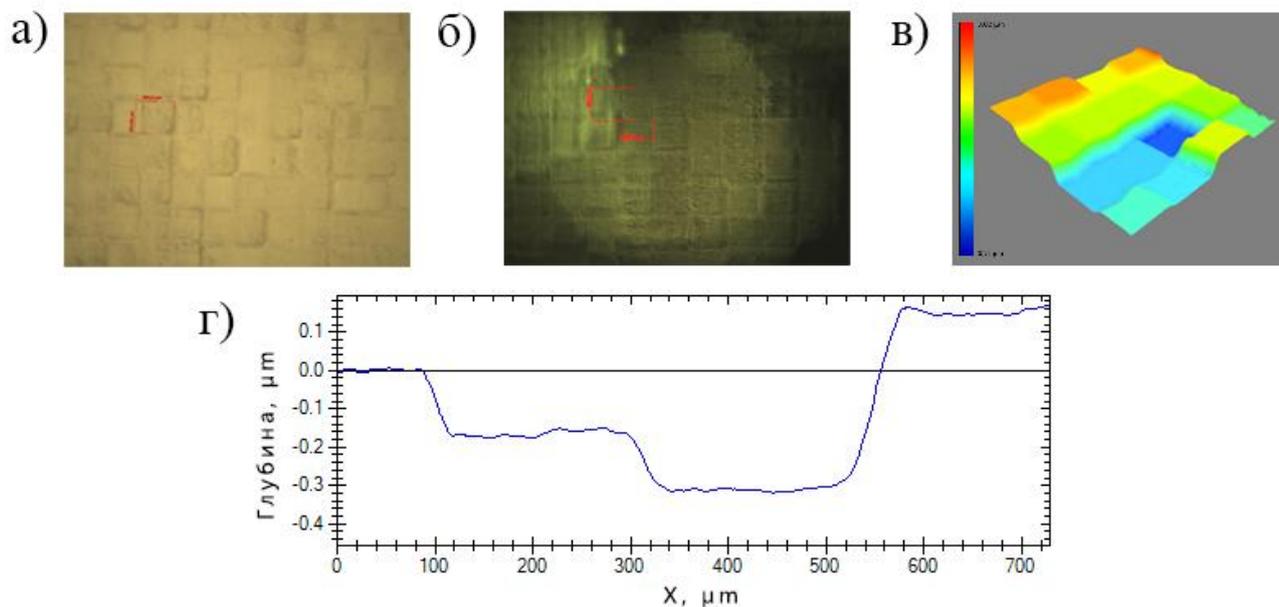


Рис. 5. Различные представления бинарной фазовой пластины. Микрофотографии: а – в отраженном свете; б – в скрещенных поляризаторах и анализаторе.

Профилометрические данные: в – топология поверхности;

г – профиль участка поверхности

Было проведено тестирование бинарной фазовой пластины по схеме, описанной выше. На рис. 6а представлено исходное распределение, а ниже – его профиль в фокальной плоскости собирающей линзы. На снимке видно, что пучок имеет квази-гауссово распределение. После введения в пучок БСФП следом за телескопической системой в фокальной плоскости, несмотря на случайное расположение ячеек, были зарегистрированы дифракционный узор и большое количество спеклов (рис. 6б). По профилю распределения интенсивности можно заключить, что центральный максимум был слабо разрушен.

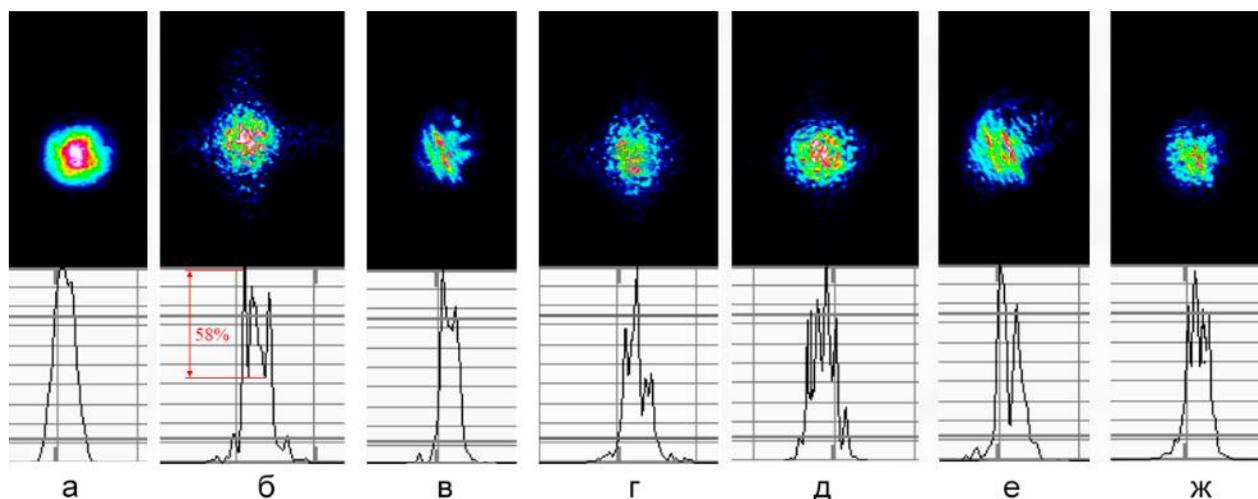


Рис. 6. а – исходное распределение; б – пучок с введенной БСФП; в – искаженный пучок;

г – искаженный пучок с введенной БСФП; д – пучок с введенной ДСФП;

е – искаженный пучок; ж – искаженный пучок с введенной ДСФП

Работоспособность данной СФП была также проверена с помощью исследования качества восстановления искаженного пучка (рис. 6в). После введения БСФП в искаженный пучок получено распределение, представленное на рис. 6г. Видно, что для искаженного пучка бинарная пластина перераспределила его интенсивность так, чтобы он имел более гладкое распределение. ДСФП была протестирована таким же образом, как и бинарная пластина. Введение исследуемого элемента показало результат близкий к БСФП, однако дифракционный узор был почти исключен, а средняя модуляция интенсивности составила 45 % (рис. 6д). Применение ДСФП для исправления искаженного пучка (рис. 6е) показывало, по сравнению с БСФП, лучшие результаты. Как видно из рис. 6ж, максимумы большинства пиков интенсивности находились на одном уровне, но центральный максимум не был разрушен. Однако данный элемент произвел такое распределение интенсивности, что центральный минимум искаженного пучка был убран, а относительное стандартное отклонение профиля пучка от профиля с равномерным распределением при введенном элементе составило 50 %.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что дискретная структура случайной фазовой пластины является более подходящей для получения равномерного распределения интенсивности, по сравнению с бинарной.

Области возможного использования результатов проекта

Одной из возможных областей применения технологии микроструктурирования поверхности стекла может быть производство случайных фазовых пластин для дальнейшего использования при лазерной обработке металлов силовыми пучками. Необходимость получения равномерного распределения важна во многих областях, например при формировании многоцветного изображения на поверхности металлов при их лазерном окислении [12]. Так как технология цветной лазерной маркировки реализуется с помощью лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм, то для нее была сформирована соответствующая ДСФП. Исследование ее работоспособности заключалось в сравнении двух цветных треков, полученных в процессе цветной лазерной маркировки без (рис. 7а) и с введенной СФП (рис. 7б).

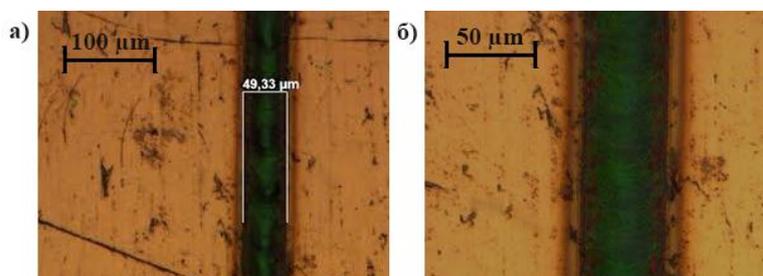


Рис. 7. Цветная лазерная маркировка: а – без использования ДСФП, б – с использованием ДСФП

Лазерная маркировка проводилась при одинаковых режимах обработки, позволяющих создавать линию зеленого оттенка. Из сравнения рис. 7а и рис. 7б видно, что без применения ДСФП желаемый зеленый оттенок фиксируется только в середине линии, в то время как во втором варианте он занимает более 90 % ширины линии, при этом колебания насыщенности цвета на ее протяжении уменьшились.

Заключение

Метод лазерно-индуцированной обработки стекла микроплазмой, применяемый для микрообработки поверхности плавленого кварца, был дополнен возможностью управления глубиной формируемых элементов в виде элементарных ячеек. Для этого предложена методика поиска оптимальных режимов записи микроструктур с заданной глубиной ячеек и разработано специальное программное обеспечение для обработки результатов.

Опираясь на полученные результаты, были записаны и протестированы СФП бинарной и дискретной структуры. Выявлено, что для получения равномерного распределения интенсивности по сечению пучка предпочтительнее использовать ДСФП. Управление глубиной формируемого рельефа является ключевым моментом при создании различных ДОЭ. Поэтому реализованное усовершенствование метода *LIBBH* при формировании СФП, требующее высокой точности при задании глубины, стало первым шагом к решению этой актуальной задачи, что в будущем позволит использовать данную технологию для записи на стекле более сложных и многоуровневых ДОЭ с фазовым преобразованием излучения.

Литература

1. *Yang C. et al.* A novel design method for continuous-phase plate // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. No 9. P. 11171–11180.
2. *Zapata-Rodriguez C.J., Caballero M.T.* Isotropic compensation of diffraction-driven angular dispersion // *Optics Letters*. 2007. Vol. 32. No 17. P. 2472–2474.
3. *Dixit S. et al.* Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control // *Optics Letters*. 1994. Vol. 19. No 6. P. 417–419.
4. *Wlodarczyk K.L. et al.* Laser smoothing of binary gratings and multilevel etched structures in fused silica // *Applied Optics*. 2010. Vol. 49. No 11. P. 1997–2005.
5. *Lewis C. et al.* Use of a random phase plate as a KrF laser beam homogenizer for thin film deposition applications // *Review of Scientific Instruments*. 1999. Vol. 70. No 4. P. 2116–2121.
6. *Zakoldaev R.A.* Laser-induced black-body heating (LIBBH) as a method for glass surface modification // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. 2015. Vol. 10. No 1. P. 15–19.
7. *Kruusing A.* Underwater and water-assisted laser processing: part 1 – general features, steam cleaning and shock processing // *Optics and Lasers in Engineering*. 2004. Vol. 41. No 2. P. 307–327.
8. *Chao H. et al.* Fabrication of microtransmittance grating using laser induced backside dry etching // *Journal of Laser Applications*. 2012. Vol. 24. No 1. P. 012001.
9. *Вейко В.П.* Технологические лазеры и лазерное излучение. СПб., 2007. – 52 с.
10. *Kato Y. et al.* Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression // *Physical Review Letters*. 1984. Vol. 53. No 11. P. 1057.
11. *Shealy D.L., Dickey F.M.* Laser beam shaping // *Optical Engineering*. 2003. Vol. 42. No 11. P. 3077–3079.
12. *Вейко В.П. и др.* Формирование многоцветного изображения на поверхности металлов при ее лазерном окислении // *Известия вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 2. С. 47–52.



Савченко-Новопавловская Софья Леонидовна
Факультет информационной безопасности и компьютерных технологий
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: novopalych@hotmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫХ АСПЕКТОВ ЗАЩИТЫ ВЕБСАЙТА КАК ОБЪЕКТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

С.Л. Савченко-Новопавловская

Научный руководитель – доцент Н.С. Кармановский

Представленный проект посвящен анализу актуальных проблем защиты интеллектуальной собственности в интернете и формированию рекомендаций по их устранению. Актуальность этого вопроса продолжает расти, поскольку современные правовые и технические средства защиты информации не являются достаточно эффективными для обеспечения максимальной безопасности объектов интеллектуальной собственности, размещенных в киберпространстве [1].

Цель проекта состоит в разработке рекомендаций по повышению эффективности использования технических и правовых средств защиты вебсайта как объекта интеллектуальной собственности.

В ходе достижения поставленной цели проекта решены следующие задачи:

- составлена актуальная характеристика вебсайта с позиции права актуальной собственности;
- приведен правовой анализ механизма применения технических средств защиты объектов интеллектуальной собственности;
- рассмотрены особенности защиты отдельных элементов вебсайта с использованием технических и правовых средств;
- разработан проект типовой политики безопасности для организаций, чья деятельность напрямую связана с использованием вебсайтов для внутреннего и внешнего использования;
- разработан проект методического пособия для инженеров информационной безопасности по вопросам правовой охраны объектов интеллектуальной собственности в интернете;
- составлена краткая характеристика расходов на использование технических средств защиты информации для каждого объекта интеллектуальной собственности вебсайта;
- сформирован технический проект информационной системы учета объектов интеллектуальной собственности, размещаемых на вебсайте.

При проведении исследования планируется:

- выполнить анализ норм права интеллектуальной собственности, действующего законодательства по вопросам защиты интеллектуальной собственности в интернете, а также различных технических средств защиты вебсайта в целом и отдельных его элементов в частности;
- создать классификацию технических и правовых средств защиты вебсайта как объекта интеллектуальной собственности;

– сравнить различные средства защиты вебсайта как объекта интеллектуальной собственности в целях определения достоинств и недостатков каждого, а также особенностей их взаимодействия друг с другом;

– синтезировать полученные результаты с целью формирования целостного подхода к повышению эффективности использования различных технических и правовых средств защиты вебсайта как объекта интеллектуальной собственности.

В первую очередь, результаты проекта направлены на повышение эффективности применения технических и правовых средств защиты вебсайта вне зависимости от его характера и предназначения.

Разрабатываемое в рамках соответствующего проекта документационное обеспечение системы защиты результатов интеллектуальной деятельности (РИД), размещаемых на вебсайте позволяет структурировать комплекс средств защиты и установить перечень правил их использования как при разработке сайта, так и при его дальнейшей эксплуатации.

Предложенные мероприятия по формированию организационно-правового механизма обеспечения функционирования системы защиты объектов интеллектуальной собственности, представленные на вебсайте, позволят повысить темпы развития электронной коммерции в России. Они также будут способствовать популяризации различных научных и образовательных электронных ресурсов за счет сокращения расходов и убытков, связанных с нарушением прав обладателей РИД, представленных на различных вебсайтах [2].

Система учета объектов интеллектуальной собственности, размещаемых на вебсайтах, позволяет упростить порядок сбора и передачи сведений о нарушителях прав на РИД в правоохранительные органы. В перспективе предлагается реализация системы сбора сведений о РИД, размещаемых в интернете и имеющих признаки плагиата, в рамках отделов «К» правоохранительных органов.

Заключение

Серьезным правовым пробелом в современном законодательстве является отсутствие четкой правовой регламентации вебсайта с позиции права интеллектуальной собственности, поэтому в рамках внутриорганизационных документов [3] (политики безопасности, договора авторского заказа, лицензионного соглашения) предлагается определять вебсайт, как комплексный объект интеллектуальной собственности, защита которого осуществляется путем обеспечения безопасности каждого составляющего его конкретного результата интеллектуальной деятельности [2].

Целесообразно продолжить разработку информационной системы учета объектов интеллектуальной собственности, размещаемых в интернете, которая позволит упростить работу с большими массивами данных, а именно: находить информацию о дате размещения конкретного РИД, документах, подтверждающих переход исключительного права на РИД, и другие значимые данные [4]. Использование такой системы поможет в процессе подачи заявлений о нарушении права на РИД в правоохранительные органы. В перспективе предлагается начать разработку информационной системы учета нарушений прав на РИД в интернете для правоохранительных органов.

Необходимо развивать теоретико-методологическую базу, которая позволит инженерам информационной безопасности, разработчикам ПО, сотрудникам отдела «К» упростить процесс изучения важнейших аспектов взаимодействия технических и организационно-правовых средств защиты результатов интеллектуальной деятельности в интернете. В рамках представленного проекта ведется работа над соответствующим методическим пособием.

Публикации

1. Савченко-Новопавловская С.Л. Международная защита авторского права в глобальной сети Интернет // Мониторинг правоприменения. 2012. № 2. С. 38–42.
2. Савченко-Новопавловская С.Л. Тенденции развития и проблемы участия Российской Федерации в межгосударственном рынке интеллектуальной собственности [Электронный

- ресурс] // XXVI Международные Плехановские чтения: сборник статей: в 3 т. Т. 3. М., 2013. URL: www.reu-iprg.ru/theses/26/14/290.doc (дата обращения: 30.01.2017).
3. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Использование сети Интернет для нелегального оборота наркотических средств, психотропных веществ и их аналогов // *Правовая информатика.* 2014. № 1. С. 46–48.
 4. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Роль информационной безопасности в развитии предпринимательской деятельности в сети Интернет // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы систематизации законодательства, информационного права и информационной безопасности». М., 2014. С. 428–431.
 5. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Правовая охрана веб-сайта как объекта авторского права // XXVIII Международные Плехановские чтения: сборник статей: в 3 т. Т. 3. М., 2015. С. 159–161.
 6. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Некоторые проблемы правовой охраны программы для ЭВМ и возможные пути их решения // *Правовая защита интеллектуальной собственности: проблемы теории и практики: сборник материалов III Международного IP форума.* М., 2015. С. 229–234.
 7. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Правовая модель обеспечения безопасности коммерческого веб-сайта, предназначенного для внешнего пользования // XXIX Международные Плехановские чтения: сборник статей: в 3 т. Т. 3. М., 2016. С. 155–157.
 8. *Савченко-Новопавловская С.Л., Гренишин А.В.* Формирование комплексного подхода к обеспечению защиты результатов интеллектуальной деятельности в сети Интернет // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем». СПб., 2016. С. 135–138.

Литература

1. *Китаёв Ю.А., Пак З.Ч.* Институт интеллектуальной собственности и его роль в экономическом развитии России // *Известия ОГАУ.* 2015. № 2 (52). С.205–208.
2. *Савченко-Новопавловская С.Л.* Правовая модель обеспечения безопасности коммерческого веб-сайта, предназначенного для внешнего пользования // XXIX Международные Плехановские чтения: сборник статей: в 3 т. Т. 3. М., 2016. С. 155–157.
3. *Саяхова Ю.К.* Информационная система учета объектов интеллектуальной собственности // *Альманах современной науки и образования.* 2012. № 4. С.192–194.
4. *Попеско А.И. и др.* Стоимостная оценка и правовая охрана интеллектуальной собственности // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2013. № 7. С.166–167.



Сеницин Алексей Николаевич
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра информационных технологий топливно-энергетического
комплекса
E-mail: lyubomirov85@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИАМИДА 6, НАПОЛНЕННОГО ФУЛЛЕРЕНОМ C60

А.Н. Сеницин

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

Цель работы – исследование диэлектрических и механических свойств полиамида 6, наполненного фуллереном C60, при помощи программно-цифровых методов обработки данных на основе формализма Гавриляка – Негами [1].

В ходе исследования были проведены масштабные работы по изготовлению образцов и измерению их физико-механических свойств и диэлектрических параметров, а также выполнен анализ полученных результатов. Результаты диэлектрических свойств были получены на *Novokontrol A (Alpha Analyzer)* в комплекте с *Quatro Temperature Control System*, обеспечивающей температурную стабильность образца до 0,1 °С. Диэлектрическую проницаемость измеряли в интервале температур от -150 до +200 °С с шагом 5 °С в интервале частот 10^{-2} – 10^6 Гц.

Исследование релаксационных параметров с использованием современной программно-математической обработки позволяет наиболее точно оценить характер движения молекулярных сегментов. При поддержке работников научной лаборатории Института высокомолекулярных соединений РАН (ИВС РАН) были исследованы образцы полиамида 6 с различным наполнением его наноразмерным фуллереном C60. Порошок вносили в полиамид 6 путем двукратного экструдирования на двухшнековом экструдере, за счет чего частицы фуллерена распределялись в полиамиде [1, 2].

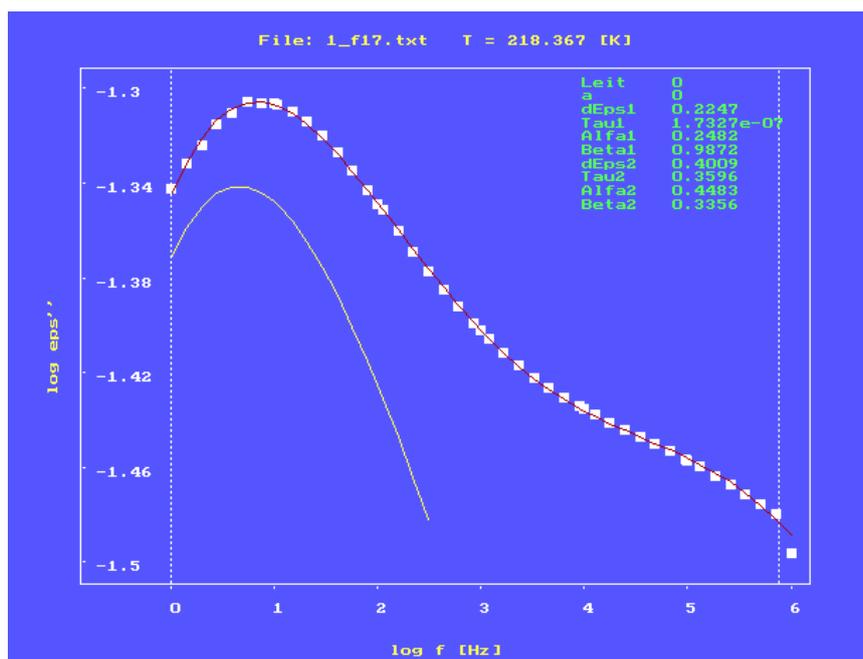


Рис. 1. Пример моделирования релаксационных процессов в программном пакете DOS Norton

Благодаря существующим методам обработки информации и известным методам анализа диэлектрических свойств полимерных материалов, был разработан программный алгоритм, позволивший точным образом определять численные параметры релаксационных процессов на основании формализма Гавриляка – Негами (рис. 1).

Результаты сравнивали с ранее полученными данными при помощи программного пакета *DOS Norton*. Новый программный алгоритм применялся в среде *MatCAD*, что позволило оценить его параметры не только численно, но и визуализировать в этой среде (рис. 2).

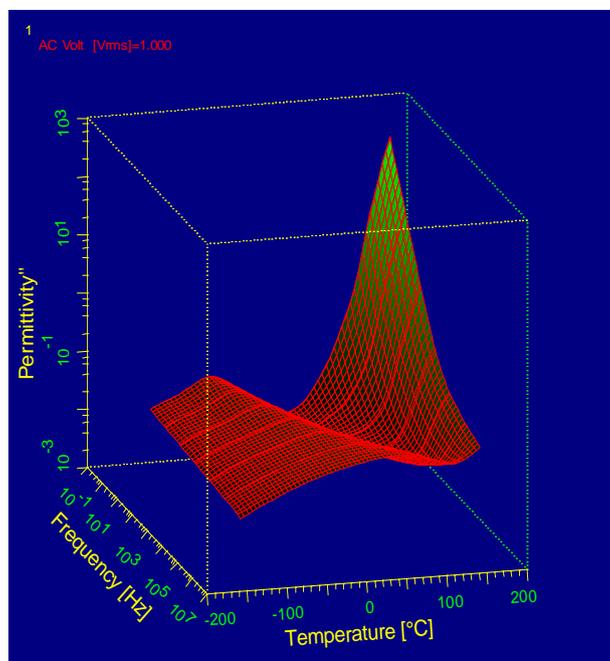


Рис. 2. Визуализация релаксационных процессов в диапазоне температур и частот

Масштабное исследование диэлектрических, механических и релаксационных свойств наномодифицированного полиамида 6 (РА6) позволило охарактеризовать эффект и поведение наночастиц фуллерена C60 в матрице жесткого полимера.

Заключение

Исследование методом диэлектрической спектроскопии позволило выявить три вида релаксационных переходов в полиамиде 6 и наноккомпозитах – γ и β (локальные), связанные с мелкомасштабным движением полимерных цепей, и α - процесс (кооперативный), связанный с сегментальным движением. При помощи программно-математической обработки полученных данных удалось рассчитать параметры выделенных релаксационных процессов и охарактеризовать движение сегментов цепи полиамида 6 [3]. Полный цикл измерения и обработки данных позволил глубоко понять методику эксперимента и разработать более совершенную программу для анализа данных. Интересным для промышленности результатом являются полученные при измерении физико-механических свойств показатели прочности и удлинения. Результаты исследования были представлены на международных конференциях и опубликованы в научных изданиях.

Публикации

1. *Sinitsin A.N., Zuev V.V.* Effect of fulleroid materials on the mechanical and tribological properties and dielectric relaxation of polyamide 6 nanocomposites // *Polymers for Advanced Technologies*. 2016 (in press).
2. *Sinitsin A.N., Zuev V.V.* Dielectric relaxation of fulleroid materials filled PA 6 composites and the study of its mechanical and tribological performance // *Materials Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 176. P. 152–160.

3. Синицин А.Н., Зуев В.В. Исследование методом широкополосной диэлектрической спектроскопии молекулярной подвижности в полимерных нанокompозитах на основе полиамида 6, наполненного фуллереновыми материалами [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2015. URL: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/1449/issledovanie__metodom_shirokopolosnoy_dielektricheskoy_spektroskopii_molekulyarnoy_podvizhnosti_v_polimernyh_nanokompozitah_na_osnove_polyamida_6,_napolnennogo_fullerenovymi_materialami.htm (дата обращения: 06.02.17).

Литература

1. Zuev V.V., Ivanova Y.G. Mechanical and electrical properties of polyamide-6-based nanocomposites reinforced by fulleroid fillers // Polymer Engineering and Science. 2012. Vol. 52. No 6. P. 1206–1211.
2. Zuev V.V., Shlikov A.V. Polyamide 12/ fullerene C60 composites: investigation on their mechanical and dielectric properties // Journal of Polymer Research. 2012. Vol. 19. No 8. P. 9925.
3. Pikhurov D.V., Zuev V.V. The effect of fullerene C60 on the mechanical and dielectric behaviour of epoxy resins at low loading // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2013. Vol. 4. No 6. P. 834–843.



Степаненко Анастасия Викторовна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра процессов и аппаратов пищевых производств
E-mail: aise7@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДНО-ЗЕРНОВЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ РЖИ

А.В. Степаненко

Научный руководитель – доцент Ю.Н. Гуляева

В настоящее время основными зерновыми культурами для производства этанола являются пшеница, рожь и ячмень. Ячмень как основное сырье для пивоваренной промышленности в основном закупается за рубежом из-за несоответствия отечественных сортов требованиям пивоваренных заводов. Тем не менее основным преимуществом отечественного ячменя в спиртовой промышленности как основного сырьевого материала является его относительно низкая цена (его стоимость на 30 % ниже стоимости пшеницы и ржи) и возможность возделывания данной зерновой культуры с высокими стабильными урожаями во всех климатических зонах России. На кафедре процессов и аппаратов пищевых производств ранее проводились исследования по реологическим характеристикам водно-зерновой суспензии на основе ячменного зерна. Более подробно этот процесс описан в работе А.В. Чеботарь [1]. В последнее время производители этанола все больше внимания уделяют такой зерновой культуре, как рожь, которая имеет ряд преимуществ перед другими злаками, в том числе более высокое содержание нативных ферментов амилолитического действия (α -амилаза). Сравнительный анализ химического состава зерновых культур, приведенный в Таблице, показывает, что рожь практически не уступает по своему углеводному составу другим распространенным зерновым культурам.

Таблица

Химический состав основных зерновых культур, содержание в 100 граммах

Продукт	Вода	Белки,	Жиры	Углеводы			Клетчатка
				Общие	Моно- и дисахариды	Крахмал	
Пшеница твердая	14,0	12,5	1,9	67,5	2,1	54,9	2,3
Рожь	14,0	9,9	1,6	70,9	3,5	54,0	1,9
Овес	13,5	10,1	4,7	57,8	1,2	36,1	10,7
Ячмень	14,0	11,5	2,0	65,8	3,6	50,1	4,3
Просо	13,5	11,2	3,8	60,7	2,5	54,7	7,9

Традиционные схемы обвязки технологических аппаратов между стадиями водно-тепловой ферментативной обработки (ВТФО) и брожения обычно представляют собой сложную систему трубопроводов с большим количеством запорной и регулирующей арматуры, а также установленных на этих магистралях насосов, предназначенных для перекачивания суслу из аппарата в аппарат [2]. Перекачиваемое сусло обычно имеет невысокую температуру и в большой степени подвергается микробиологическому загрязнению «дикими» микроорганизмами, особенно в случае, если системы мойки и дезинфекции на этом участке отсутствуют. Проблему можно решить, осуществляя процессы ВТФО и брожения в одном аппарате в определенной технологической последовательности. В этом случае подготовленное к брожению сусло фактически представляет собой стерилизованную среду, так как процесс ВТФО, характерный для низкотемпературного способа, проводится при температурах 80–95°С.

Процесс водно-тепловой ферментативной обработки зернового сырья (ВТФО ЗС) является одной из важнейших технологических стадий производства этанола из крахмалосодержащего сырья. От эффективности его проведения во многом зависит производительность спиртовых заводов и качество целевого продукта.

Основной целью данной стадии является перевод нативных углеводов, содержащихся в зерне в виде твердой фазы (крахмала), в водорастворимые углеводы (мальтозу), которые в дальнейшем на стадии брожения будут являться питательной средой для микроорганизмов, синтезирующих этанол в процессе метаболизма.

Процесс ВТФО ЗС сопровождается резким изменением физических и реодинамических свойств водно-зерновой суспензии, вызванных набуханием и клейстеризацией крахмалосодержащего сырья. Повышается его вязкость, что снижает текучесть суслу и приводит к увеличению нагрузок на приводы мешалок аппаратов и транспортирующие насосы, а также неустойчивость перекачивания массы по трубопроводам, что чревато возрастанием риска образования клейстеризованных заторов [3].

Целью данной работы является исследование коэффициента динамической вязкости различных сред и получение математических зависимостей для расчета коэффициента эффективной вязкости и плотности.

Объект исследования – водно-зерновая суспензия, полученная при смешивании определенных пропорций воды и измельченного ржаного зерна (гидромодуль). Измельченная рожь была получена путем дробления зерен ржи на молотковой дробилке РМ-120. Размер частиц составлял порядка 1,0 мм и менее при 100 % проходе через сито диаметром 1 мм. Физико-химические показатели помола ржи: крахмалистость – 34 %, влажность – 10,15 %.

При научно обоснованном планировании реологических исследований в инженерной реологии пищевых сред большое значение имеют общий обзор и классификация приборов и методов реометрии для выбора более подходящих для решения поставленных

практических задач. Широкое распространение в исследованиях пищевых продуктов получили следующие вискозиметры: ротационные, капиллярные, с падающим шариком.

Выбор вискозиметра *RHEOTESTRN 4.1 SE* был обусловлен достаточно широким диапазоном измерения вязкости материала, скоростей и напряжений сдвига, благодаря чему исследования можно проводить с помощью только одной измерительной системы. Он позволяет проводить ротационные измерения при заданной скорости среза (*CR*) и/или заданном напряжении сдвига (*CS*) с помощью измерительного двигателя с высокими динамическими характеристиками.

На рис. 1 представлена графическая зависимость, отражающая изменение эффективной вязкости водно-зерновых суспензий с различными гидромодулями в процессе их нагрева.

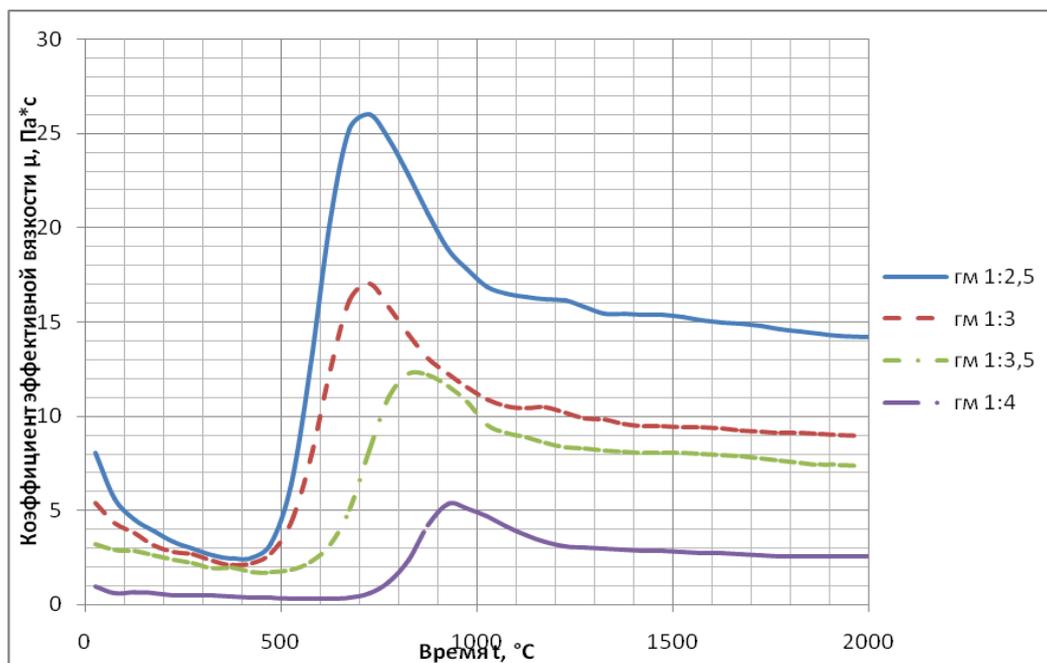


Рис. 1. Изменение коэффициента динамической вязкости суспензии при скорости сдвига $\gamma = 16,32 \text{ c}^{-1}$ для различных гидромодулей

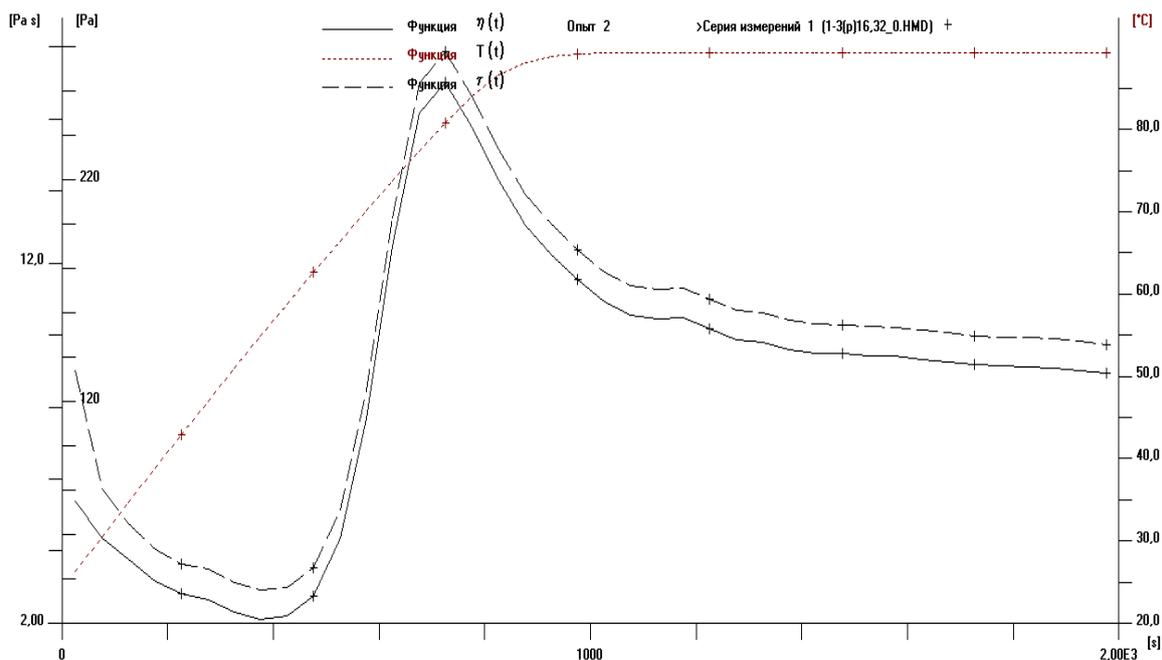


Рис. 2. Типовой график кривых вязкости суспензии на основе ржи

Учитывая общность кривых вязкости для всех исследованных гидромодулей (рис. 1), в процессе ВТФО ЗС целесообразно выделить четыре реперных значения, позволяющих его контролировать (рис. 3). Это начальная вязкость затора $\mu_{эфф1}$ при температуре складки, минимальное значение вязкости во второй зоне кривой течения $\mu_{эфф2}$, максимальное значение $\mu_{эфф3}$ в третьей зоне и $\mu_{эфф4}$ – значение вязкости при постоянной температуре выдержки. Значения этих коэффициентов различны и зависят от величины гидромодуля и скорости сдвига.

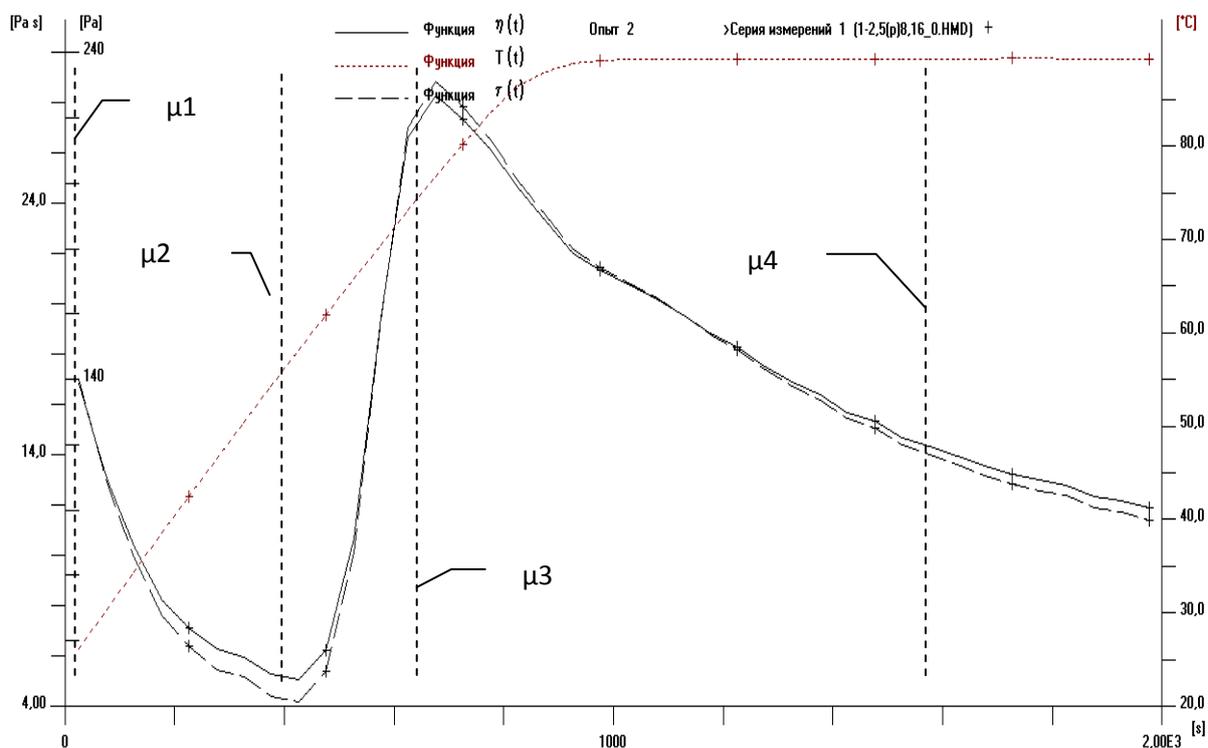


Рис. 3. Реперные значения

Анализируя полученные результаты, в процессе нагрева водно-зерновой суспензии из ячменя и ржи можно выделить несколько основных стадий (рис. 2):

- стадия I - нагрев водно-зерновой суспензии от температуры окружающей среды 20 °С до 50–60 °С. На этом этапе происходит снижение вязкости воды, проникновение части жидкой фазы в структуру зерна и частичное растворение водорастворимых сухих веществ;
- стадия II - дальнейший нагрев среды от 50–60 °С до 90 °С. При температуре 56–65 °С начинается процесс клейстеризации крахмала, который сопровождается сначала медленным, а затем резким повышением вязкости водно-зерновой суспензии. Дальнейший нагрев приводит к тому, что максимальное количество жидкой фазы переходит в связанное состояние (крахмальные гранулы связали необходимое количество воды). Однако на данной стадии, клеточная стенка крахмальных зерен не позволяет высвободить клейстеризованный крахмал, что сказывается на вязкости водно-зерновой суспензии в целом. Вязкость замеса практически достигает своего максимума, его низкая подвижность затрудняет дальнейшие стадии технологического процесса. Из графических зависимостей (рис. 1) видно, что наибольшую проблему представляют высококонцентрированные замесы с гидромодулями 1:3 и 1:2,5;
- стадия III - последующая выдержка среды при температуре 90 °С. Процесс клейстеризации окончен, начинается разжижение суспензии, которое сопровождается понижением вязкости.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирические зависимости для определения $\mu_{эфф}$ для различных гидромодулей и температур.

На основании приведенных данных можно утверждать, что суспензия является неньютоновской жидкостью с признаками псевдопластичности, поэтому для расчета гидравлических сопротивлений некорректно применять известные методики расчета. Полученные экспериментальные результаты можно применить для теоретического расчета гидравлических сопротивлений. В дальнейшем планируется проанализировать поведение водно-зерновой суспензии в трубопроводе и на основании полученных данных разработать реальную методику расчета гидравлических сопротивлений, которая поможет правильно подобрать насос, что скажется на экономии энергоресурсов и экономической эффективности предприятия в целом.

Публикации

1. *Степаненко А.В., Гуляева Ю.Н., Новоселов А.Г.* Исследование изменения физических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе ржаного зерна в процессе водно-тепловой их обработки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 3. С. 126–135.
2. *Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Чеботарь А.В., Степаненко А.В.* Рео- и гидродинамика зерновых суспензий // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»: материалы конференции. СПб., 2015. № 2. С. 50–54.
3. *Степаненко А.В., Гуляева Ю.Н., Новоселов А.Г.* Экспериментальное исследование физических характеристик водно-зерновых суспензий на основе ржи // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск, 2015. С. 278–282.

Литература

1. *Ибрагимов Т.С. и др.* Реологические характеристики зерновых суспензий в процессе механико-ферментативной обработки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2. С. 5–9.
2. *Новоселов А.Г. и др.* Характерные особенности изменения реологических свойств водно-зерновых суспензий в процессе водно-тепловой и ферментативной обработки (ВТФО) зернового сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 1. С. 30–32.
3. *Ибрагимов Т.С. и др.* Повышение эффективности производства спирта за счет проведения нескольких технологических стадий в одном аппарате. 2. Проведение механико-ферментативной обработки зернового сырья в КСИБА // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. № 1. С. 20–21



Тимофеева Эльвира Олеговна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: eo_timofeeva@niuitmo.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНТИОКСИДАНТНОГО СТАТУСА ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Э.О. Тимофеева

Научный руководитель – старший научный сотрудник А.Н. Чертов

Организм человека подвержен такому фактору окружающей среды, как радикальное окисление мембран клеток, которое способно провоцировать окислительный стресс организма. В явление оксидативного стресса вовлечены антиоксиданты, активные формы кислорода и другие радикалы. Антиоксиданты – основные защитники от разрушения тканей и органов радикалами и преждевременного старения организма. Но каждый антиоксидант имеет про-оксидантную природу, и этот факт следует иметь в виду для коррекции окислительно-восстановительного потенциала [1].

Существует много доступных методов для измерения степени разрушительного процесса окисления и доказательств его существования для каждой стадии развития. Общая классификация подходов, важных для ученых таких сфер, как токсикология и фармакология, содержит методики определения оксидативного стресса через измерение окислительно-восстановительного потенциала, количественное определение радикалов, маркеров окислительного разрушения, а также количественную оценку антиоксидантной защитной системы. Все эти методы служат определенным целям и могут быть классифицированы как прямые и косвенные подходы, которые имеют свои преимущества и недостатки, подробно описанные и распространенные в литературе [2, 3]. Но лишь непосредственный анализ антиоксидантной активности на основе комплекса факторов позволит диагностировать заболевания, связанные с повреждением структуры тканей, органов и наследственного материала, что является актуальным вопросом клинической диагностики.

Описание особенностей выполняемых исследований

Научный словарь содержит много понятий и статей, касающихся явления окислительного стресса и окислительно-восстановительного потенциала, но достаточно молодой возраст этих исследований до сих пор является одной из причин замешательства и сомнений в определениях и понятиях. Сегодня родственные определения окислительному стрессу и антиоксидантам должны изучаться как минимум с двух точек зрения: химической и биологической.

С химической точки зрения каждое вещество, которое может принять электроны, является окислителем. В противоположность этому агент, который отдает электроны – восстановитель. Когда восстановитель жертвует электроны другому веществу, это является причиной восстановления последнего вещества, и, очевидно, когда окислитель принимает электроны, это заставляет первое вещество становиться окисленным – такая реакция называется окислительно-восстановительной.

С биологической точки зрения восстановитель, действующий через пожертвование электронов, обычно жертвует протоном (водородом) или избавляется от кислорода. Окислительно-восстановительные реакции являются основой большого числа биохимического метаболизма и химических превращений в клетке, биосинтеза и регуляции:

они также важны для понимания биологического окисления и влияния радикалов и антиоксидантов.

В биологическом словаре для химических терминов «восстановитель» и «окислитель» есть соответственно такие определения, как «антиоксидант» и «про-оксидант». Производные от кислорода про-оксиданты могут разрушать такие биологические цели, как липиды, ДНК и протеины, но защитная система клетки, которая состоит из энзимов и аналогичных восстановителей, противостоит разрушению. В целом про-оксиданты относятся к активным формам кислорода (АФК), которые могут быть классифицированы на компоненты радикальной и нерадикальной природы. Присутствие неспаренного электрона приводит к высокой химической активности радикалов за счет их способности как отдавать, так и принимать электрон для достижения состояния стабильности. Но некоторые из агентов, не являющихся радикалами, чрезвычайно реакционноспособны, несмотря на то, что не являются радикалами по определению. Организм человека нуждается в контроле постоянного присутствия как про-оксидантов, так и антиоксидантов. Баланс между этими компонентами, называемый окислительно-восстановительным потенциалом, специфичен для каждого компонента биологической системы [4].

Этапы разработки методики и поставленные задачи

В процессе рассуждения над проблемой, которая требует комплексного решения, было решено найти уникальный метод измерения окислительно-восстановительного потенциала в организме человека, который может быть использован в клинической диагностике с последующим назначением лечения. Спектрометрический метод в видимом диапазоне длин волн на сегодняшний день находит применение в косвенных измерениях (например, для измерения спектров пропускания образцов, которые не несут непосредственной информации о самом образце). Существующие препятствия в лице таких прямых методов измерения, как спектроскопия рассеянного излучения, мешают внедрению спектрального анализа видимого диапазона. Но если использовать спектрометрический метод в видимом диапазоне длин волн для изучения биологических объектов с целью измерения иных оптических характеристик (например, флуоресценции), то можно получить один из точных методов в клинической диагностике. Поэтому была поставлена задача разработки поэтапного анализа антиоксидантов с последующей разработкой системы для измерения окислительно-восстановительного потенциала.

Для проведения предварительных исследований в качестве объектов были выбраны: реакция хемилюминесценции, протекающая по радикальному механизму; антиоксидант хлорофилл в тканях растений и его взаимодействие с УФ-излучением; растворы убихинона, антиоксиданта в клетках организма человека. Учитывая сложность биологической системы организма человека, объекты предварительных исследований были выбраны для наблюдения отдельных этапов существования антиоксидантов.

Для изучения оптических свойств радикального механизма реакции объектом первого этапа исследований была хемилюминесцентная реакция превращения люминола в 3-аминофталат. Измерение спектральных характеристик проводилось с помощью лабораторного оборудования фирмы *Ocean Optics*, а также среды графического программирования *LabVIEW*.

Для изучения природных источников антиоксидантов, используемых для лечения болезней иммунной системы, проводились исследования спектральных характеристик флуоресценции, вынужденной УФ-излучением, покровной ткани листьев растений. В этом опыте проводились измерения шума чувствительных элементов спектрометра и флуоресценции живого листа и листа, отделенного от растения.

Следующий этап экспериментальных исследований включал изучение изменения оптических характеристик антиоксиданта организма человека во времени в зависимости от условий хранения, растворителя и условий проведения эксперимента. Измерение

спектральных характеристик также проводились с помощью лабораторного оборудования фирмы *Ocean Optics* и среды графического программирования *LabVIEW*.

В результате обсуждения со специалистами в медицине и биохимии было решено изучать один из самых распространенных антиоксидантов – убихинон, называемый также коэнзим *q10*. Это один из антиоксидантов организма человека, вырабатываемый в митохондриях клетки и регулирующий ее энергетический метаболизм. Коэнзим известен как один из наиболее активных антиоксидантов организма человека, и одним из его достоинств является то, что организм принимает его лучше, чем искусственные антиоксиданты, но его высокая про-оксидантная активность уступает другим антиоксидантам, которые применяются для лечения окислительного стресса. Для данного исследования было важно изучить стабильность оптических характеристик коэнзима, так как он широко распространен среди фармацевтических препаратов, для лучшего контроля качества препаратов и внедрения этого метода для контроля других антиоксидантов. С помощью спектрометрического метода были проведены измерения оптической плотности растворов антиоксидантов, которые еще не исследовались таким методом. Результаты каждого из прошедших этапов проекта представлены в публикациях по итогам исследования [1–5], а последние результаты – изучение флуоресценции растворов, вызванной УФ-излучением, – представлены в данной работе.

Задачами данной работы является изучение влияния концентрации растворов убихинона на их флуоресценцию в зависимости от растворителя (масло, этиловый спирт).

Материалы и методы исследования

В фармацевтической промышленности название «коэнзим *q10*» широко распространено в форме биологически активной добавки, которая называется «средство от старения». Первое применение этого вещества для лечения сердечно-сосудистых заболеваний было осуществлено в 1965 году. Этот антиоксидант подтвердил свою эффективность в диетических добавках также, как и в качестве компонента косметических средств против старения.

Предварительные эксперименты с раствором убихинона (концентрация 5,0 ммоль/л) показали, что его флуоресценция имеет характерное спектральное распределение, которое зависит от растворителя [1, 3]. Далее было решено изучить поведение флуоресценции убихинона в зависимости от его концентрации. Объектами исследования являются растворы в масле и спирте с различными концентрациями убихинона (рис. 1, Таблица).

Таблица

Концентрации растворов убихинона

Номер раствора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концентрация, ммоль/л	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5



Рис. 1. Образцы растворов убихинона в масле в концентрациях (справа налево): 0,25 ммоль/л, 0,5 ммоль/л, 0,75 ммоль/л, 1,00 ммоль/л, 1,25 ммоль/л, 1,5 ммоль/л, 1,75 ммоль/л, 2,00 ммоль/л, 2,25 ммоль/л, 2,5 ммоль/л

Структурная схема макета опико-электронной системы (ОЭС) для изучения флуоресценции растворов представлена на рис. 2.

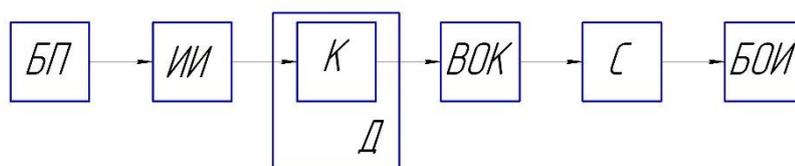


Рис. 2. Структурная схема макета ОЭС

Излучение источника УФ-диапазона (ИИ), работающего от блока питания (БП), подсвечивает объект анализа в кювете (К), закрепленный в держатель (Д). Излучение из волоконно-оптического кабеля (ВОК) регистрируется спектрометром (С). Данные с чувствительного элемента спектрометра попадают в блок обработки информации (БОИ) – персональный компьютер. ИИ закреплен с помощью пластикового держателя так, что его излучение полностью попадает на объект анализа, исключая ситуацию травмирования зрительного аппарата человека УФ-излучением. Фиксация остальных оптических элементов производится стандартными разъемами и не требует дополнительной настройки и юстировки. На рис. 3 показано крепление ИИ к держателю кюветы.



Рис. 3. Модификация установки для изучения флуоресценции.
УФ-источник излучения находится в желтом корпусе.

Измерения спектра флуоресценции объекта были произведены с помощью спектрометра модели *USB4000* фирмы *Ocean Optics*. Программное обеспечение для регистрации данных и обработки результатов эксперимента было создано на базе пакета программ *LabVIEW*.

Изучение поведения флуоресценции растворов убихинона

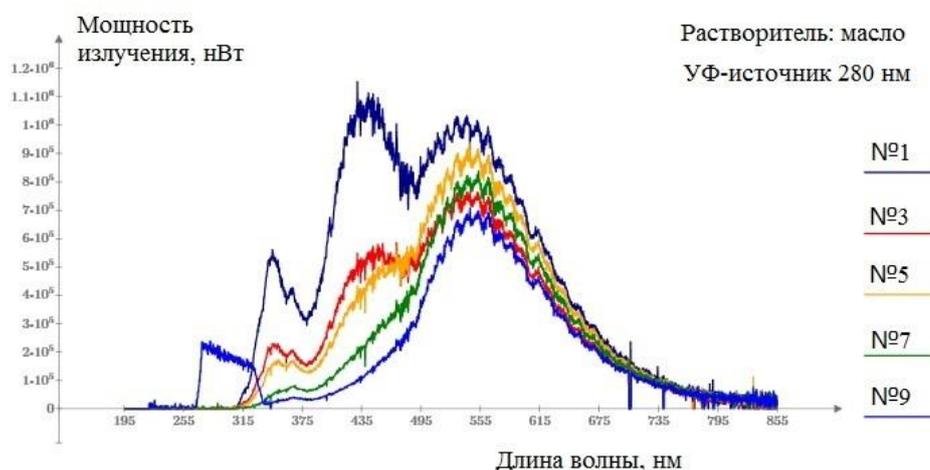
В процессе проведения эксперимента в качестве излучателей использовались источники УФ-излучения узкого спектрального диапазона с максимумами на 280 и 325 нм. Рис. 4, 5 иллюстрируют результаты облучения растворов убихинона УФ-излучением.

Как видно из представленных графиков, имеется несколько порядков флуоресценции и закономерная зависимость между концентрацией и излучением флуоресценции. На рис. 4, 5 показаны графики в наиболее важных масштабах. При изучении отдельных частей спектра можно увидеть несколько закономерностей между концентрацией раствора убихинона и интенсивностью флуоресценции или формой спектрального распределения, характерных для каждой из частей спектра.

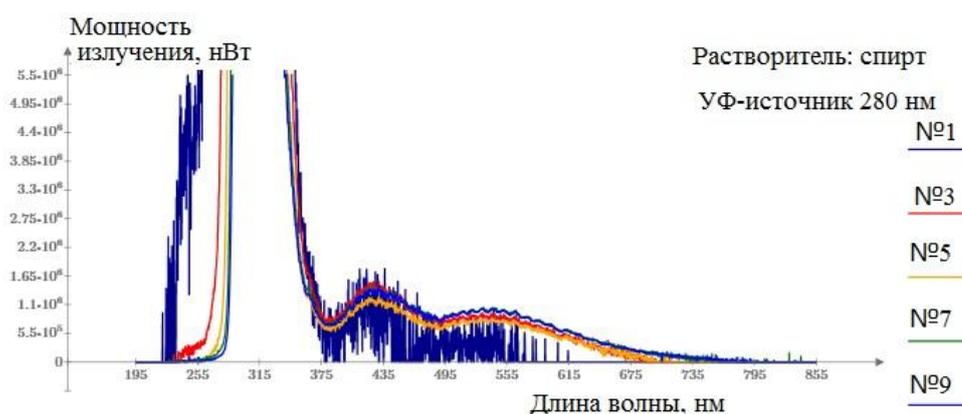
Флуоресценция растворов является важной частью исследования антиоксидантов, однако экспериментальное оборудование, предложенное в этой работе, нуждается в дальнейшей модификации. Необходимо устранить эффект накопления излучения

в растворе и погрешности измерения, вносимые приемником излучения во время продолжительного времени экспонирования. Кроме того, интенсивность флуоресценции спиртовых растворов слишком мала и должна быть измерена с помощью другого приемника излучения. В то же время результаты изучения флуоресценции в масле показывают достаточную точность для определения концентраций убихинона, сравнимых с теми, что присутствуют в организме человека.

Флуоресцентный метод широко распространен для контроля качества медицинских препаратов так же, как и техника, представленная в данной работе, после ее модификации.



а



б

Рис. 4. Интенсивность флуоресценции для растворов убихинона, вызванной УФ-источником излучения с максимумом на 280 нм: а – в масле, б – в спирте

Выводы

Результаты исследования флуоресценции растворов убихинона показали следующее:

- анализ спектрального состава флуоресценции растворов антиоксидантов различных концентраций может быть осуществлен с помощью спектрометра, но для изучения флуоресценции малой интенсивности экспериментальное оборудование необходимо модифицировать;
- флуоресцентный метод перспективен для применения в клинической диагностике оксидативного стресса на базе известных нормированных показателей антиоксидантной активности на ранней стадии заболевания;
- метод может быть применим в фармацевтической промышленности для контроля качества лекарств, содержащих коэнзим;
- проведение параллельных исследований с существующими методами биохимического анализа антиоксидантов поможет достичь лучшего понимания особенностей их поведения.

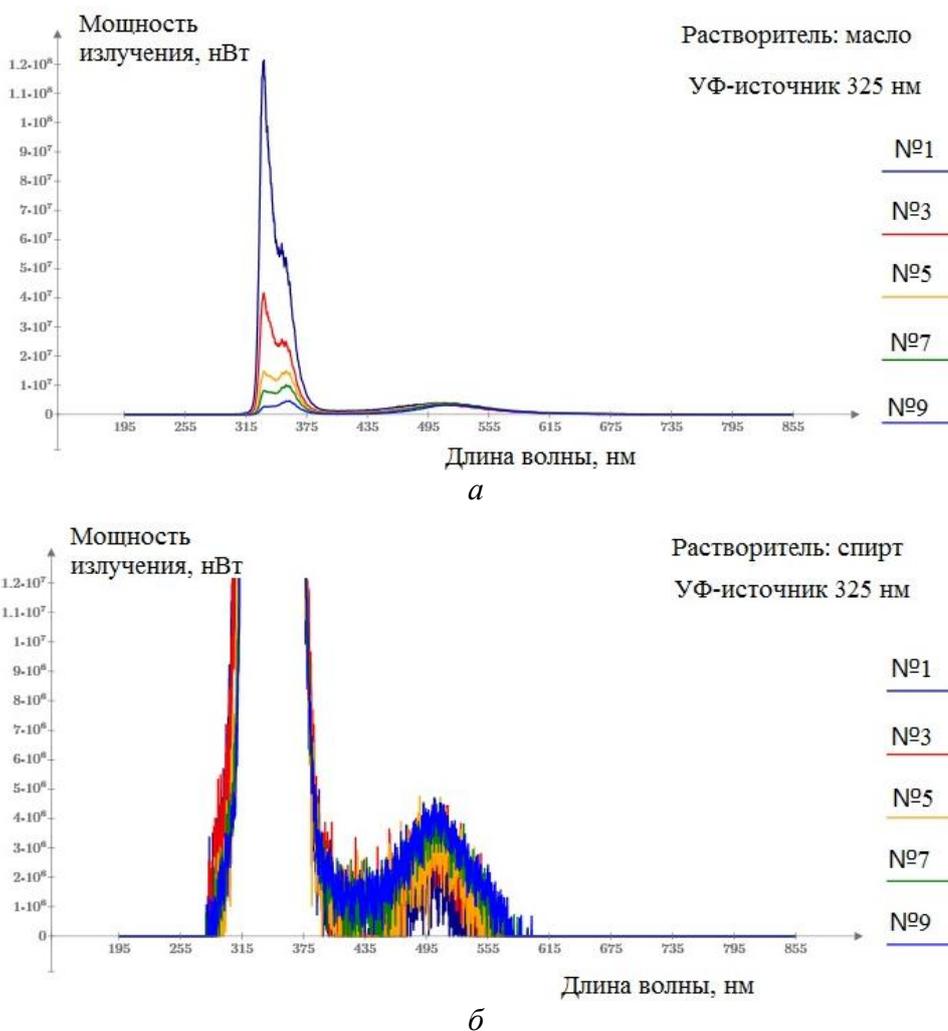


Рис. 5. Интенсивность флуоресценции для растворов убихинона, вызванной УФ-источником излучения с максимумом на 325 нм: а – в масле, б – в спирте

Публикации

1. *Timofeeva E.O., Gorbunova E.V., Korotaev V.V.* Research of spectral characteristics of ubiquinone solution and explore of the solvent effect on the experimental results // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9917. P. 99172I.
2. *Timofeeva E.O., Gorbunova E.V., Chertov A.N., Korotaev V.V.* An investigation of color stability and fluorescence behavior of ubiquinone solutions // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9887. P. 988733.
3. *Timofeeva E.O., Gorbunova E.V.* Possibility of determination of the level of antioxidants in human body using spectroscopic methods // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012035.
4. *Тимофеева Э.О.* Исследование возможностей определения антиоксидантного статуса организма человека спектральными методами // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015». СПб., 2015. С. 606–608.
5. *Тимофеева Э.О.* Результаты анализа стабильности цвета и особенностей флуоресценции растворов убихинона // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 5. СПб., 2016. С. 90–92.

Литература

1. Биохимия: учебник / под ред. Е.С. Северина. 2-е изд., испр. М., 2004. – 784 с.
2. *Sao G., Prior R.L.* Comparison of different analytical methods for assessing total antioxidant capacity of human serum // Clinical Chemistry. 1998. Vol. 44. No 6. P. 1309–1315.

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

3. *Llesuy S. et al.* Methodologies for evaluation of total antioxidant activities in complex mixtures. A critical review // *Biological Research*. 2001. Vol. 34. No 2. P. 51–73.
4. *Kohen R., Nyska A.* Oxidation of biological systems: oxidative stress phenomena, antioxidants, redox reactions, and methods for their quantification // *Toxicologic Pathology*. 2002. Vol. 30. No 6. P. 620–650.
5. *Шмидт В.* Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М., 2007. – 368 с.



Трушкина Анна Владимировна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: trushkens@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ПЛОЩАДКЕ МАТРИЧНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.В. Трушкина

Научный руководитель – доцент В.А. Рыжова

Матричные приемники оптического излучения (МПОИ) на сегодняшний день применяются практически во всех областях, имеющих дело с получением, обработкой или анализом изображения. К таким устройствам относятся, например, фотоаппаратура, системы безопасности, портативная и мобильная техника, а также измерительные [1] и наблюдательные [2] приборы для проведения научных исследований и промышленных применений. В измерительных системах в зависимости от требуемого быстродействия, стоимости, габаритов и других параметров возможно применение датчиков на основе КМОП- или ПЗС-структуры. В любом случае, какой бы тип датчика не был выбран, следует рассмотреть способы повышения качества измерений путем учета влияния случайных факторов. Часто при точных измерениях необходимо брать во внимание сложность структуры пикселя МПОИ. Так, одним из источников погрешностей являются микролинзы, располагающиеся на каждом пикселе [3]. Сама его многослойная структура и ее влияние на результат измерений практически не исследуется. Между тем в отдельных случаях, например при проведении измерений в поляризованном свете, этот фактор может вызывать ошибки измерений.

Известны исследования точности измерений, проводимых в поляризованном свете, для специальных видеокамер, содержащих поляризационную оптику [4]. Однако вопрос влияния ориентации МПОИ относительно падающего на него поляризованного излучения на распределение поляризационной чувствительности по его площадке на сегодняшний день не изучен, поэтому его важно исследовать.

Цели работы - изучение поляризационных свойств МПОИ и влияния изменения их пространственного положения в оптической схеме на инструментальную погрешность измерительных приборов.

В процессе работы над проектом был проведен анализ факторов, влияющих на качество измерений – шумов, геометрических параметров микролинз, ориентации поляризационных элементов при проведении измерений в поляризованном свете, а также способов их учета.

Были рассмотрены теоретические вопросы возникновения поляризационной чувствительности в МПОИ – влияние пропускания материалов и преломления излучения на границах раздела сред, составляющих структуру МПОИ, а также ориентация самого приемника относительно падающего на него линейно поляризованного излучения. Разработана модель пикселя МПОИ как оптической системы сложной структуры, составлены алгоритмы расчета поляризационной чувствительности МПОИ, освещаемого параллельным и непараллельным пучками, определены необходимые для этого данные. Разработана программа в среде *LabVIEW*, выполняющая расчет по этим алгоритмам.

Для верификации работы программы была разработана структурная схема экспериментальной установки (рис. 1) и выбраны ее компоненты: камера *VEC-545* с КМОП-сенсором *OV5620*; излучающие диоды: *BL-L324PGC* с максимумом излучения на длине волны $\lambda = 532$ нм и *L-132XIT* с максимумом излучения на длине волны $\lambda = 640$ нм; разработана конструкция крепления поляризационных элементов (ПЭ) и задания ориентации азимута линейно поляризованного излучения (ЛПИ). Проведен габаритно-энергетический расчет схемы с учетом измеренных с помощью спектрометра коэффициентов пропускания ПЭ, вычислен поток, попадающий на МПОИ, а также коэффициенты использования излучения паспортного и заданного (излучающий диод с $\lambda = 532$ нм) источников излучения (ИИ) глазом.

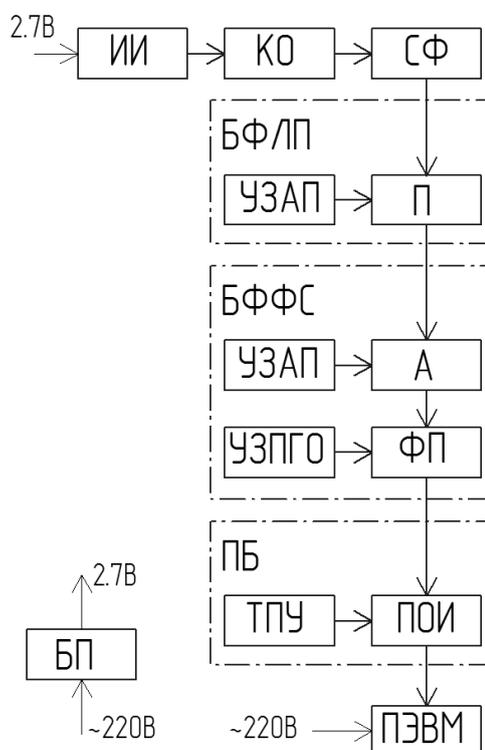


Рис. 1. Структурная схема установки: А – анализатор, БП – блок питания, БФЛП – блок формирования линейной поляризации, БФФС – блок формирования фазового сдвига, КО – коллиматорный объектив, П – поляризатор, ПБ – приемный блок, СФ – светофильтр, ТПУ – трехкоординатное поворотное устройство, УЗПГО – устройство задания положения главной оси, УЗАП – устройство задания азимута поляризации

Разработана методика постановки эксперимента, включающая два этапа: настройку и юстировку системы и собственно эксперимент. Составлены алгоритмы обработки видеоизображения. Разработаны две программы для обработки экспериментальных данных: в процессе проведения эксперимента (для анализа и сохранения данных об освещенности, создаваемой на МПОИ) и после него (для расчета параметров поляризации на основе полученных сохраненных данных).

Проведено экспериментальное исследование МПОИ в параллельном пучке для двух длин волн ($\lambda = 532$ (рис. 2а, 2б) и 640 нм (рис. 2в, 2г)), азимутов входного ЛПИ, измеряющихся от 0° до 90° с шагом 15° и углами падения на МПОИ $\varepsilon = 1^\circ$ (рис. 2а, 2в) и 3° (рис. 2б, 2г).

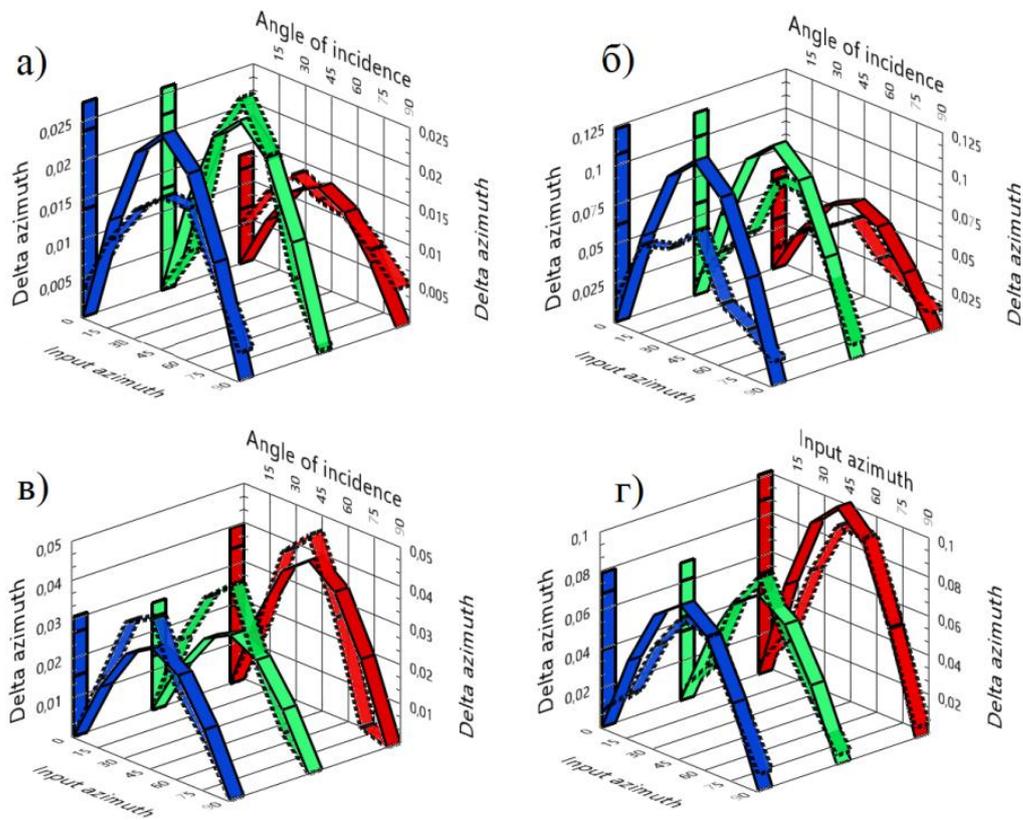


Рис. 2. Графики изменения выходного азимута излучения в зависимости от азимута входного излучения: а – $\lambda = 532$ нм, $\varepsilon = 1^\circ$; б – $\lambda = 532$ нм, $\varepsilon = 3^\circ$; в – $\lambda = 640$ нм, $\varepsilon = 1^\circ$; г – $\lambda = 640$ нм, $\varepsilon = 3^\circ$

Абсолютные значения $\Delta\alpha$, полученные с помощью эксперимента, коррелируют с соответствующими рассчитанными значениями.

На основе полученных экспериментальных данных составлены рекомендации по практическому использованию разработки при неинвазивных эллипсометрических исследованиях поляризационных свойств оптически неоднородных структур.

Заключение

Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы для метрологической аттестации ПЗС- или КМОП-детекторов с точки зрения поляризационной чувствительности, а также для учета влияния структуры фотоприемников на результаты измерений. Это позволит повысить точность измерений в поляризованном свете. В частности, разработка может использоваться при изучении распределения поляризационных свойств излучения, отраженного от объекта исследования или прошедшего через него, например, при неинвазивных эллипсометрических исследованиях поляризационных свойств оптически неоднородных, в том числе биологических, структур [5]. Такого рода исследования проводятся с помощью поляриметров, эллипсометров и холоэллипсометров [6], которые измеряют распределение поляризационных параметров по площади исследуемого объекта. Учитывая вклад матричного приемника в это распределение, можно получить результат влияния только объекта на состояние поляризации излучения и изучить, как оно изменяется в зависимости от состояния объекта.

Публикации

1. Трушкина А.В., Рыжова В.А. Разработка экспериментальной установки для исследования поляризационных свойств оптических систем // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2014». СПб., 2014. С. 170–173.
2. Трушкина А.В., Рыжова В.А. Исследование поляризационных свойств фазовых пластинок при их произвольной и изменяющейся ориентации в пространстве // Сборник трудов VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». СПб., 2014. С. 223.
3. Trushkina A.V., Ryzhova V.A., Korotaev V.V., Peretyagin V.S. Design of the model for researching of the appliances optical systems elements polarization properties // Optics InfoBase Conference Papers. 2014. Vol. LAOP. P. LTh4A.
4. Trushkina A.V., Ryzhova V.A., Korotaev V.V. Analysis of the effect anisotropic retards collimation turns on polarization and energy radiation parameters // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9446. P. 94464D.
5. Трушкина А.В., Рыжова В.А. Расчет поляризационной чувствительности матричных приемников оптического излучения // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015». СПб., 2015. С. 545–546.
6. Трушкина А.В., Рыжова В.А. Поляризационные методы в исследовании оптически неоднородных сред // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2015. С. 176–180.
7. Trushkina A.V., Ryzhova V.A., Denisov V.M., Korotaev V.V. Distribution of polarization sensitivity on the arbitrarily oriented matrix photodetectors // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9899. P. 98992G.
8. Trushkina A.V., Ryzhova V.A., Korotaev V.V. Calculation of polarization sensitivity of image sensors // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. P. 012045.

Литература

1. Teyssieux D. et al. MEMS in-plane motion/vibration measurement system based CCD camera // Measurement. 2011. Vol. 44. No 10. P. 2205–2216.
2. Nagarkar V.V. et al. CCD based high resolution non-destructive testing system for industrial applications // Applied Radiation and Isotopes. 1997. Vol. 48. No 10–12. P. 1459–1465.
3. Nam H. et al. The optimization of zero-spaced microlenses for 2.2um pixel CMOS image sensor // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6520. P. 652034.
4. Feng W. et al. The impact of signal–noise ratio on degree of linear polarization measurement // Optik: International Journal for Light and Electron Optics. 2013. Vol. 124. No 3. P. 192–194.
5. Tománek P. et al. Comparison of optical and electrical investigations of meat ageing // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8774. P. 87741L.
6. Али М., Кирьянов А.П. Лазерный холоэллипсометр рассеяния и отражения света одноосным двумерным кристаллом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2013. № 4. С. 38–52.



Тукмакова Анастасия Сергеевна
 Факультет холодильной, криогенной техники и кондиционирования
 Кафедра электронных и термических материалов
 E-mail: tukmashh@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА НАНОТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ

А.С. Тукмакова

Научный руководитель – доцент А.В. Новотельнова

Повышение эффективности термоэлектрических генераторных модулей преобразования энергии возможно за счет использования наноструктурированных неоднородных ветвей термоэлементов (составных и функционально-градиентных), увеличивающих значение термоэлектрической добротности материала [1–4]. Обработка неоднородных термоэлектрических материалов предполагает проведение процесса искрового плазменного спекания (ИПС) в градиентном температурном поле. Создание электрического контакта между матрицей пресс-формы и нижней графитовой вставкой приводит к увеличению перепада температур ΔT_z по вертикальной оси [5, 6]. Внесение дополнительного расширения основания матрицы пресс-формы также должно обеспечить дополнительный рост ΔT_z .

Задачей исследования является изучение факторов, способствующих формированию градиентного поля температур в образце в процессе ИПС, а именно:

- конфигурации образца;
- конфигурации оснастки;
- электрических и тепловых условий спекания на границе образец-оснастка.

Исследование проводится при помощи компьютерного моделирования методом конечных элементов [7]. Модель, схема которой представлена на рис.1, включает в себя токоведущие части установки (стальные электроды, графитовые вставки, пуансоны, матрицу пресс-формы и образец) и электрически изолированный корпус вакуумной камеры.

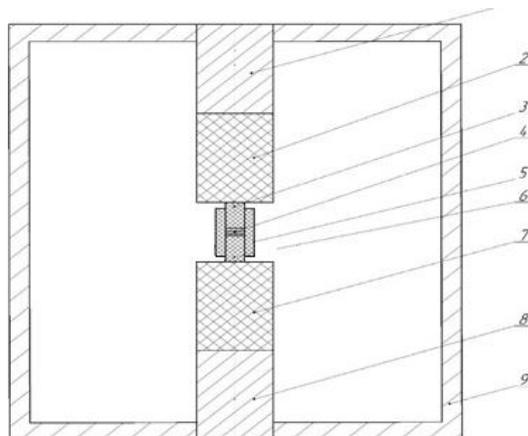


Рис. 1. Схема установки искрового плазменного спекания:

- 1 – верхний охлаждаемый электрод ($d_e = 80$ мм, $h_e = 60$ мм); 2, 7 – графитовые вставки ($d_g = 80$ мм, $h_g = 60$ мм); 3, 6 – верхний и нижний графитовые пуансоны ($d_p = 20$ мм, $h_p = 20$ мм); 4 – образец ($d = 20$ мм, $h = 21$ мм); 5 – матрица пресс-формы ($d_{int} = 40$ мм, $d_{ext} = 20$ мм, $h_d = 40$ мм); 8 – нижний охлаждаемый электрод ($d_e = 80$ мм, $h_e = 60$ мм), 9 – корпус вакуумной камеры

В процессе ИПС через верхний и нижний охлаждаемые водой электроды пропускается импульсный ток. Длительность импульса составляет 3,3 мс, скважность 2,2; за каждым пакетом из 12 импульсов следует два периода отключения тока.

В качестве исследуемого неоднородного материала выбран составной образец, содержащий три слоя: теллурида висмута, теллурида свинца и силицида магния. Исследование проведено при помощи компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Основными уравнениями задачи являются законы сохранения заряда и энергии, а также феноменологические законы Ома и Фурье для плотностей тока и потока тепла.

В модели приняты следующие граничные условия для тепловых величин: внешняя поверхность камеры имеет температуру, равную температуре окружающей среды 300 К, на нижнем и верхнем электродах для описания водяного охлаждения использовались условия конвективного теплообмена. Для описания радиационного теплообмена применялось уравнение Стефана – Больцмана. Для описания электрических полей в граничных условиях на верхнем электроде задавалось значение плотности постоянного тока, соответствующее эффективному значению импульсного тока, достаточного для достижения на нижней границе образца температуры, обеспечивающей спекание термоэлектрика.

Для исследованных термоэлектриков были выбраны следующие значения температуры: 730 К для теллурида висмута, 770 К для теллурида свинца и 910 К для станнида магния. Нижнему стальному электроду приписывался потенциал равный потенциалу земли.

Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных результатов на примере распределения температуры во времени (рис. 2).

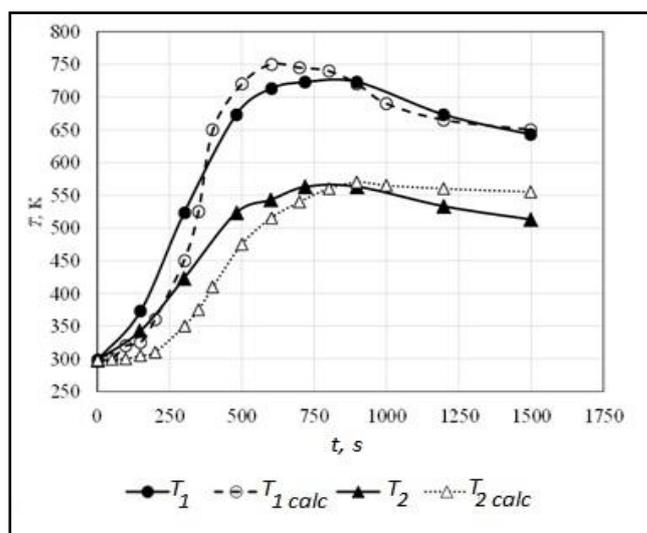


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей температуры от времени в процессе ИПС: T_1 и T_2 – значения температуры, снятые термопарами, помещенными в матрицу пресс-формы и нижнюю графитовую вставку соответственно; T_{1calc} и T_{2calc} – значения температуры, полученные расчетным путем в процессе компьютерного моделирования

Рассмотрены образцы различной конфигурации с изменяющимися значениями высоты h_s и диаметра d_s . Проведен ряд измерений возникающего в образцах температурного перепада вдоль вертикальной оси ΔT_z , полученные данные сведены к общей зависимости (рис. 3).

С целью определения влияния формы оснастки на формирование ΔT_z рассмотрены матрицы пресс-формы различной конфигурации (рис. 4). Матрица с прямоугольным профилем расширенного основания позволяет получить максимальное значение ΔT_z , достигающее 145 К.

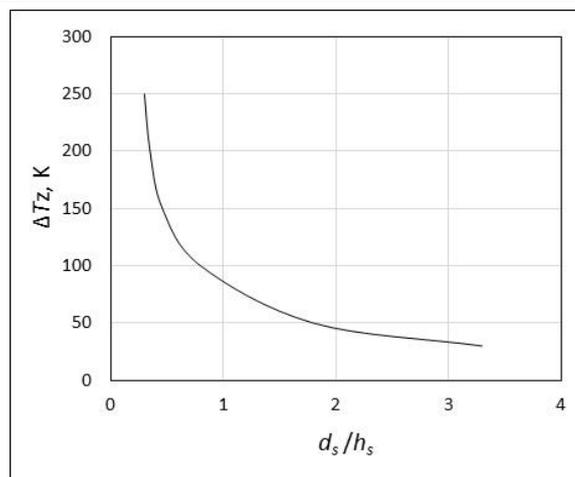


Рис. 3. Зависимость перепада температур от изменения соотношения диаметра образца к его высоте

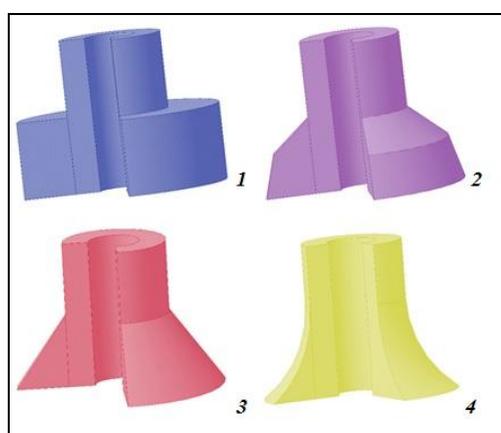


Рис. 4. Матрицы пресс-формы с расширенными основаниями различного профиля: 1 – прямоугольного, 2 – выпуклого, 3 – конического, 4 – вогнутого

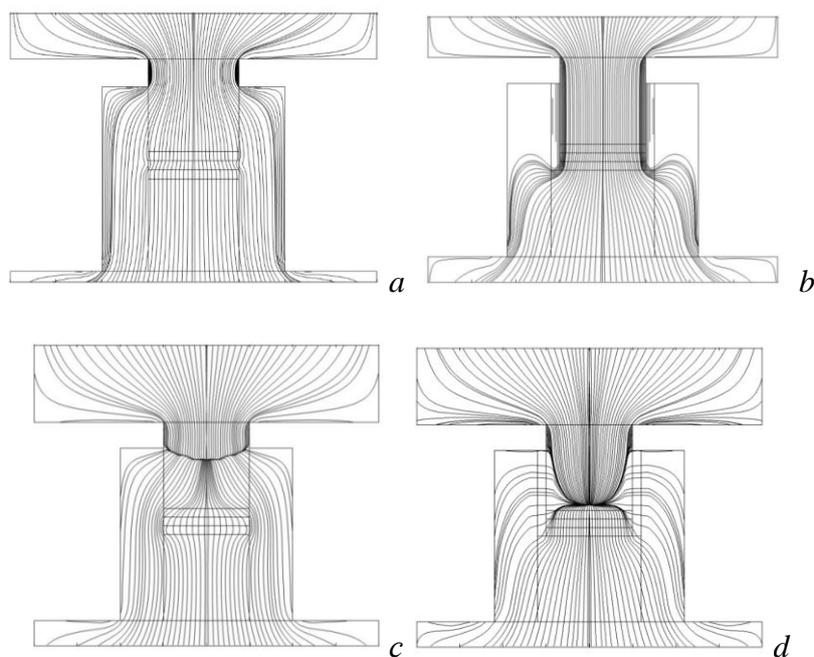


Рис. 5. Распределение линий: а, б – плотности тока; с, д – теплового потока при различных конфигурациях элементов установки: а, с – без диэлектрического слоя; б, д – с диэлектрическим слоем между матрицей пресс-формы, верхним пуансоном и образцом
Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Проведено изолирование образца и верхней части матрицы слоем диоксида кремния. Таким образом можно направить весь ток (или большую его часть) через верхнюю границу образца, которую необходимо нагреть до высокой температуры. На рис. 5 представлено распределение плотности тока и линий теплового потока для оснастки с использованием диэлектрического слоя и без него.

На рис. 6 представлена зависимость перепада температуры в вертикальном и радиальном направлениях в зависимости от толщины слоя диэлектрика.

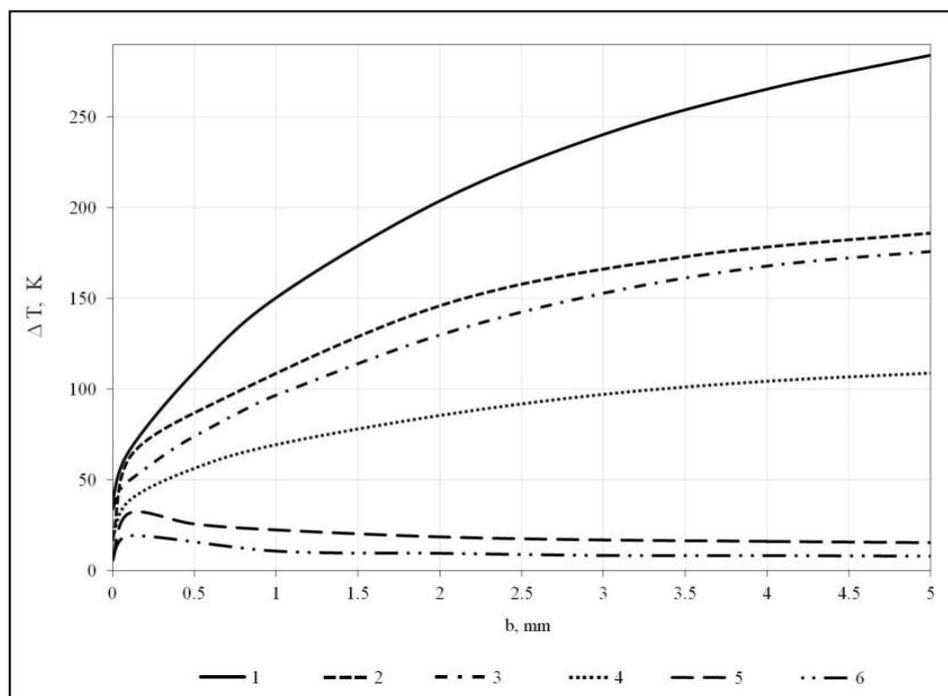


Рис. 6. Зависимости перепада температур от толщины изолирующего слоя: 1–4 – между верхней и нижней границами образца; 5, 6 – в радиальном направлении (максимальное значение)

Геометрические размеры спекаемых образцов: диаметр 15 мм (1, 2) и 20 мм (3, 4, 5, 6). Высота образцов $h_s = 3$ мм (2, 4, 6) и $h_s = 6$ мм (1, 3, 5).

Заключение

Создана компьютерная модель ИПС, позволяющая совершать расчеты, результаты которых коррелируют с результатами экспериментальной установки. Показано, что внесение матрицы пресс-формы с расширенным основанием позволяет увеличить ΔT_z . Максимального значения ΔT_z удастся достичь при использовании матрицы с прямоугольным профилем. Изменение геометрии образца влияет на распределение температурных полей, уменьшение соотношения d_s/h_s приводит к росту ΔT_z . Внесение слоя изоляции способствует увеличению значения ΔT_z , которое растет с увеличением толщины слоя.

Разработаны рекомендации к условиям искрового плазменного спекания неоднородных эффективных генераторных термоэлектрических материалов.

Публикации

1. Bulat L.P., Novotel'nova A.V., Asach A.V., Tukmakova A.S., Osvenskii V.B., Parchomenko Y.N., Zhao L., Zongrui Q. Simulation of thermal fields in SPS fabrication of segmented thermoelectric legs // Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. No 6. P. 2891–2894.
2. Bulat L.P., Novotel'nova A.V., Pshenai-Severin D.A., Osvenskii V., Sorokin A.I., Asach A.V., Tukmakova A.S. Temperature and current density distributions at spark plasma sintering of inhomogeneous samples // Technical Physics. 2016. Vol. 61. No 1. P. 68–75.

3. Булат Л.П., Новотельнова А.В., Пиенай-Северин Д.А., Освенский В.Б., Сорокин А.И., Асач А.В., Тукмакова А.С. Распределение температуры и плотности тока при искровом плазменном спекании неоднородных образцов // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 1. С. 70–77.
4. Булат Л.П., Новотельнова А.В., Тукмакова А.С., Ережес Д., Опря К.А. Формирование градиентного температурного поля в процессе искрового плазменного спекания термоэлектриков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 4 (20). С. 9–17.

Литература

1. Анатьчук Л.И., Вихор Л.Н. Функционально градиентные материалы для термоэлектричества // Термоэлектрики и их применения: доклады XIII Межгосударственного семинара. СПб. 2013. С. 434–439.
2. Rowe D.M. Thermoelectrics handbook: macro to nano. 2006. – 954 p.
3. Kuznetsov V.L., Edwards P.P. Functional materials for sustainable energy technologies: four case studies // ChemSusChem. 2010. Vol. 3. No 1. P. 44–58.
4. Yoon S. et al. Thermoelectric properties of *n*-type Bi₂Te₃/PbSe_{0.5}Te_{0.5} segmented thermoelectric material // Journal of Electronic Materials. 2014. Vol. 43. No 2. P. 414–418.
5. Guillon O. et al. Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments // Advanced Engineering Materials. 2014. Vol. 16. No 7. P. 830–849.
6. Булат Л.П. и др. О создании функционально-градиентных термоэлектриков методом искрового плазменного спекания // Письма в журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 21. С. 79–87.
7. Anselmi-Tamburinia U. et al. Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: II. Modeling of current and temperature distributions // Materials Science and Engineering: A. 2005. Vol. 394. No 1–2. P. 139–148.



Федотова Виктория Николаевна
Факультет технологического менеджмента и инноваций
Кафедра производственного менеджмента и трансфера технологий
E-mail: vika-1306@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ИННОВАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ДЕТСКОГО ТУРИЗМА

В.Н. Федотова

Научный руководитель – доцент С.А. Олехнович

Основная цель проекта – разработка комплексного инновационного подхода к решению проблем развития отечественного детского туризма. Исследование его состояния на настоящий момент выявило ряд проблем:

- неудовлетворительную безопасность детей во время туров;
- отсутствие профильных профессиональных кадров как в самой индустрии детского отдыха, так и в смежных отраслях;

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- игнорирование современных достижений науки туроператорами и отсутствие туристических продуктов, содержащих современные инновационные технические решения;
- низкий уровень охвата имеющихся достопримечательностей, музеев и природных объектов, представляющих интерес для детей, а также низкий уровень разнообразия предлагаемых туров;
- низкий уровень заботы о здоровье детей во время отдыха и недостаточная забота о заболевших детях;
- проблема с экологической ситуацией не только в мегаполисах, но и вокруг них, где зачастую организовываются детские туристические лагеря.

Такое положение дел складывалось на протяжении нескольких десятилетий, и их устранение не может быть сиюминутным. Оно требует комплексного всестороннего подхода. Предпринимаемые в настоящий момент действия способствуют лишь поддержанию индустрии, но не позволяют ей развиваться и перейти на качественно новый уровень. Точечное решение отдельных проблем не дает должного результата, в то время как затраты временных и материальных ресурсов на их реализацию значительны.

Современные условия жесткой конкуренции на туристском рынке, экономическая и политическая нестабильность во многих регионах, быстро растущие потребности и запросы туристов свидетельствуют о необходимости перехода на инновационный путь развития туристской отрасли. Проведенный анализ сферы детского туризма в Российской Федерации и сравнение с туризмом за рубежом, где достаточно высоки туристическая активность детей, качество и разнообразие предоставляемых услуг, подтверждают целесообразность перехода в отрасли на инновационные методы менеджмента.

На протяжении длительного времени туризм в России представляли только крупные государственные монополии. Внутренний туризм хоть не стремительно, но развивался, однако международный туризм был достаточно ограничен. Переход к рыночной экономике дал определенный толчок для развития туризма в Российской Федерации. Неотъемлемой его частью являются предприятия малого и среднего бизнеса.

Последние несколько десятилетий основная масса туров имели выездной характер. Способствовало этому как ограниченность выездов в советское время, так и целенаправленная работа туроператоров. С точки зрения экономики, наиболее выгодно развивать внутренний и въездной туризм.

Сложившиеся экономическая и политическая ситуации идеально подходят для развития туристической индустрии внутри страны и привлечения огромной массы въезжающих туристов. Это утверждение также верно для отрасли детского туризма. Индустрия отдыха способствует развитию множества отраслей экономики и является отличным катализатором для малого и среднего бизнесов.

Проводимые в настоящее время программы импортозамещения могут быть внедрены в туристическую отрасль. Россия обладает разнообразными климатическими, природными и культурными ресурсами, что позволяет организовать большое количество увлекательных и познавательных детских туров.

Характерными направлениями сферы детско-юношеского туризма являются: лечебно-оздоровительные туры, отдых, путешествия школьных групп внутри страны и за ее пределами с экскурсионными целями, образовательные туры за рубеж. Все большим спросом пользуются детские экскурсионные туры, основной изюминка которых – незабываемые маршруты, познавательность, интегрированность и патриотический уклон.

Детско-юношеский туризм является составляющей туризма в целом, что обуславливает общую проблематику развития, но не отменяет наличие специфических моментов, присущих только ему. Как и любая сфера услуг, он нуждается в потребителях. Благоприятная демографическая картина в стране, сложившаяся в результате внедрения федеральных программ, направленных на увеличение рождаемости, позволяет прогнозировать благоприятные перспективы для отрасли детского отдыха.

По данным Федеральной службы государственной статистики, общая численность населения России на конец 2015 года составляет – 146 267 тысяч человек. Из них моложе трудоспособного возраста – 25 689 тысяч человек (Таблица) [1].

Таблица

Распределение численности населения Российской Федерации по возрастным группам на 2015 год

Возраст (лет)	Численность населения по возрастным группам (тысяч человек)
Все население	146 267
до 1 года	1 930
1–4	7 332
5–9	8 004
10–14	7 126
14–16	1 297
в возрасте моложе трудоспособного	25 689

График изменения численности населения возрастной группы «моложе трудоспособного» на ближайшие 15 лет приведен на рис. 1.

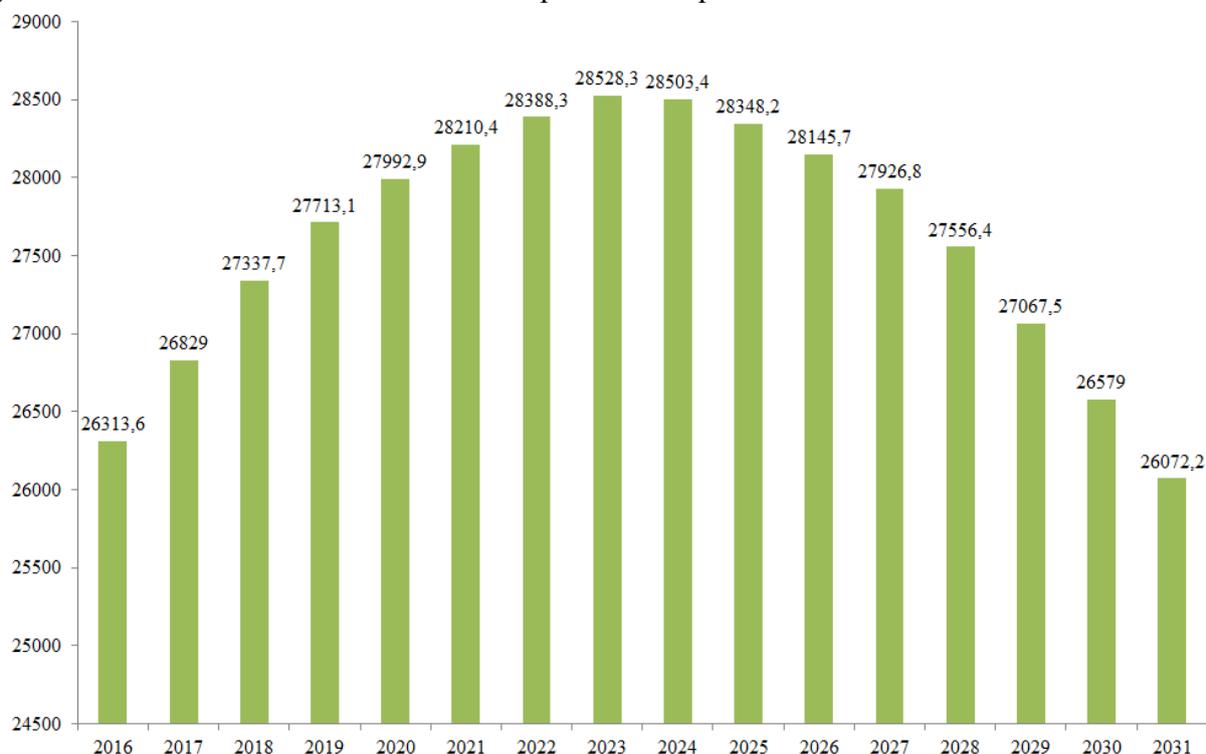


Рис. 1. Изменение численности населения возрастной группы «моложе трудоспособного»

В соответствии с представленными данными, наблюдается увеличение численности детей возрастной группы «моложе трудоспособного» до 2024 года и лишь с 2025 года – незначительный спад. Прогноз демографической обстановки в нашей стране показывает значительный рост численности потенциальных потребителей услуг детских туристических организаций, что должно оказать положительное влияние на конкуренцию в данном сегменте отрасли и способствовать ее развитию.

Благоприятная демографическая ситуация в стране является главным индикатором необходимости развития детского отдыха. Подрастающее поколение нуждается в качественном отдыхе, включающем обучение, оздоровление и развитие.

На пути инновационного развития отрасли остается проблема дефицита кадров. В настоящее время в нашей стране недостаточно людей, квалифицированных в области

внедрения инноваций, что приводит к нерациональному использованию имеющихся ресурсов. Мировой опыт наглядно демонстрирует необходимость наличия специалистов обладающих знаниями, навыками и опытом в области эффективного использования имеющейся ресурсной базы и качественного управления инновационной деятельностью.

Для инновационного развития важную роль играют не только люди, принимающие в нем непосредственное участие, но и те, кто связан с инновациями инфраструктурно (например, государственные служащие).

Для развития туризма необходимо внедрять новые идеи по реализации туристических продуктов и услуг. В этом процессе важную роль играют работники отрасли, которые, кроме выполнения своих должностных обязанностей, должны делиться опытом, общаться с клиентами и выявлять их потребности с целью последующего совершенствования предлагаемого турпродукта, делать выводы о необходимости оптимизации процессов, основываясь на собственных наблюдениях. Все это позволит рационально использовать достижения интеллектуальной деятельности человека и научно-технического прогресса в вопросе повышения эффективности труда и увеличении показателей качества и количества реализуемых товаров и услуг.

Современное состояние отечественной индустрии детского отдыха невозможно исправить изоляционным методом. Выход из сложившейся ситуации – в тесном сотрудничестве с другими отраслями хозяйствования. Взаимодействие нескольких отраслей экономики позволит получить более высокий результат и развить не только детский туризм, но и сферу перевозок, сельское хозяйство, производственную отрасль и т. д.

Инновационный подход включает комплексное решение имеющихся проблем, что будет способствовать привлечению новых потребителей в отрасль детского туризма. Такое решение позволит бизнесу в этой сфере активно развиваться и внедрять новые технологии, населению страны получать качественные услуги для своих детей, а на государственном уровне это приведет к появлению поколения здоровой, культурно и физически развитой, эрудированной молодежи.

Комплексное инновационное решение проблем отечественной индустрии детского отдыха включает три основных направления, которые выбраны исходя из имеющихся проблем в отрасли: экология, здоровье, технологии.

Проведенные исследования однозначно выявили пренебрежение не только оздоровлением отдыхающих детей, но и отсутствием должного ухода за ними, что приводит к ухудшению их здоровья зачастую в долгосрочной перспективе. Экологическое воспитание, можно сказать, не проводится ни в каком виде. Детей не обучают правильному поведению на природе, а туристические маршруты, как правило, повторяются. Техническая оснащенность современных туристических организаций, доступных широкому кругу потребителей, оставляет желать лучшего. Наблюдается устаревание имеющегося оборудования, повсеместная экономия на закупках и недостаточное количество технических средств, не соответствующее количеству обслуживаемых клиентов.

Реализация инновационного подхода должна проводиться совместно с программой по улучшению квалификации работников сферы туризма. Необходимо привлекать к работе профессионалов, поднимать престиж связанных с отраслью специальностей и внедрять соответствующую современным реалиям мотивационную программу.

Публикации

1. Акоюн М.Г., Олехнович С.А., Федотова В.Н. Анализ состояния и перспективы развития отрасли детского туризма в Российской Федерации // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2016. № 2. С. 120–127.
2. Федотова В.Н., Олехнович С.А. Разработка комплекса мероприятий для развития детского туризма в Российской Федерации // Вестник СамГУПС. 2016. № 3. С. 62–71.
3. Федотова В.Н., Олехнович С.А. Обзор инноваций в туристической отрасли // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Т. 2. СПб., 2016. С. 188–191.

4. Федотова В.Н., Олехнович С.А. Разработка комплекса мероприятий по развитию детского туризма в Российской Федерации // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 5. СПб., 2016. С. 145–146.
5. Олехнович С.А., Федотова В.Н. Социально-экономические проблемы развития детского туризма в Российской Федерации // Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2015. С. 231–233.
6. Федотова В.Н., Олехнович С.А. Анализ и обзор основных проблем импортозамещения в сфере туризма в РФ // Технологическая перспектива в рамках Евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста: материалы 1-й Международной конференции. СПб., 2015. С. 83–86.
7. Федотова В.Н., Олехнович С.А. Основные черты и характерные тенденции развития детского туризма в России // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2015. С. 197–199.
8. Федотова В.Н., Акоюн М.Г., Семенова Э.Н. Пути повышения конкурентоспособности национального сетевого гостиничного бизнеса на основании исследования отечественной и зарубежной индустрии гостеприимства // Теория и практика современной науки: материалы XVI Международной научно-практической конференции. М., 2014. С. 274–280.

Литература

1. Эффективность экономики России [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики [Официальный сайт]. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/efficiency/ (дата обращения: 15.04.16).



Ханжина Наталья Евгеньевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: nehanzhina@corp.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН

Н.Е. Ханжина

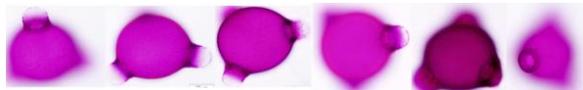
Научный руководитель – доцент А.А. Фильченков

Цель проекта – создать программное приложение для автоматического определения вида растения по фотоснимку его пыльцевого зерна. Это необходимо для автоматизации пыльцевого анализа.

Приложение должно принимать на вход фотографии, полученные с помощью оптического микроскопа, локализовывать на них пыльцевые зерна, а в качестве результата генерировать отчет о ботаническом процентном соотношении распознанных видов растений. Исходя из этого, распознавание включает в себя три основных задачи: предварительная обработка изображения, классификация пыльцевых зерен и подсчет. В свою очередь, предобработка состоит из устранения шума, бинаризации и извлечения.

Таблица 1

Примеры изображений разных видов растений из набора данных

№	Виды	Примеры изображений	Количество изображений
1	<i>Trifolium hybridum</i>		200
2	<i>Archangelica officinalis</i>		200
3	<i>Dianthus deltoides</i>		199
4	<i>Fagopyrum esculentum</i>		200
5	<i>Chamerion angustifolium</i>		198
6	<i>Angelica sylvestris</i>		110
7	<i>Bunias orientalis</i>		198
8	<i>Salix alba</i>		199
9	<i>Tilia cordata</i>		60

Сложность классификации видов растений определяется в первую очередь многообразием форм, размеров, направлений их пыльцевых зерен, а также фокусов микроскопа. Пыльца разных родов растений часто имеет схожую округлую форму, а отличить пыльцевые зерна одного рода, но различных видов (например, дудник лекарственный и дудник лесной, вторая и шестая строки Табл. 1 соответственно) нередко тяжело даже для опытного палинолога. В Табл. 1 приведены примеры изображений видов растений, использованных в данном исследовании. Они были получены с помощью оптического микроскопа *Olympus BX51* с системой визуализации *Olympus DP71*.

Рассмотрим предварительную обработку. Ее цель – получить отдельные изображения, каждое из которых содержит ровно одно пыльцевое зерно. В исследовании к первоначальным изображениям применялся следующий алгоритм предобработки:

- уменьшение шума, в том числе с помощью размытия по Гауссу, дилатации, эрозии;
- бинаризация изображения с нижним порогом по насыщенности и с двойным – по тону, что дает лучший результат на изображениях с бликом и градиентом, чем адаптивная бинаризация;
- извлечение пыльцевых зерен, а именно локализация их на изображении и сегментация по водоразделам (*Watershed* – метод выращивания регионов) с элементом эвристики. Метод показал лучший результат для изображений со слившимися объектами среди методов, основанных как на поиске краев, так и на выращивании регионов, а также на их комбинации.

Схематично локализация и сегментация представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Пример алгоритма предобработки приведен на рис. 3.



Рис. 1. Локализация пыльцевых зерен

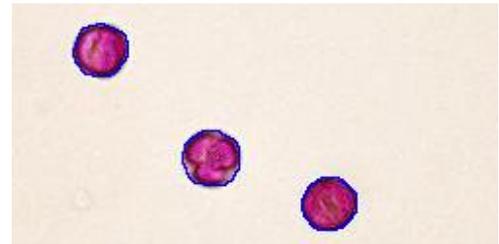


Рис. 2. Сегментация пыльцевых зерен

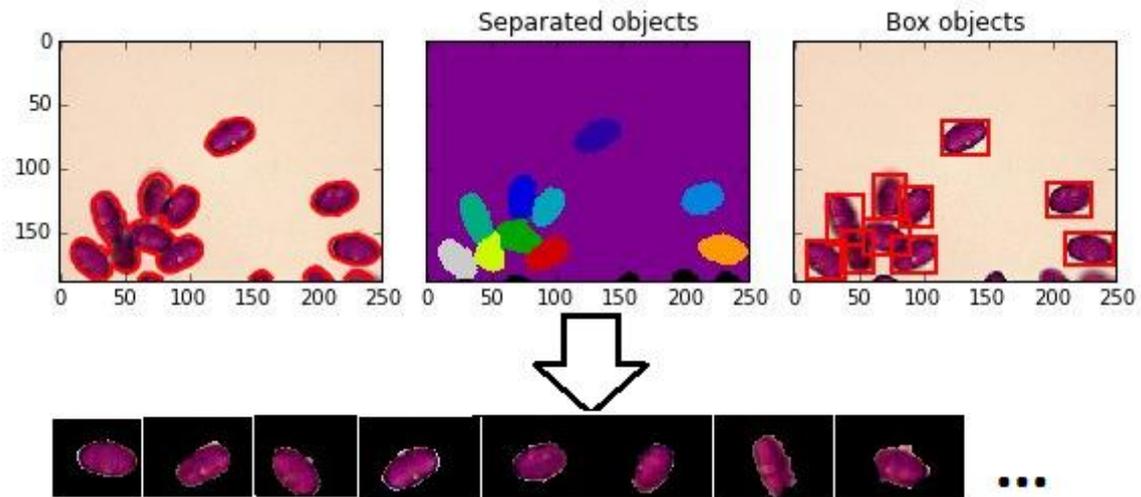


Рис. 3. Пример работы алгоритма предобработки

Точность сегментации на полном наборе данных (девять видов растений) составляет 87,1 %.

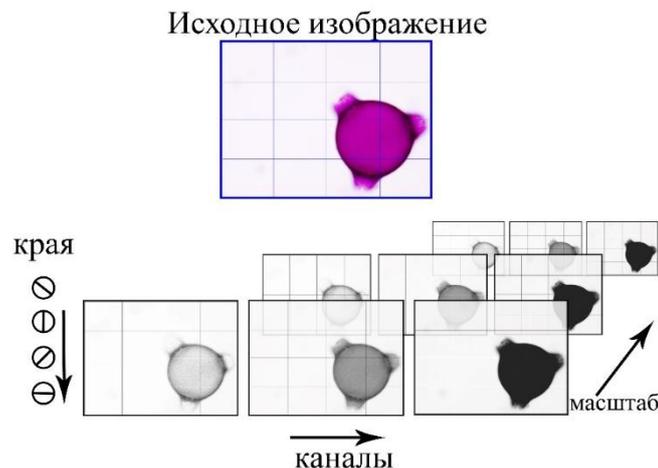


Рис. 4. Схема использования GIST-дескрипторов

В качестве базового метода исследования была использована классификация на основе GIST-дескрипторов. GIST – низкоуровневое представление сцены, основная идея которого состоит в разделении изображения на равные части и подсчете гистограммы распределения краев по каждой из них [1, 2]. GIST универсален для данной задачи. По каждому изображению было получено 960 дескрипторов GIST (на трех масштабах, по каждому каналу цвета в отдельности, по четырем или восьми направлениям края (рис. 4)).

К полученным признакам для уменьшения размерности [3] были применены следующие методы машинного обучения: ReliefF (выделено 300 признаков от начального

количества), *Principal Component Analysis* (95 % признаков от начальных), *Mutual Information* (300 признаков). К отобранному набору признаков применены следующие методы классификации [3]: логистическая регрессия (*LR*), *k* ближайших соседей (*kNN*), метод опорных векторов (*SVM*), деревья решений (*DS*), случайный лес (*RF*), метод градиентного бустинга (*GB*).

Рассмотрены два вида наборов данных: сокращенный набор данных медоносных растений (пять видов по 200 фото в каждом, чья форма различна и наиболее репрезентативна – верхние пять строк Табл. 1), полный набор (девять видов, включая те, чья форма схожа). Для экспериментов использовалась десятикратная кросс-валидация.

На сегментированном наборе данных из пяти видов лучший результат дал метод *SVM* (98,3 % точности) в сочетании с *MI*. На необработанном наборе получен результат 85,6 % методом *RF* в сочетании с *ReliefF*. На сегментированном полном наборе данных лучший результат дал *SVM* (95,2 % точности) в сочетании с *PCA*. На необработанном полном наборе данных получен результат 78,5 % методом *RF* на полном числе признаков. Таким образом, лучшую точность дают предварительно сегментированные изображения. Лучший результат (98 % точности) получен методом *SVM* с полиномиальным ядром.

Данные результаты превосходят результаты других исследователей, полученные на таком же или меньшем числе классов, что подчеркивает преимущество от отказа выбора узконаправленных признаков объектов. Эта идея лежит также в основе следующего метода классификации – сверточной нейросети.

Эта нейросеть обладает обобщающим свойством, благодаря таким концепциям, как разделяемые веса, локальное восприятие и субдискретизация. Ее характеризуют сравнительно небольшое число настраиваемых параметров и сохранение топологии изображения. Нейросеть ищет инварианты на изображении путем его свертки и настройки группы весов, которые и определяют высокоабстрактные признаки объектов. Именно отказ от ручной инженерии признаков в пользу автоматизированного, а также построение иерархии признаков, является ее основным достоинством.

Сверточная нейронная сеть включает в себя три типа слоев: сверточные, субдискретизирующие и полносвязные [4, 5]. Подобранная архитектура нейросети, представленная на рис. 5, имеет следующую структуру: помимо входного, полносвязного и выходного слоев (функция активации – *softmax*) имеется три сверточных, первый из которых имеет шесть наборов весов (карт признаков) с ядром свертки размером 7x7, второй – 16 наборов с ядром 5x5, третий – 32 с ядром 5x5, активационная функция – сигмоида. Кроме того, перед полносвязными слоями применяется техника *dropout*.

Так как нейросеть применялась к необработанному набору данных, сравним полученные с помощью нее результаты с результатами базового метода на необработанных изображениях (Табл. 2).

Таблица 2

Сравнение методов на основе точности распознавания

Набор данных	Базовый метод	Сверточная нейросеть
Сокращенный (пять видов)	85,6 %	99,7 %
Полный (девять видов)	78,5 %	96,3 %

Таким образом, применение нейросети позволило значительно улучшить точность распознавания, при этом полностью исключая из процесса этап предобработки.

Результаты применения *GIST*-дескрипторов и классических методов приведены в статье [6]. Подготовлена статья по результатам применения сверточной нейросети.

Распознавание пыльцевых зерен относится к области палинологии и составляет самую трудоемкую часть пыльцевого анализа, который применяется в таких задачах, как проверка качества воздуха, криминалистика, палеонтология, проверка качества меда и других. При этом успешное решение этих задач зачастую требует такой скорости пыльцевого анализа, которую невозможно обеспечить вручную [7–9].

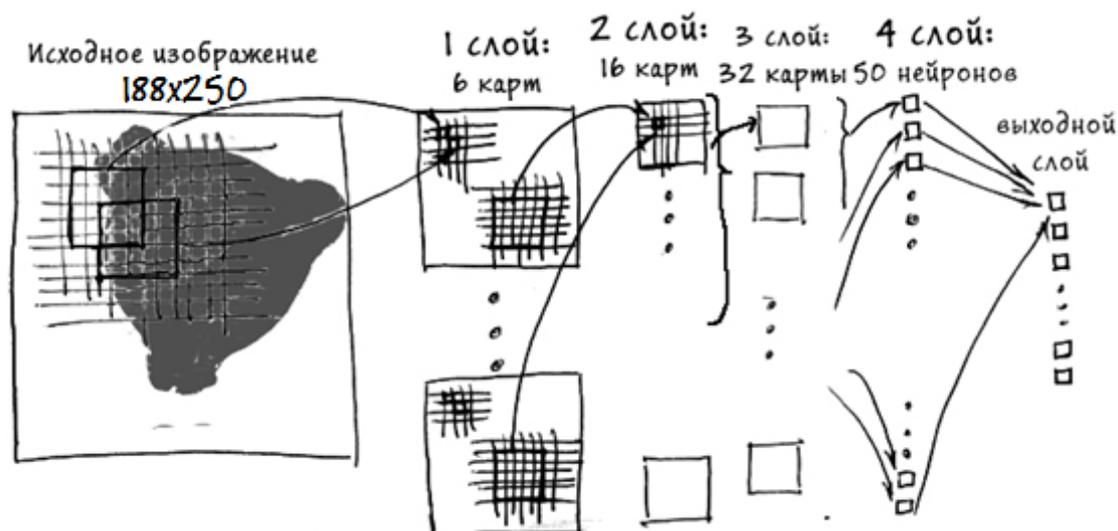


Рис. 5. Структура сверточной нейросети

Например, проверка качества воздуха связана с тем фактом, что пыльца – главная причина аллергий и астмы. В связи с этим требуется непрерывный контроль воздуха для выявления в нем пыльцы растений-аллергенов. Этим занимаются на специализированных станциях палинологи и волонтеры, вручную выполняя работу по распознаванию и подсчету пыльцевых зерен, что не может обеспечить своевременную для аллергиков информацию [8]. Среди европейцев 24 % взрослых и 40 % детей не могут свободно путешествовать по Европе из-за недостатка информации о концентрации в воздухе пыльцы по регионам [7, 8]. Согласно [7] для решения проблемы необходимо создать систему, в режиме реального времени отображающую текущее состояние качества воздуха. Для этого необходимо в первую очередь автоматизировать распознавание пыльцы.

Следующая задача – проверка качества меда на основе пыльцевого анализа. Контроль качества необходим для определения фальсификата, которого на российском рынке меда от 50 до 80 %. Среди видов анализа качества меда наиболее точным признан пыльцевой, так как мед неизбежно содержит пыльцу растений, с которых был собран нектар для него. Пыльцевым анализом занимаются лаборатории, выдавая сертификат о качестве по его итогам. Со следующего года вступает в силу федеральный закон «О пчеловодстве», согласно которому проверка качества меда станет обязательной для пчеловодов и пчеловодческих компаний, и тогда лаборатории окажутся не в силах выполнить весь объем работ по пыльцевому анализу [9]. Для этой задачи также необходима автоматизация процесса распознавания пыльцы.

Заключение

Разработана система распознавания вида растения по изображению его пыльцевого зерна. Это необходимо, например, для оценки качества меда, которая сейчас осуществляется специалистами вручную. Внедрение такого приложения позволит сократить их усилия. Также критической сферой применения является контроль качества воздуха с целью идентификации наличия в нем пыльцы растений-аллергенов. Для непрерывного отслеживания качества воздуха необходимо создание онлайн-системы, для чего требуется автоматизировать распознавание пыльцевых зерен.

В качестве признаков базового метода классификации использовались *GIST*-дескрипторы. Лучший результат на сегментированном наборе данных показал метод опорных векторов – 98,3 % точности на пяти видах растений, 95,2 % – на девяти. На необработанном наборе данных лучшим оказался случайный лес: на пяти видах – 85,6 % точности, на девяти – 78,5 %.

В качестве основного классификатора использовалась сверточная нейросеть, не использованная ранее другими исследователями для решения проблемы автоматизации распознавания пыльцы. Ее применение делает возможным свободное масштабирование разработанного алгоритма на другие наборы данных и виды растений. На необработанных изображениях она превзошла базовый метод: на пяти видах – точность 99,7 %, на девяти – 96,3 %.

Важной является также точность сегментации. В имеющихся работах она либо не рассматривается, как и этап сегментации в целом, либо составляет не более 80 %. В качестве метода сегментации использовался алгоритм *Watershed*, полученная точность составляет 87,1 %.

Публикации

1. Ханжина Н.Е. Распознавание пыльцевых зерен с помощью GIST-дескрипторов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3728/3728.pdf> (дата обращения: 06.10.16).
2. Khanzhina N.E., Putin E.O. Pollen recognition for allergy and asthma management using GIST features // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. Vol. 674. P. 515–525.
3. Ханжина Н.Е., Замятина Е.Б. Использование технологии CUDA в обучении сверточной нейросети для распознавания пыльцевых зерен // *Высокопроизводительные вычисления на графических процессорах: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием с элементами науч. шк. для молодежи (ВВГП–2016)*. Пермь, 2016. С. 70–81.

Литература

1. Поиск изображений по содержанию [Электронный ресурс] // Курсы лаборатории компьютерной графики и мультимедиа ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова [Сайт]. URL: https://courses.graphics.cs.msu.ru/pluginfile.php/81/mod_resource/content/1/cv2013_09_cbir.pdf (дата обращения: 31.01.16).
2. Oliva A., Torralba A. Modeling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope // *International Journal of Computer Vision*. 2001. Vol. 42. No 3. P. 145–175.
3. Hastie T. et al. *The elements of statistical learning*. 2nd ed. 2009. – 533 p.
4. Лагунов Н.А. Применение сверточных нейронных сетей в задачах распознавания многопараметрических объектов // *Пространство и Время*. 2013. № 3 (13). С. 194–197.
5. LeCun Y. et al. Efficient backprop // *Neural Networks: Tricks of the Trade*. 1998. Vol. 1524. P. 9–50.
6. Khanzhina N.E., Putin E.O. Pollen recognition for allergy and asthma management using GIST features // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. Vol. 674. P. 515–525.
7. Pollen [Electronic resource] // EFA: European Federation of Allergy and Airways. Diseases Patient's Associations [Official website]. URL: <http://www.efanet.org/air-quality/pollen> (accessed: 15.11.15).
8. More Europeans will be allergic to pollen if no measure is taken to reduce exposure [Electronic resource] // RNSA: Le Réseau National de Surveillance Aérobiologique [Official website]. URL: <http://www.pollens.fr/docs/CP-IRD-2015.pdf> (accessed: 15.11.15).
9. Reuber B. 21st century homestead: beekeeping. 2015. P. 6–8.



Череповская Елена Николаевна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра компьютерных образовательных технологий
E-mail: cherepovskaya@cde.ifmo.ru

НОВЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ПОЧТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРИБОРОВ

Е.Н. Череповская

Научный руководитель – доцент А.В. Лямин

Цели работы – разработка нового метода распознавания почти периодических сигналов, зарегистрированных с использованием низкочастотных приборов, выявление характеристик, позволяющих распознать сигнал в условиях неполноты измерений, проверка корректности работы метода на сигналах различного вида.

В процессе выполнения проекта был разработан метод распознавания почти периодических дискретных сигналов. Он основан на выделении и анализе фрагментов, повторяющихся через установленные частотой дискретизации устройства промежутки времени. Фрагменты, выделенные в рамках одного сигнала, не имеют значительных отличий между собой, равно как и внутри одного класса сигналов. При этом фрагменты необходимо определять для каждого вида сигнала таким образом, чтобы каждый выделенный из общего сигнала фрагмент содержал отличительные черты данного конкретного вида сигналов.

После того, как из дискретного сигнала были выделены повторяющиеся шаблоны, необходимо определить их характеристики, которые будут в дальнейшем использованы при распознавании сигнала. Поскольку эти характеристики должны давать представление об особенностях исходного непрерывного сигнала, необходимо подобрать их таким образом, чтобы выявить более точные данные. Часто для получения сведений о функции используют ее аппроксимацию рядом Тейлора с помощью производных функций. Следовательно, рассматривая фрагмент сигнала $g(t)$, для которого описывающая его функция зависит от одной переменной, получаем следующее выражение:

$$g(t + \Delta t) = g(t) + \frac{(g(t))^{(1)}}{1!} \Delta t + \frac{(g(t))^{(2)}}{2!} (\Delta t)^2 + \dots + \frac{(g(t))^{(m)}}{m!} (\Delta t)^m + \dots, \quad (1)$$

где каждая производная порядка m представляется в следующем виде:

$$(g(t))^{(m)} = \frac{\nabla^m g(t)}{h^m} + O(h). \quad (2)$$

В качестве характеристик рассматриваемых шаблонов сигналов были выбраны коэффициенты ряда Тейлора, рассчитанные с использованием метода конечных разностей и записанные в виде $\xi_r = \{\xi_{r,1}, \xi_{r,2}, \dots, \xi_{r,l}\}$, где r – идентификатор сигнала, l – количество рассчитанных характеристик для фрагмента.

В ходе разработки метода было решено использовать два алгоритма, основанных на принципах классификации ближайших соседей [1] и наивного байесовского классификатора [2]. На первом шаге вызывается стимулирующее воздействие, позволяющее получить сигнал, а также происходит регистрация необходимых данных с установленной частотой дискретизации с помощью прибора, предназначенного для рассматриваемой категории сигналов. На основе полученных данных происходит предварительный анализ

сигнала и выделяются фрагменты, содержащие его отличительные особенности. После определения шаблонов происходит расчет характеристик по указанным выражениям. Далее для проведения процедуры распознавания сигналов запускается один из двух алгоритмов.

Для вычисленных значений характеристик шаблонов применяется тест Колмогорова – Смирнова. Он определяет соответствие функций распределения каждой из характеристик рассматриваемого сигнала сигналу, хранящемуся в базе данных. На выходе теста, проведенного для каждой из характеристик, получаем матрицы вероятностей соответствия эмпирических функций распределения рассматриваемого сигнала и сигнала из базы данных по каждой из характеристик. Функции распределения определяются выборками, сформированными по каждой характеристике для выделенных фрагментов сигналов.

Алгоритм попарного сравнения базируется на расчете дистанций между записями на основе вероятностей теста Колмогорова – Смирнова для каждой пары записей по характеристикам. Сначала необходимо рассчитать дистанцию между двумя записями по каждой отдельной характеристике:

$$d(\xi_{r,i}, \xi_{q,i}) = -\ln \left(p \left(K \geq \sqrt{\frac{n_r n_q}{n_r + n_q}} D_{r,q}^i \right) \right), \quad (3)$$

где K – переменная, имеющая распределение Колмогорова, n_r и n_q – объемы выборок для сигналов r (рассматриваемый сигнал) и q (сигнал, хранящийся в базе данных) соответственно, $\xi_{r,i}$ и $\xi_{q,i}$ – i -я характеристика сигналов r и q , и $D_{r,q}^i = \sup_{\xi} |F_{r,n_r}^i(\xi) - F_{q,n_q}^i(\xi)|$ – значение статистики теста Колмогорова – Смирнова для i -той характеристики сигналов r и q , $F_{r,n_r}^i(\xi)$ и $F_{q,n_q}^i(\xi)$ – эмпирические функции распределения i -той характеристики сигналов r и q .

Используя значения дистанции по характеристикам между сигналами, следует вычислить дистанции между самими сигналами по следующему выражению:

$$d(\xi_r, \xi_q) = \sum_{i=1}^l d(\xi_{r,i}, \xi_{q,i}) \quad (4)$$

где l – общее количество рассчитанных характеристик.

Также мы можем определить формулу расчета дистанции от рассматриваемого сигнала до некоторого класса сигналов C_s , хранящихся в базе данных:

$$d(\xi_r, C_s) = \min_{q \in C_s} [d(\xi_r, \xi_q)] \quad (5)$$

Для минимизации погрешности метод предусматривает расчет порогов для классов сигналов, хранящихся в базе данных, и исключение из рассмотрения тех из них, дистанция до записей которых не проходит установленные пороги. После того, как лишние классы были исключены, запускается алгоритм определения ближайшего класса по некоторому предустановленному количеству $k > 0$ ближайших записей. Выходом алгоритма является класс, для которого было набрано необходимое количество ближайших записей.

Основным отличием алгоритма объединенных данных от алгоритма попарного сравнения является формат данных, для которых осуществляется запуск теста Колмогорова – Смирнова. Если для алгоритма попарного сравнения используются данные отдельных записей, сгруппированные по характеристикам, то в алгоритме объединенных данных характеристики класса из базы данных строятся на основе всех записей класса, объединенных в единую структуру по выражению:

$$\bigcup_{r \in C_s} \xi_{r,j}, j = 1, 2, \dots, 10 \quad (6)$$

Другим важным отличием алгоритмов является формула расчета дистанции от текущего рассматриваемого сигнала до класса. Алгоритм объединенных данных основан на теореме Байеса:

$$p(C_s | \xi_r) = \frac{p(C_s) \times p(\xi_r | C_s)}{p(\xi_r)} = \frac{p(C_s)}{p(\xi_r)} \prod_{j=1}^{10} p(\xi_{r,j} | C_s), \quad (7)$$

Таким образом, формула расчета дистанции от записи до класса представляется как:

$$d(\xi_r, C_s) = - \left(\ln \left(\frac{p(C_s)}{p(\xi_r)} \right) + \sum_{j=1}^{10} \ln \left(p(\xi_{r,j} | C_s) \right) \right) \quad (8)$$

Одним из завершающих шагов алгоритма является расчет порогов для классов базы данных, который производится по той же формуле, что и в алгоритме попарного сравнения. Итоговый класс для рассматриваемого сигнала определяется как ближайший, на основе рассчитанных значений дистанций и классов, успешно прошедших проверку порогов.

Экспериментальные исследования с целью проверки точности работы метода были проведены в Университете ИТМО на базе центра дистанционного обучения и кафедры компьютерных образовательных технологий. Первым этапом апробации метода было исследование возможности распознавания различных классов сигналов траектории взгляда пользователей. Существует множество различных типов движения взгляда, основными из которых являются фиксации и саккады. Фиксации характеризуют задержки взгляда в определенной области, в то время как саккады определяют быстрые его перемещения между точками фиксации. Из-за наличия фильтра скоростей для различения двух типов движения взгляда, который ограничивает необходимые для анализа особенности, в качестве рассматриваемых фрагментов были выбраны саккады. Траектория взгляда, и в частности саккады, не является линейным сигналом и может менять свое положение в плоскости при возникновении регрессий взгляда и т. п. Следовательно, проводить расчет характеристик и дальнейшее распознавание лишь на основе полученных координат взгляда некорректно. В связи с этим было решено ввести дополнительные системы координат $A^j x^j y^j$ каждого j -го фрагмента, содержащего саккаду, построенные на основе координат взгляда, полученных в базовой системе координат дисплея $A^0 x^0 y^0$. На рис. 1 отображена система координат для определенного фрагмента. Точки A^j и B^j обозначают начало и конец фрагмента, угол α^j – угол поворота системы координат $A^j x^j y^j$ относительно оси $A^0 x^0$.

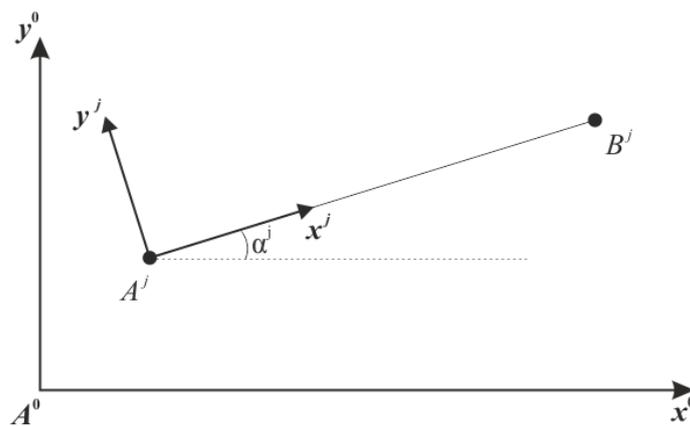


Рис. 1. Система координат фрагмента

Для апробации разработанного метода было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого для получения данных траектории взгляда был использован низкочастотный прибор с частотой дискретизации данных 30 Гц. Для двух алгоритмов метода были рассчитаны значения равной ошибки (*Equal Error Rate, EER*), при которой значения ошибок ложных принятий (*FAR*) и ошибок ложных отказов (*FRR*) равны. Для

алгоритма попарного сравнения ошибка распознавания составила 15,44 %, для алгоритма объединенных данных – 16,18 %.

Вторым этапом апробации метода был анализ сигналов электрокардиограмм. Как и сигнал траектории взгляда, электрокардиограммы содержат повторяющиеся с некоторым интервалом фрагменты – QRS-комплексы. Они предоставляют несколько видов информации, в частности идентифицирующую информацию о человеке и информацию о его функциональном состоянии. В качестве шаблонов при применении нашего метода к данной категории сигналов были использованы QRS-комплексы с прилегающими P-, T- и U-горками. Фрагмент сигнала с соответствующей ему системой координат представлен на рис. 2. Для выделения фрагментов был использован алгоритм нахождения R-пиков в частотном спектре сигнала. Был определен некоторый интервал вокруг R-пика для включения остальных частей шаблона. Использована реализация алгоритма Пана – Томпкинса [3], предназначенного для выделения QRS-комплексов.

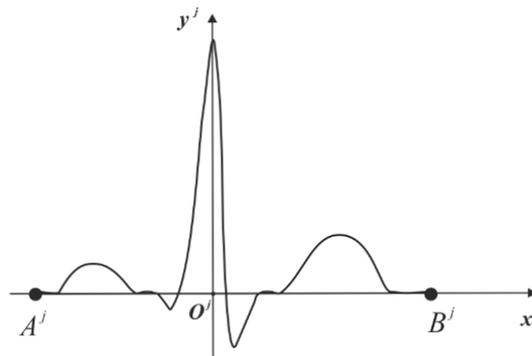


Рис. 2. Система координат фрагмента

По результатам анализа данного типа сигналов, для алгоритма попарного сравнения ошибка распознавания составила 0,13 %, для алгоритма объединенных данных – 0,6 %.

В рамках выполнения проекта также были определены характеристики сигнала, включающего изображения, необходимые для осуществления его анализа с использованием представленного метода. При расчете характеристик для изображений следует использовать формулу ряда Тейлора для функции, зависящей от двух переменных. Характеристиками сигнала будут являться конечные разности, рассчитанные по двум координатам. В частности, имея некоторое изображение, предполагается рассматривать каждый пиксель в отдельности, представляя его характеристику в виде функции, зависящей от двух переменных – координат пикселей $x(t')$ и $y(t'')$. Таким образом, в этом случае аппроксимация будет осуществляться для некоторой поверхности, построенной на основе значений данной функции. В качестве класса, хранящегося в базе данных, предполагается наличие некоторой базы изображений определенного типа. В целях проведения распознавания сигналов на вход алгоритму подается определенное изображение, для которого необходимо определить, возможно ли отнесение его к какому-либо из классов, размещенных в базе. На рис. 3 схематично показан процесс распознавания изображений на примере различных вариантов написания буквы «Р».

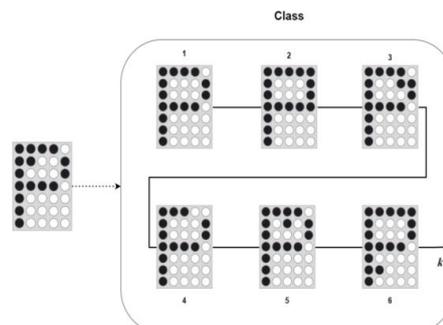


Рис. 3. Схема алгоритма распознавания изображений

Заключение

В ходе исследования был разработан новый метод распознавания почти периодических сигналов, полученных с использованием низкочастотных приборов. Были выявлены необходимые для процедуры распознавания характеристики сигналов, рассчитываемые для выделенных повторяющихся фрагментов. Метод был апробирован на двух разных видах сигналов, показав в обоих случаях высокую точность работы. Для сигнала траектории взгляда при использовании алгоритма попарного сравнения ошибка распознавания составила 15,44 %, в то время как для алгоритма объединенных данных результирующая ошибка равна 16,18 %. Разработанный метод также был проверен на сигналах электрокардиограмм, ошибка распознавания которых составила 0,13 % и 0,6 % для двух алгоритмов соответственно.

Представленный метод может быть внедрен в реальных информационных системах для распознавания различных сигналов, в том числе в целях проведения биометрической идентификации пользователей на основе анализа таких биометрических сигналов как траектория взгляда и данные электрокардиограмм. Описанные типы сигналов, на которых проводилась апробация метода, несут в себе не только идентифицирующую данные сигналы информацию, но и дополнительные сведения, которые могут быть использованы для исследований в других научных областях. Комбинация нескольких типов сигналов в рамках одной информационной системы позволит проводить наиболее полный анализ поведения пользователей в ходе работы с системой, а также создавать адаптивные траектории обучения или обучающие модули в системах электронного обучения. Следовательно, представленный метод, в частности для указанных в проекте сигналов, может быть применен в различных информационных системах для получения полноценной информации о пользователе и с целью предотвращения несанкционированных действий внутри системы.

Публикации

1. *Lyamin A.V., Cherepovskaya E.N.* Biometric student identification using low-frequency eye tracker // 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 2015. P. 191–195.
2. *Лямин А.В., Череповская Е.Н.* Экспериментальные исследования биометрической идентификации пользователей на основе данных айтрекера Tobii X2-30 // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5 (78). С. 26–33.
3. *Belashenkova N.N., Cherepovskaya E.N., Lyamin A.V., Skshidlevsky A.A.* Protection methods of assessment procedures used in e-Learning // 13th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA). 2015. P. 27–32.
4. *Лямин А.В., Череповская Е.Н.* Направления исследований нейрокогнитивных процессов в системах электронного обучения с использованием анализа траектории взгляда [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1732/1732.pdf> (дата обращения: 15.11.16).

Литература

1. *Cover T., Hart P.* Nearest neighbor pattern classification // IEEE Transactions on Information Theory. 1967. Vol. 13. No 1. P. 21–27.
2. *Yang Y., Webb G.I.* On why discretization works for naive-bayes classifiers // AI 2003: Advances in Artificial Intelligence. 2003. Vol. 2903. P. 440–452.
3. *Pan J., Tompkins W.J.* A real-time QRS detection algorithm // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1985. Vol. BME-32. No 3. P. 230–236.

DLP-систем для выбора наиболее подходящей для реализации нашей цели, а также алгоритм и критерии проверки эффективности работы DLP-систем на примере разработанной модели нарушителя.

Основной критерий проверки заключается в оперативном выявлении нарушителя, проникшего за периметр сети, по модели его поведения, которое характеризуется следующими основными параметрами:

- адреса переписки и пересылки материалов, их содержание;
- просматриваемый в интернете контент;
- сетевые адреса обращения фоновых процессов, запущенных на рабочем устройстве нарушителя, находящегося в исследуемой локальной сети.

Определены следующие требования к исследуемым системам DLP. Контроль содержания информации, передаваемой из информационной системы, должен предусматривать [1, 2]:

- выявление фактов неправомерной передачи защищаемой информации из информационной системы через различные типы сетевых соединений, включая сети связи общего пользования, и реагирование на них;
- выявление фактов неправомерной записи защищаемой информации на неучтенные съемные машинные носители информации, реагирование на них;
- выявление фактов неправомерного вывода на печать документов, содержащих защищаемую информацию, реагирование на них;
- выявление фактов неправомерного копирования защищаемой информации в прикладное программное обеспечение из буфера обмена и реагирование на них;
- контроль хранения защищаемой информации на серверах и автоматизированных рабочих местах;
- выявление фактов хранения информации на общих сетевых ресурсах (общие папки, системы документооборота, базы данных, почтовые архивы и иные ресурсы).

Были выдвинуты некоторые дополнительные требования:

- в информационной системе должно осуществляться хранение всей передаваемой из нее информации (или) информации с недопустимым к передаче из информационной системы содержанием, в течение времени, определяемого оператором;
- в информационной системе должна осуществляться блокировка передачи из нее информации с недопустимым содержанием.

Анализ данных идет по двум направлениям:

- контекстный;
 - активность (дата/время, периодичность, частота);
 - отправитель (права пользователя, группы (в том числе под особым контролем, например «на увольнении») и роли);
 - получатель (внутренний/внешний, знакомый/неизвестный, «из перечня» и прочее);
 - канал и протокол передачи, тип приложения;
 - местоположение (географическое и аппаратное);
- контентный;
 - цифровые отпечатки;
 - «лингвистика»;
 - метки;
 - прочее.

На начальном этапе были отобраны три системы DLP. За основу выбран принцип первичного сравнения популярных программных продуктов по их заявленным характеристикам и возможностям. На рис. 2 представлена диаграмма, отображающая данные объемов продаж и долей рынка основных производителей DLP-систем в 2013–2015 годах [3].

Среди них были выбраны те, у которых имелась бесплатная пробная версия программного продукта. Такими оказались: *InfoWatch*, *SecurIT*, *Search Inform*. Для

первичного выбора продукта были использованы результаты сравнительного анализа, проведенного компанией ANTI-MALWARE.

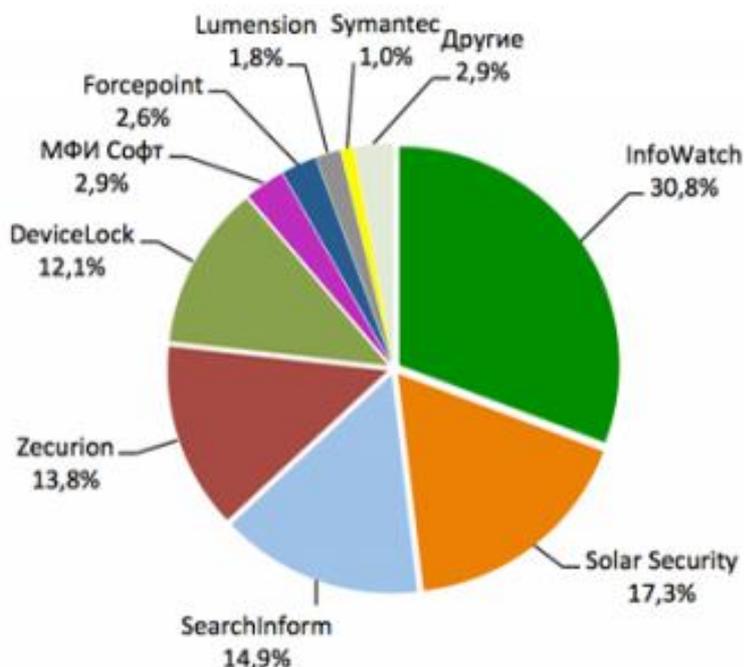


Рис. 2. Объем продаж и доля рынка основных производителей DLP-систем

Для реализации поставленной задачи была выбрана локальная вычислительная сеть оператора связи. При установке и настройке серверной и клиентской частей программы делался упор именно на применение этой системы в рамках предприятия малого бизнеса, то есть контроль основных почтовых протоколов, интернет серфинга и логгирование процессов на рабочих станциях сотрудников и другое. Настройка контроля контента и работы пользователей за рабочими местами производилась посредством создания фильтрующих правил и политик безопасности.

Во время работы было выбрано место – локальная вычислительная сеть и сам нарушитель – один из сотрудников компании. Имитация нарушителя заключается в том, что мы имеем совершенно неизвестного нам нарушителя, о проникновении которого за периметр локальной вычислительной сети средства защиты информации ничего не сообщили, и деятельность которого мы должны обнаружить в кратчайшие сроки.

Нарушитель собирает информацию ограниченного доступа – заранее разработанный список критически важных информационных ресурсов – и старается его незаметно для средств защиты информации передать третьему лицу.

Наша же задача, используя все средства защиты информации (систему контроля и управления доступом, систему видеонаблюдения, политику доступа и другие), в том числе и DLP-систему наиболее быстро определить нарушителя по его подозрительной деятельности.

В процессе выполнения работы собраны данные и обобщены результаты исследования. Сравнение DLP-систем проведено частично, но по времени, оперативности и удобству работы победителем является DLP-система производителя InfoWatch. За ней идет DLP-система производителя Search Inform, а последняя – DLP-система SecurIT. Результаты получены относительно имеющегося оборудования и «игры-действий» нарушителя.

Можно сказать, что применение DLP-систем в разы повышает безопасность данных, но одновременно является очень дорогим средством защиты для малых коммерческих организаций.

Литература

1. Сравнение систем защиты от утечек (DLP) 2014. Часть 1 [Электронный ресурс] // Anti-Mailware.ru [Интернет-портал]. URL: http://www.anti-malware.ru/comparisons/data_leak_protection_2014_part1 (дата обращения: 12.10.16).
2. Сравнение систем защиты от утечек (DLP) 2014. Часть 2 [Электронный ресурс] // Anti-Mailware.ru [Интернет-портал]. URL: http://www.anti-malware.ru/comparisons/data_leak_protection_2014_part2 (дата обращения: 12.10.16).
3. Анализ рынка систем защиты от утечек конфиденциальных данных (DLP) в России 2013–2016 [Электронный ресурс] // Anti-Mailware.ru [Интернет-портал]. URL: http://www.anti-malware.ru/russian_dlp_market_2013_2016 (дата обращения: 12.10.16).



Чухламов Антон Викторович
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра прикладной и компьютерной оптики
E-mail: chanvikt@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ, А ТАКЖЕ ОБНАРУЖЕНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ НА НЕМ

А.В. Чухламов

Научный руководитель – доцент К.В. Ежова

Цель исследования – разработка программного обеспечения для стабилизации видеоизображения, а также для обнаружения и слежения за объектами.

Первоначальная задача – проанализировать существующие алгоритмы стабилизации видеоизображения и новейшие алгоритмы и методы детектирования, а также разработать программное обеспечение (ПО), которое должно:

- осуществлять эффективную стабилизацию видеоизображения;
- детектировать на нем искомый объект и его части;
- следить за перемещениями объекта на видеоизображении.

Исторически сложилось так, что алгоритмы, работающие только с интенсивностью изображения (например, со значением *RGB* (*Red, Green, Blue* – цветовая модель) в каждом пикселе), имеют большую вычислительную сложность [1, 2]. В статье [3] была рассмотрена работа со множеством признаков, основанных на вейвлетах Хаара. Виола и Джонс адаптировали эту идею и разработали признаки Хаара. Это смежные прямоугольные области (рис. 1), которые позиционируются на изображении. Представление признаков набором прямоугольников обусловлено тем, что вычислять сумму яркостей для таких областей можно гораздо быстрее, чем для фигур произвольной формы. Это важно, так как реализуемый детектор должен работать в режиме реального времени.

Далее интенсивности пикселей в областях суммируются, после чего вычисляется разность между суммами интенсивности пикселей в областях. Эта разность и будет значением определенного признака, определенного размера, определенным образом спозиционированного на изображении.

Для того чтобы за постоянное время (четыре обращения к памяти) получить сумму пикселей внутри прямоугольной области изображения, используется оптимизация, называемая интегральным преобразованием изображения. Интегральным оно называется по аналогии с математической операцией интегрирования, вычисляющей сумму значений функции на отрезке. В данном случае функцией является яркость пикселя $I_{x,y}$ [4, 5].

Интегральное изображение в точке с координатами $I_{x,y}$ представляет собой сумму значений яркости в точках, вертикальная и горизонтальная координаты которых меньше x и y (рис. 2).

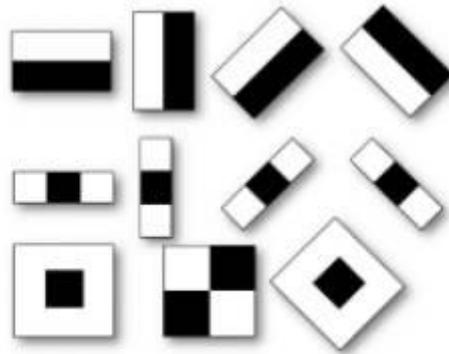


Рис. 1. Признаки Хаара

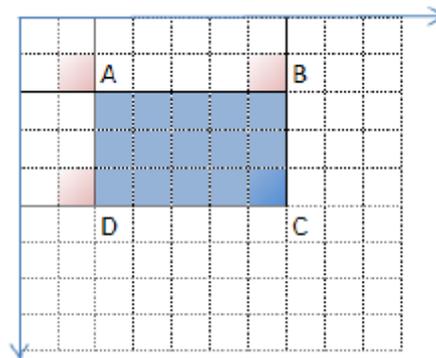


Рис. 2. Интегральное представление изображения

Для вычисления значения интенсивности в конкретной точке используется следующее выражение:

$$I_{x,y} = I_{x,y-1} + I_{x-1,y} - I_{x-1,y-1}.$$

Сумма значений яркости пикселей внутри прямоугольника ABCD можно вычислить следующим образом: $C - B - D = A$.

Ключевой особенностью признаков Хаара является наибольшая, по сравнению с остальными признаками, скорость обработки одного кадра. При использовании интегрального представления изображения признаки Хаара могут вычисляться за постоянное время, что позволяет использовать классификатор в режиме реального времени [6].

Искомый объект на изображении обнаруживает классификатор (каскад), который необходимо «обучить» перед тем, как использовать. На рис. 3 изображен алгоритм обучения каскада.

Для обучения каскада необходима база примеров, которой может быть набор картинок (фотографий), например с лицами и без них. Те изображения, на которых присутствуют лица, будут являться хорошими примерами, а те на которых нет – плохими. Чем больше таких примеров, тем точнее каскад будет выполнять обнаружение. Далее происходит распределение по папкам и переименование каждого изображения. Предпочтительно давать изображениям названия с цифрами, то есть 1.jpg, 2.jpg и т. д., чтобы не было проблем

с чтением имен файлов. После этого создаются *bat*-файлы, которые содержат информацию об изображениях. Всего их будет два: для хороших примеров и для плохих. В случае с плохими примерами это будет список относительных путей к изображениям (в каждой строчке путь к одному изображению). Для хороших примеров в конце каждой строчки добавится несколько параметров:

- количество искомых объектов на изображении;
- область, в которой они расположены (четыре точки).

Из сформированных положительных и отрицательных примеров при помощи существующего программного приложения (*opencv_createsamples.exe* и *opencv_traincascade.exe*, которые являются частью библиотеки *OpenCV*) формируется готовый *xml*-файл, содержащий описание каскада (классификатора).

Каскады, как правило, распознают объекты в их нормальном положении, то есть повернутое хотя бы на небольшой угол изображение может оказаться для него «пустым». Для того чтобы в таких случаях детектор работал нормально, программа поворачивает изображение на некоторый угол, выполняя обнаружение при каждом повороте. Для осуществления вращения используется матрица поворотов, которая выглядит следующим образом:

$$M(\theta) = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix},$$

где θ – угол поворота в радианах [7, 8].

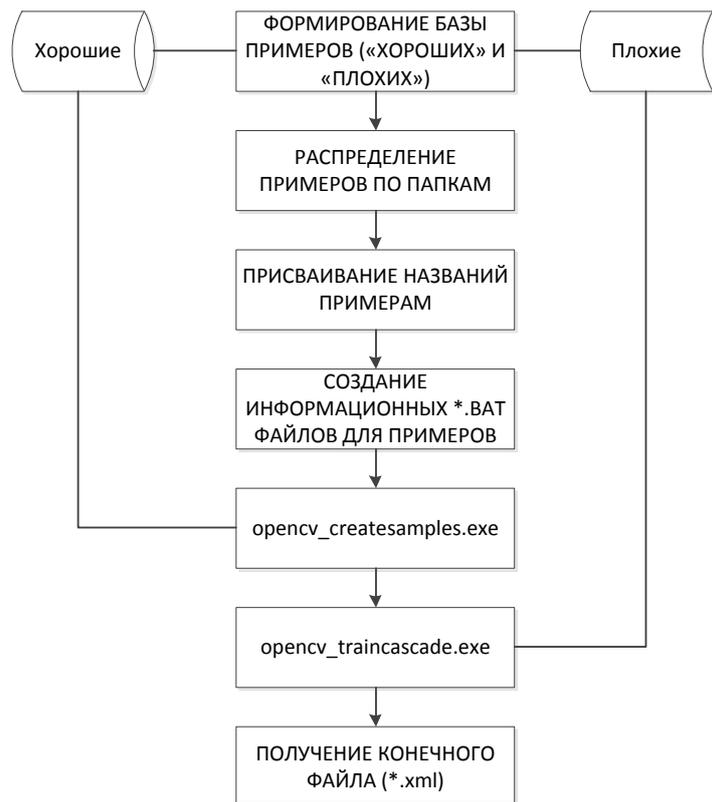


Рис. 3. Блок-схема алгоритма «обучения» каскада Хаара

Далее пересчитывается каждая точка изображения:

- получаем точку;
- формируем из ее координат вектор;
- умножаем вектор на матрицу поворота.

Новый вектор будет представлять собой новые координаты точки.

Заключение

Выполнен обзор новых технологий детектирования. Проанализированы методы стабилизации видеоизображения. Для данной работы был выбран массивно-параллельный алгоритм с использованием *Nvidia CUDA*. Массивно-параллельный алгоритм стабилизации видеоизображения в совокупности с технологией *CUDA* позволит осуществлять эту процедуру почти без временной задержки (при умеренном качестве камеры) [9, 10].

На данный момент реализован модуль детектирования человеческого лица и глаз (рис. 4, 5). Ведется работа над изучением технологии *CUDA*, для ее применения с целью увеличения быстродействия программы.

Существующее программное обеспечение находится в стадии модификации.

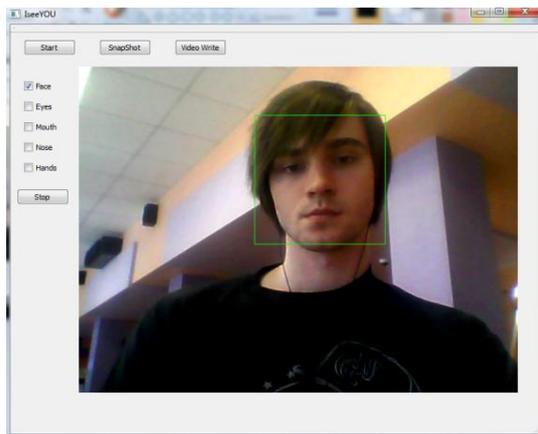


Рис. 4. Детектирование лица

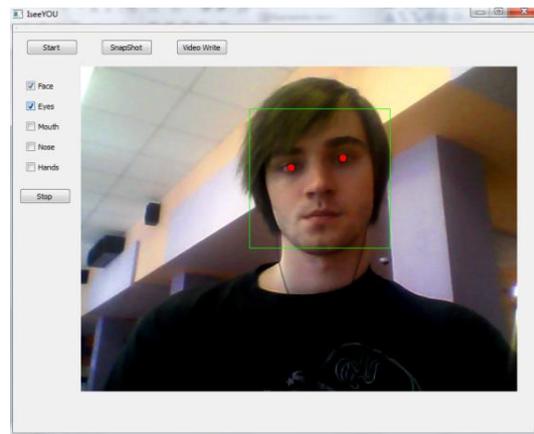


Рис. 5. Детектирование глаз и лица

Публикации

1. *Ezhova K.V., Fedorenko D.A., Chuhlamov A.V.* Analysis and segmentation of images in case of solving problems of detecting and tracing objects on real-time video // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9897. P. 98970M.
2. *Ezhova K.V., Chuhlamov A.V., Fedorenko D.A.* Development of the software for images segmentation and objects detecting on video // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9897. P. 98970R.
3. *Ежова К.В., Чухламов А.В.* Программное обеспечение для стабилизации видеоизображения и обнаружения и слежения за объектами на нем [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3137/3137.pdf> (дата обращения: 29.11.2016).

Литература

1. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. М., 2007. – 584 с.
2. *Шапиро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение. М., 2006. – 531 с.
3. *Parageorgiou C.P. et al.* A general framework for object detection // 6th International Conference on Computer Vision. 1998. P. 555–562.
4. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. М., 2006. – 652 с.
5. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб., 2007. – 605 с.
6. *Jones M., Viola P.* Robust real-time face detection [Electronic resource] // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 57. No 2. P. 137–154. URL: <http://www.vision.caltech.edu/html-files/EE148-2005-Spring/pprs/viola04ijcv.pdf> (дата обращения 24.05.2015).
7. *Гонзалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М., 2006. – 1072 с.
8. *Грузман И.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. Новосибирск, 2003. – 352 с.
9. *Рутм Г., Фатика М.* CUDA Fortran для ученых и инженеров. М., 2014. – 364 с.
10. *Сандерс Дж., Кэндрот Э.* Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров. М., 2011. – 232 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка конструкции и математической модели расчета матрицы для динамической экструзии <i>О.И. Аксенова</i>	4
Разработка метода защиты продукции от фальсификации на основе лазерной модификации поверхности металлов <i>Я.М. Андреева</i>	9
Разработка прототипа системы биометрической аутентификации личности на основе рисунка вен ладони <i>М.А. Вашурина</i>	13
Исследование влияния механических резонансов на работу интегрального электрооптического модулятора на основе ниобата лития и поиск методов их подавления <i>А.А. Власов</i>	18
Методы получения волновых полей с детерминированными комплексными параметрами <i>Т.А. Вовк</i>	23
Оптические и электрические свойства плазмонных наноструктур благородных металлов на поверхности арсенида галлия <i>П.В. Гладских</i>	27
Исследование возможностей реализации некритичного по температуре синхронизма в двухосных нелинейных кристаллах <i>П.Я. Дружинин</i>	33
Исследование влияния двухфотонного поглощения на генерацию и детектирование терагерцового излучения в электрооптических полупроводниковых кристаллах <i>М.О. Жукова (Осипова)</i>	35
Разработка предикатов нарушения симметрии для построения детерминированных конечных автоматов при помощи сведения к задаче о выполнимости <i>И.Т. Закирзянов</i>	41
Низкопороговая генерация когерентного излучения в композитных материалах на основе плазмонных наноструктур <i>А.Н. Камалиева</i>	46
Лазерно-индуцированные оксидные структуры на поверхности титана и их влияние на остеоинтеграцию и биосовместимость имплантов <i>Ю.Ю. Карлагина</i>	53
Изготовление фазовых решеток лазерной микроплазмой для интерференционных схем микрообработки <i>В.В. Коваль</i>	58
Технологии моделирования городских процессов на основе сетевого подхода в рамках криминальных процессов <i>А.А. Ланцева</i>	63
Решение обобщенной задачи поиска связного подграфа максимального веса <i>А.А. Лобода</i>	67
Разработка и исследование параметрического генератора света, работающего в ИК-диапазоне <i>О.Н. Марченко</i>	70
Методы динамического планирования композитных приложений для многомасштабного моделирования сложных систем в облачных вычислительных средах <i>М.А. Мельник</i>	73
Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга <i>А.С. Мунько</i>	78

Разработка средств визуального анализа динамических процессов в комплексных контактных сетях для задач медицины и здравоохранения <i>К.Д. Мухина</i>	83
J-агрегаты в металлоорганических наноструктурах: самоорганизация, лазерное формирование и оптические свойства <i>Р.Д. Набиуллина</i>	87
Разработка эффективных алгоритмов управления в условиях неопределенностей и их применение в процессе ректификации <i>А.Н. Нехороших</i>	92
Разработка катушки Тесла для изучения электромагнитных явлений <i>Е.А. Перцева</i>	96
Автоматическое построение семантической сети <i>А.Е. Письмак</i>	98
Автоматизация технологии обработки стекла лазерно-индуцированной микроплазмой для создания микрооптических элементов и их массивов <i>В.С. Рымкевич</i>	101
Исследование технических и организационно-правовых аспектов защиты вебсайта как объекта интеллектуальной собственности <i>С.Л. Савченко-Новопавловская</i>	108
Исследование диэлектрических и механических свойств полиамида 6 наполненного фуллереном C ₆₀ <i>А.Н. Синицин</i>	111
Исследование физических свойств водно-зерновых суспензий на основе ржи <i>А.В. Степаненко</i>	113
Разработка методики определения антиоксидантного статуса организма человека <i>Э.О. Тимофеева</i>	118
Исследование распределения поляризационной чувствительности по площадке матричных анализаторов изображения <i>А.В. Трушкина</i>	124
Разработка методов моделирования процессов синтеза нанотермоэлектриков искровым плазменным спеканием <i>А.С. Тукмакова</i>	128
Разработка комплексного инновационного подхода для решения проблем развития отечественного детского туризма <i>В.Н. Федотова</i>	132
Разработка программного комплекса для распознавания пыльцевых зерен <i>Н.Е. Ханжина</i>	136
Новый метод распознавания почти периодических сигналов, полученных с использованием низкочастотных приборов <i>Е.Н. Череповская</i>	142
Анализ эффективности применения DLP-систем в локальных вычислительных сетях <i>А.В. Черток</i>	147
Особенности разработки программного обеспечения для стабилизации видеоизображения, а также обнаружения и слежения за объектами на нем <i>А.В. Чухламов</i>	150

Сборник трудов студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. –
СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 156 с.

СБОРНИК ТРУДОВ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова
Дизайн обложки А.В. Чуркова
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати 02.06.2017
Заказ № 4047
Тираж 100 экз.

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49