

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2018»

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2018

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГУГиТ, Новосибирск
А. В. Шабурова

Кандидат технических наук, директор КТИ НП СО РАН, Новосибирск
П. С. Завьялов

Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией
лазерных информационных систем ИЛФ СО РАН, Новосибирск
Б. В. Поллер

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ,
научный руководитель КТИ НП СО РАН, Новосибирск
Ю. В. Чугуй

Доктор технических наук, зав. лабораторией КТИ НП СО РАН, Новосибирск
И. Г. Пальчикова

Доктор физико-математических наук, зав. отделом
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
В. В. Кузнецов

Кандидат технических наук, директор ФГУП «СНИИМ», Новосибирск
Г. В. Шувалов

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГУГиТ, Новосибирск
Ю. Ц. Батомункуев

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 277 с.

В сборнике опубликованы материалы XIV Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2018».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

© СГУГиТ, 2018

РАЗРАБОТКА СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО НАНОЛИТОГРАФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СВЕРХРАЗРЕШАЮЩЕЙ ЗАПИСИ ДИФРАКЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУР

Александр Григорьевич Полещук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук

Антон Евгеньевич Качкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-91, e-mail: antoshka787@yandex.ru

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Руслан Владимирович Шиманский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.su

Владимир Николаевич Хомутов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: v.n.homutov@gmail.com

Андрей Георгиевич Седухин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Работа посвящена разработке прототипа компактного сканирующего лазерного нано-литографа для исследования по прямой сверхразрешающей записи дифракционных структур, в том числе субволновых. Лазерная запись в декартовых координатах может быть сделана как на тонких пленках металлов, так и на пленках фоторезистов, нанесенных на плоскую стеклянную подложку.

Ключевые слова: сканирующий лазерный нано-литограф, субволновые дифракционные наноструктуры, пленки металлов, фоторезист, прямая лазерная запись.

DEVELOPMENT OF SCANNING LASER NANOLITHOGRAPHY SYSTEM FOR STUDY OF HIGH RESOLUTION WRITING OF DIFFRACTIVE NANOSTRUCTURES

Alexander G. Poleschuk

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc.

Anton E. Kachkin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer-programmer, phone: (383)333-30-91, e-mail: antoshka787@yandex.ru

Viktor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

Ruslan V. Shimansky

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: shimansky@iae.nsk.ru

Vladimir N. Khomutov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: v.n.khomutov@gmail.com

Andrei G. Sedukhin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)333-30-91, e-mail: sedukhin@iae.nsk.ru

The work is devoted to the development of a prototype of a compact scanning laser nanolithography system for the study of direct super-resolution writing of diffractive structures, including subwavelength ones. Laser writing in Cartesian coordinates can be done both on thin metal films and photoresist films deposited on a flat glass substrate.

Key words: scanning laser nanolithographer, subwavelength diffractive nanostructures, metal films, photoresist, direct laser writing.

В ИАиЭ СО РАН в рамках выполнения проекта РНФ «Развитие сверхразрешающей термохимической лазерной технологии формирования компьютерно-синтезированных дифракционных наноструктур» разрабатывается компактный лазерный x-y нанолитограф (x-y ЛНЛ). Подсистема сканирования выполнена на базе двухкоординатного стола с прецизионными направляющими, имеющими свободный ход до 30 мм. Используемая в указанном нанолитографе техника является дальнейшим развитием ранее разработанной системы прямой лазерной записи [1].

На рис. 1 показана оптическая схема x-y ЛНЛ. В него установлен УФ диодный лазерный модуль LuxXplus 405-300 с длиной волны 405 нм и мощностью 300 мВт производства Omicron GmbH (Германия). Лазер может осуществлять цифровую (двухуровневую) модуляцию с частотой от 0 до 100 МГц, что позволяет исследовать лазерную запись, как непрерывным пучком, так и импульсным. Аналоговая модуляция может осуществляться в полосе частот до 3 МГц. Для управления модуляцией лазера был разработан специальный электронный модуль, способный синхронизироваться по внешнему цифровому сигналу. В дальнейшем этот модуль будет использован для осуществления записи сложных дифракционных структур. Для измерения перемещений по одной координате в x-y ЛНЛ установлен линейный датчик перемещений (Renishaw, Великобритания) с разрешением 1,2 нм. По сигналу с этого датчика устанавливается межтрековое (межстрочное) расстояние. По второй координате привод работает в режиме постоянной линейной скорости со стабилизацией скорости по сигналу со второго датчика (также Renishaw) с разрешением 100 нм.

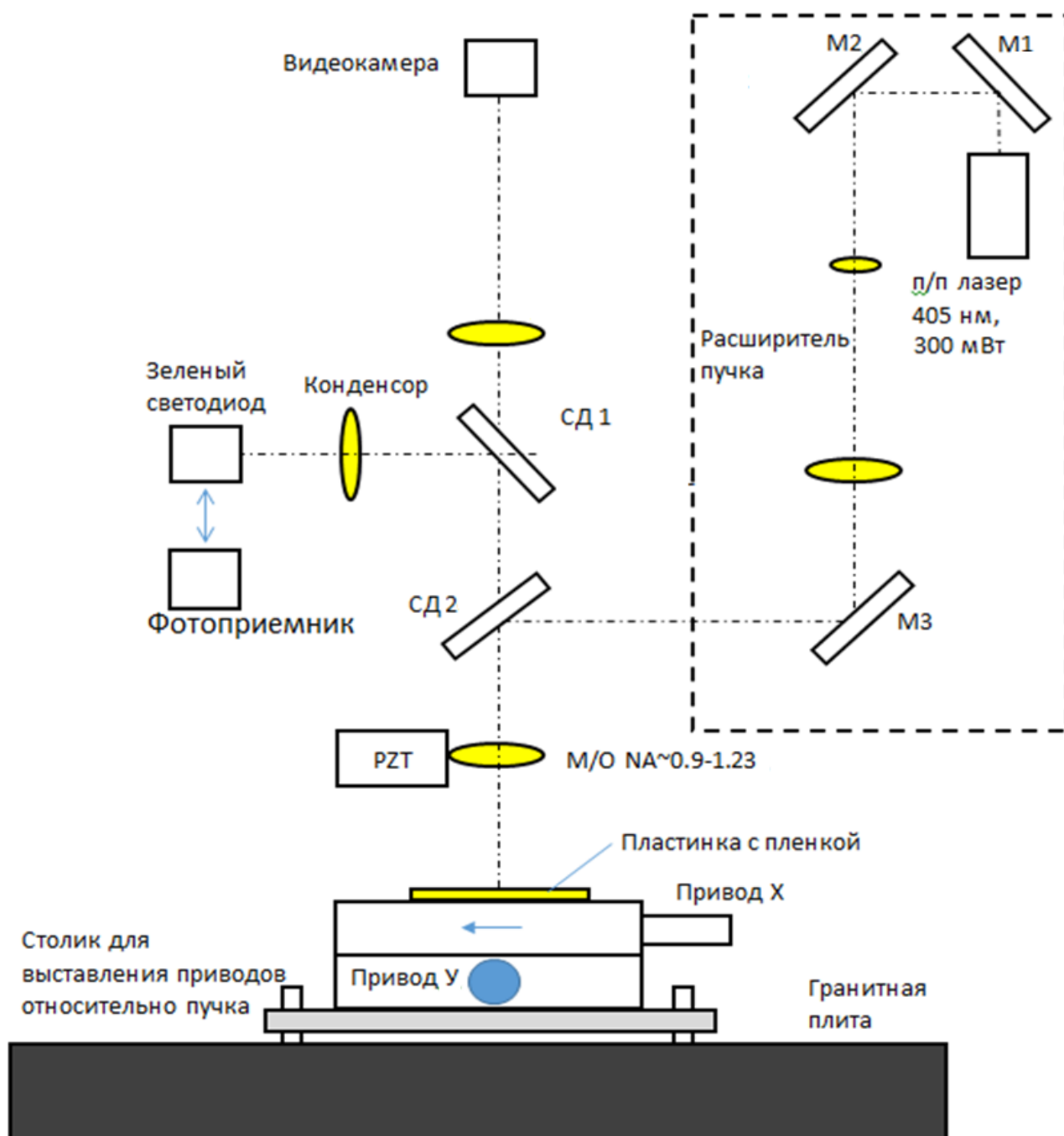


Рис. 1. Оптическая схема лазерного нанолитографа:

СД1-СД2 –дихроичные светоделители, Л1-Л4 – линзы, М1-М3 – зеркала, PZT – пьезоактюатор, М/О – микрообъектив

Оптическая схема рассчитана для установки иммерсионного микрообъектива с числовой апертурой 1.23 (70х апохромат, ЛОМО), либо сухого объектива Olympus Mplan 100x0.9 с пьезопозиционером для перемещения объектива в вертикальном направлении. Во входном зрачке объективов может монтироваться центральная заградительная диафрагма с регулируемым коэффициентом виньетирования. Указанная диафрагма позволяет реализовать кольцевую фор-

му пучка на входе объективов и, тем самым, обеспечить работу объектива в сверхразрешающем режиме и сократить размер сфокусированного лазерного пятна (приблизенно и в зависимости от коэффициента виньетирования диафрагмы) на фактор от 1 до 1.6. Кроме того, предусмотрена возможность замены диафрагм на более сложные (по структуре) специально рассчитываемые компьютерно-синтезированные аподизирующие фильтры. При использовании иммерсионного объектива предусматриваются два режима его работы – в штатном режиме с пропусканием лазерного пучка на выходе объектива через иммерсионную жидкость и стеклянную подложку (покровное стекло) с нанесенной на ее тыльную поверхность тонкой металлической пленкой регистрирующего материала для записи (хром, титан, и др. металлы), а также в режиме, когда пленка металла нанесена на фронтальную поверхность подложки и осуществлена соответствующая коррекция фокусировки объектива. Первый и второй режимы соответствуют случаю так называемой записи через стекло и случаю прямой лазерной иммерсионной записи. Расчетная величина сфокусированного лазерного пятна по уровню половинной интенсивности составляет (в первом скалярном приближении и усредненно по координатам x и y) порядка 125 нм при коэффициенте виньетирования заградительной диафрагмы 0.9. Профили пучка в фокальной плоскости удовлетворительно аппроксимируется по координатам x и y функциями Бесселя первого рода и нулевого порядка. Это позволяет удобно использовать данный вид аппроксимации при решении задачи о нахождении теплового отклика от воздействия лазерного пучка в материале подложки и регистрирующего материала (при подстановке данных профилей в уравнение теплопроводности и его последующего решения).

Пьезопозиционер, на котором установлен объектив обеспечивает фокусировку системы. Управление пьезопозиционером осуществляется с помощью электронного модуля с блоком пьезодрайвера, который позволяет пользователю выставлять требуемые значения вертикального положения микрообъектива. Так же данный электронный модуль поддерживает канал обратной связи для использования в режиме автофокусировки.

На рис. 2 показан внешний вид, созданного прототипа лазерного нанолитографа, предназначенного для первичной апробации новых фокусирующих систем и экспериментов по лазерной записи на различных материалах.

Для повышения разрешения x - y ЛНЛ разработана высокоапертурная иммерсионная фокусирующая система на базе микроскопного апланатического объектива и заградительной диафрагмы (пространственно-частотного фильтра) для обеспечения субволновой фокусировки при линейной форме поляризации излучения лазера. В экспериментальном варианте был использован серийный объектив с водной иммерсией ЛОМО 70x1,23 ВИ для работы на длинах волн 532 и 633 нм. Было проведено сопоставление характеристик данной системы с характеристиками другой разработанной системы на базе дифракционного элемента (ДОЭ), преобразующего гауссову форму лазерного пучка в кольцевую, и кольцевого зеркала (КЗ) [2]. В типовых случаях с желаемой субволновой фокусировкой, система на основе микроскопного объектива про-

игрывает в световой эффективности системе на основе ДОЭ и КЗ в десятки раз (точные цифры зависят от характеристик заградительного фильтра, от соотношения размера шейки гауссова пучка на входе системы и размера входного зрачка системы, а также от характеристик ДОЭ и КЗ). В этой связи, было сделано заключение, что мощности имеющегося лазера может оказаться недостаточно для проведения процесса термохимической записи с применением микроскопного апланатического объектива и заградительной диафрагмы. В связи с этим было проведено совершенствование второй более светоэффективной системы. Для отработки специализированных методик и трудоемких операций по необходимой прецизионной юстировке компонентов оптической системы на основе ДОЭ и КЗ, был изготовлен и собран экспериментальный макет более легкой в изготовлении и настройке «сухой» фокусирующей оптической системы (непосредственного аналога иммерсионной системы с тем же самым углом сведения лучей, но в свободном пространстве), с применением сделанного на заказ высокоапертурного кольцевого зеркала высокого оптического качества. На базе специально созданного юстировочного стенда были экспериментально отработаны специализированные методики юстировки взаимного положения ДОЭ и кольцевого зеркала, позволяющие обеспечить практически полную компенсацию таких основных видов aberrаций, как кома и сферическая aberrация [3]. Данная система и методика ее настройки послужит основой для нового варианта светоэффективной иммерсионной фокусирующей системы.



Рис. 2. Внешний вид лазерного нанолитографа

Таким образом, разработана и исследована высокоапертурная иммерсионная фокусирующая система на базе серийных апланатических объективов и компьютерно-синтезированных аподизирующих и пространственно-частотных фильтров (в виде простых заградительных диафрагм и их более сложных аналогов) для работы в видимом диапазоне длин волн и при линейной форме поляризации излучения лазера. Рассчитанная низкая световая эффективность такой системы для случая субволновой кольцевой фокусировки излучения указала на необходимость перехода к более светоэффективным системам.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01721).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. Polarcoordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. – 1999. – V. 38, N. 8. – P.1295-1301.
2. Sedukhin A.G., Poleshchuk A.G. Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization conversion: Method, implementation, and field near focus // Optics Communications. – 2018. – V. 407. – P. 217-226.
3. Седухин А. Г., Полещук А. Г. Особенности юстировки высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 91–95.

REFERENCES

1. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. – 1999. – V. 38, N 8. – P.1295-1301.
2. Sedukhin A.G., Poleshchuk A.G. Efficient tight focusing of laser beams optimally matched to their thin-film linear-to-radial polarization conversion: Method, implementation, and field near focus // Optics Communications. – 2018. – V. 407. – P. 217-226.
3. Sedukhin A.G., Poleshchuk A.G., Peculiarities of aligning a high-numerical-aperture diffractive-reflective objective lens / Proceedings of the conference «SibOptics-2017». – Vol. 1. – Novosibirsk, SSUH@T. – P.91-95.

© А. Г. Полещук, А. Е. Качкин, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский,
В. Н. Хомутов, А. Г. Седухин, 2018

ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Евгений Федорович Пен

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-21-29, e-mail: pen@iae.nsk.su

Владимир Владимирович Шелковников

Новосибирский институт органической химии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-89-96, e-mail: vsh@nioch.nsc.ru

Представлены результаты исследований дифракционных и спектральных свойств одиночных и комбинированных объемных пропускающих и отражательных голографических решеток с учетом физико-химических особенностей фотополимерных материалов.

Ключевые слова: оптическая голография, фотополимерные материалы, дифракционные и спектральные свойства голографических элементов.

FEATURES OF OPTICAL PROPERTIES OF HOLOGRAPHIC STRUCTURES BASED ON PHOTOPOLYMER MATERIALS

Evgeny F. Pen

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)333-21-29, e-mail: pen@iae.nsk.su

Vladimir V. Shelkovnikov

Novosibirsk Institute of organic chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 9, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)330-89-96, e-mail: vsh@nioch.nsc.ru

The results of investigations of the diffraction and spectral properties of single and cascaded volume transmission and reflective holographic gratings are presented taking into account the physic and chemical features of photopolymer materials.

Key words: optical holography, photopolymer materials, diffraction and spectral properties of holographic elements.

Введение

Голографические фотополимерные материалы (ФПМ) обладают привлекательной совокупностью свойств и характеристик, таких как отсутствие мокрых процессов обработки, высокая дифракционная эффективность (ДЭ), низкие потери света, хорошая сохранность и устойчивость к воздействию вредных внешних факторов. В настоящее время ФПМ уже стали коммерческим продуктом [1], пригодным для широкого круга практических применений [1–3].

Вместе с тем ФПМ имеют специфические свойства, обусловленные внутренними физико-химическими процессами. Во-первых, это диффузионный механизм фотополимеризации [4], определяющий эффекты динамической записи и экспозиционные характеристики ФПМ, в частности, образование шумовых решеток, нарушение закона взаимозаместимости и др.; во-вторых, существенной является так называемая эффективная усадка фотополимера [5, 6], приводящая к нарушению брэгговских условий при восстановлении голограмм.

Цель данной работы – исследование дифракционных и спектральных свойств одиночных и комбинированных объемных пропускающих и отражательных голографических решеток с учетом особенностей ФПМ.

Обсуждение результатов экспериментов

Голограммы на основе ФПМ относятся к классу объемных, и должны формировать лишь первый порядок дифракции. Однако нами и другими авторами экспериментально обнаружены высокие порядки брэгговской дифракции на объемных пропускающих решетках [7]. Данный факт объясняется тем, что профиль периодического распределения показателя преломления в этих решетках существенно отличается от синусоидального вида картины засветки в силу нелинейной зависимости ДЭ решеток от интенсивности засветки, большой разницы скоростей диффузии мономера и фотополимеризации, а также насыщения изменения показателя преломления с ростом энергии засветки [1].

К сожалению, экспериментальные исследования, относящиеся к регистрации высоких порядков дифракции отражательных голограмм, крайне малочисленны. Вероятно, это связано со сложностью подобных экспериментов, поскольку необходимо получить объемные отражательные решетки с широким диапазоном их периодов и зафиксировать спектральные отклики, как основных решеток, так и значительно удаленных друг от друга гармоник.

Нам удалось решить эти задачи с помощью специально разработанной голографической установки и спектрофотометра SHIMADZU UV/VIS 2501 PC с двойным монохроматором. На рис. 1 представлен спектр пропускания одной из исследованных решеток.

Хорошо видны узкие провалы, обусловленные брэгговским отражением света, причем наряду с отражением (рефлексом), соответствующим основной решетке, отмеченным цифрой 1, присутствуют рефлексy, принадлежащие ее второй и третьей гармоникам. В результате обработки экспериментальных данных, установлено, что длина волны рефлекса основной решетки $\lambda_1^r \sim 904$ нм, ширина контура $\Delta\lambda_1^r \sim 8$ нм (на уровне 50% от его глубины), ДЭ составляет $\eta_1^r \approx 50$ %; для второй гармоники – $\lambda_2^r \sim 457$ нм, $\Delta\lambda_2^r \sim 4$ нм, и $\eta_2^r \approx 17$ %; для третьей – $\lambda_3^r \sim 313$ нм, $\Delta\lambda_3^r \sim 1$ нм и $\eta_3^r \approx 3$ %.

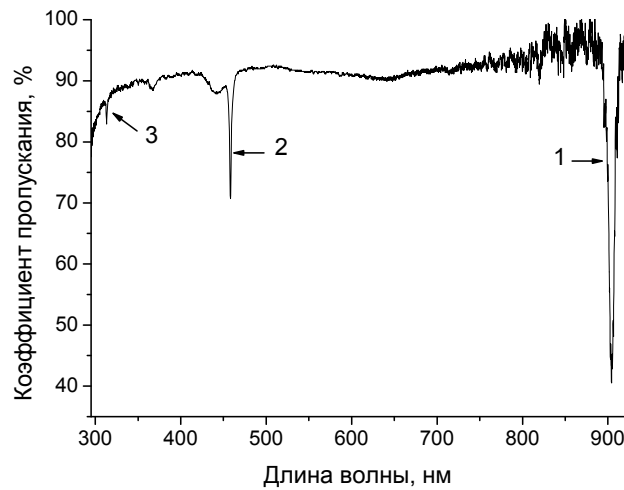


Рис. 1. Спектр пропускания объемной отражательной решетки:

1 – рефлекс основной решетки; 2 и 3 – рефлексy второй и третьей гармоник

Отметим, что экспериментальные значения длин волн указанных рефлексов λ^r отличаются от расчетных $\tilde{\lambda}^r$, которые могут быть найдены по формулам, приведенным в [6]. Эти отличия обусловлены, в частности, изменениями условий брэгговской дифракции, связывающих период объемной отражательной решетки Λ , показатель преломления n и длину волны рефлекса соотношением

$$\tilde{\lambda}^r = \Lambda \times 2n. \quad (1)$$

Такие изменения возникают в процессе записи решеток и пост-обработки ФПМ из-за вышеупомянутой эффективной усадки фотополимера $S_{effective}$, учитывающей как уменьшение его толщины T (геометрическая усадка), так и увеличение среднего значения n . Геометрическая усадка $\Delta T / T$, достигающая 0.01–0.02 [2, 6], приводит к пропорциональному уменьшению периода решетки, и, следовательно, к сдвигу рефлекса в коротковолновую область спектра, а увеличение показателя преломления фотополимера $\Delta n / n$, составляющее 0.005–0.01 [2], вызывает сдвиг рефлекса, наоборот, в длинноволновую область.

Очевидно, что отношения $\lambda^r / \tilde{\lambda}^r$ для рефлексов основной решетки и ее гармоник должны быть одинаковыми, поскольку независимо от периода решетки справедливо выражение

$$\lambda^r / \tilde{\lambda}^r = S_{effective} = (1 + \Delta n / n) \times (1 - \Delta T / T). \quad (2)$$

Вместе с тем расчеты показывают, что при длине волны лазера $\lambda = 633$ нм и показателе преломления ФПМ $n = 1.5$, период основной решетки равен 305.4 нм, длина волны ее рефлекса – $\tilde{\lambda}_1^r = 916$ нм, а второй и третьей гармоник – 458 нм и 305 нм. В таком случае соотношения экспериментальных и рас-

четных значений указанных рефлексов оказываются неодинаковыми и равными 0.9869; 0.9978; 1.0262 соответственно.

Для устранения этой нестыковки обратим внимание, что, согласно формуле (1), расчет длины волны рефлекса решетки должен проводиться с учетом дисперсии показателя преломления ФПМ $n(\lambda)$, т.е. его зависимости от длины волны наблюдения. Необходимые нам данные для ФПМ приведены в [2], где видно (с экстраполяцией), что в интервале длин волн 300–900 нм среднее значение показателя преломления изменяется от 1.545 до 1.490 и заметно отличается от ранее принятого нами постоянного значения $n=1.5$. Необходимое уточнение дало новые расчетные значения для решетки: $\tilde{\lambda}_1^r=910$ нм, $\tilde{\lambda}_2^r=460$ нм и $\tilde{\lambda}_3^r=315$ нм, с которыми экспериментальные данные соотносятся как 0.9934, 0.9935 и 0.9936, т.е. практически одинаково.

Таким образом, адекватное объяснение отличий экспериментальных и расчетных значений длин волн исследуемых рефлексов заключается в учете как эффективной усадки ФПМ, так и дисперсии его показателя преломления.

Свойства одиночных объемных пропускающих и отражательных голографических решеток к настоящему времени уже хорошо изучены. Менее исследованы слоистые структуры, состоящие из нескольких таких решеток, разделенных оптически однородными слоями, и обладающие особыми свойствами, обусловленными интерференцией волн, восстановленных из каждой решетки, что дает возможность управления видом угловой или спектральной селективности [8]. Подобные структуры могут быть использованы при создании элементов мультиплексоров/демультиплексоров в оптических линиях связи [9].

Схема одной из исследованных нами структур изображена на рис. 2, где *VHG1* и *VHG2* – две объемные отражательные решетки, разделенные стеклянной пластиной *L*. Длина волны лазерного излучения, а также значения углов падения пучков *R* и *S* относительно поверхности ФПМ определяют период образующейся решетки, а значит, и резонансную длину волны спектрального отклика при ее облучении белым светом.

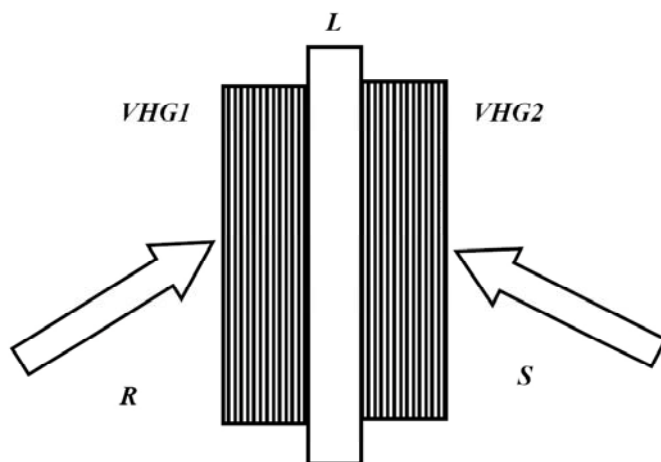


Рис. 2. Схема слоистой голографической отражательной структуры

По существу эти структуры являются аналогами классического интерферометра Фабри-Перо [10]. Особенности состоят лишь в свойствах зеркал резонатора, в качестве которых используются отражательные голографические брэгговские решетки. В свою очередь оптические, и в частности, спектральные свойства этих решеток зависят от характеристик ФПМ.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные спектра пропускания этой структуры с толщиной промежуточного слоя $L = 175$ мкм, сформированной с использованием He-Ne лазера.

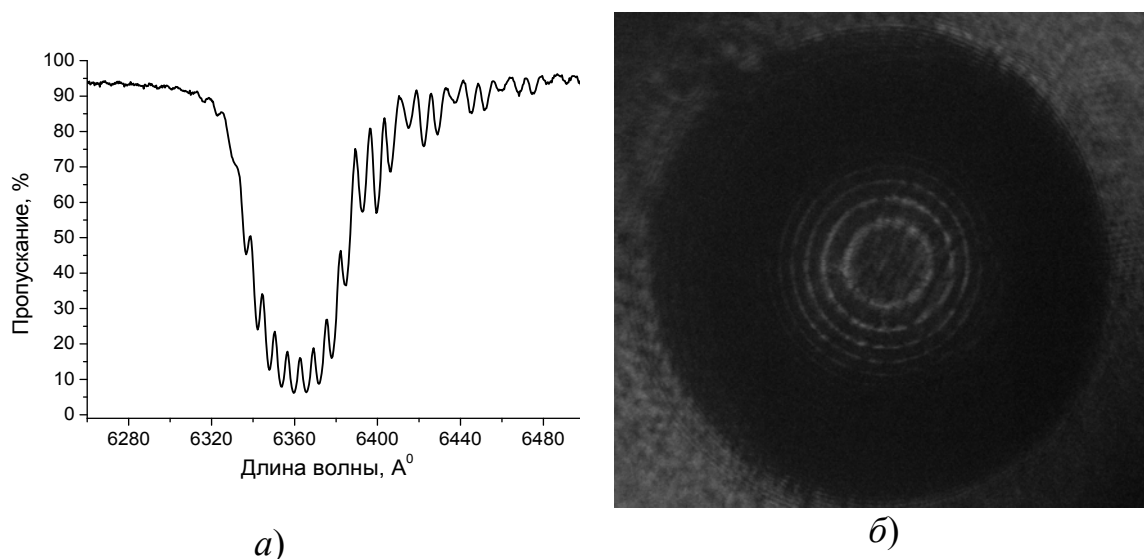


Рис. 3: а) график спектра пропускания слоистой структуры; б) вид интерференционной картины, являющейся пространственным аналогом спектра пропускания

На рис. 3, а хорошо виден глубокий провал пропускания центрального лепестка контура спектрального отклика, а также множество локальных спектральных полос пропускания как в области центрального, так и боковых лепестков, их период оказался равным $\sim 6.5 \text{ Å}^0$. С учетом потерь света на поглощение в слое фотополимера коэффициент отражения голографических решеток составлял $\sim 80\%$. На рис. 3, б представлена картина интерференции когерентного света, проходящего через исследуемую слоистую структуру аналогично интерферометру Фабри-Перо.

В целом эксперимент подтвердил ожидаемый эффект интерференционного взаимодействия волн, формируемых двумя брэгговскими решетками. Вместе с тем отметим отличия экспериментальных и расчетных данных, полученных путем использования модели многослойной системы тонких диэлектрических пленок [10]. Видно, что спектр несимметричен, боковые лепестки сглажены либо отсутствуют, пропускание локальных полос в области центрального лепестка мало. Эти отличия связаны с несовершенствами исследуемых структур двух видов: а) – поглощением света в ФПМ, паразитными переотражениями и дру-

гими шумами в оптической системе; б) – специфическими искажениями внутренней пространственной структуры голографических решеток, такими как изменение амплитуды модуляции показателя преломления из-за различной энергии засветки по глубине решетки и нарушение периодичности решетки вследствие усадки толщины ФПМ в процессе записи и постобработки голограмм [8].

Заключение

Дифракционные и спектральные характеристики голографических структур на основе ФПМ могут значительно отличаться от проектных параметров из-за влияния специфических свойств этих материалов, в частности, диффузионные процессы и нелинейность фото-отклика приводят к образованию высоких порядков дифракции, а усадка – к нарушению брэгговских условий угловой или спектральной селективности пропускающих и отражательных решеток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke and Thomas Rölle. The Chemistry and Physics of Bayfol HX Film Holographic Photopolymer // *Polymers*. – 2017. – 9 (10). – P. 472–494.
2. Friedrich-Karl Bruder, Hyungseok Bang, Thomas Fäcke et al. Precision Holographic Optical Elements in Bayfol HX Photopolymer // *Proc. of SPIE*. – 2016. – 9771. – P. 977103_1–21.
3. Akbari H., Naydenova I., Martin S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Appl. Opt.* – 2014. – 53. – P. 1343–353.
4. Zhao G. and Mouroulis P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials // *Journal of Modern Optics*. – 1994. – 41(10). – P. 1929–1939.
5. Stevenson Sylvia H., Steijn Kirk W. A Method for Characterization of Film Thickness and Refractive Index in Volume Holographic Materials // *Proc. of SPIE*. – 1995. – 2405. – P. 88–97.
6. Пен Е.Ф., Зарубин И.А., Шелковников В.В., Васильев Е.В. Методика определения параметров усадки голографических фотополимерных материалов // *Автометрия*. – 2016. – №1. – С. 60–69.
7. Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke, Rainer Hagen, Dennis Hönel, Enrico Orselli, et al. Second harmonics HOE recording in Bayfol HX // *Proc. of SPIE*. – 2015. – 9508. – P. 95080G_1–13.
8. Пен Е.Ф., Родионов М.Ю. Свойства многослойных неоднородных голографических структур // *Квантовая электроника*. – 2010. – 40 (10). – С. 919 – 924.
9. Dexing Yang, Haibin Wang, Xiarui Guo, et al. Wavelength demultiplexing with layered multiple Bragg gratings in LiNbO₃:Fe crystal // *Appl. Opt.* – 2007. – 46, No. 23. – P. 5604 – 5607.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М. : НАУКА, 1970. – 856 с.

REFERENCES

1. Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke and Thomas Rölle. The Chemistry and Physics of Bayfol HX Film Holographic Photopolymer // *Polymers*. – 2017. – 9 (10). – P. 472–494.
2. Friedrich-Karl Bruder, Hyungseok Bang, Thomas Fäcke et al. Precision Holographic Optical Elements in Bayfol HX Photopolymer // *Proc. of SPIE*. – 2016. – 9771. – P. 977103_1–21.
3. Akbari H., Naydenova I., Martin S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Appl. Opt.* – 2014. – 53. – P. 1343.
4. Zhao G. and Mouroulis P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials // *Journal of Modern Optics*. – 1994. – 41(10). – P. 1929–1939.

5. Stevenson Sylvia H., Steijn Kirk W. A Method for Characterization of Film Thickness and Refractive Index in Volume Holographic Materials // Proc. of SPIE. – 1995. – 2405. – P. 88–97.
6. Pen E. F., Zarubin I. A., Shelkovnikov V. V., and Vasil'ev E. V.. Method for Determining the Shrinkage Parameters of Holographic Photopolymer Materials // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2016. – Vol. 52, No. 1. – PP. 49–56.
7. Friedrich-Karl Bruder, Thomas Fäcke, Rainer Hagen, Dennis Hönel, Enrico Orselli, et al. Second harmonics HOE recording in Bayfol HX // Proc. of SPIE. – 2015. – 9508. – P. 95080G_1–13.
8. Pen E. F., Rodionov M. Yu. Properties of multilayer nonuniform holographic structures // QUANTUM ELECTRON – 2010 – 40(10) – P. 919–924.
9. Dexing Yang, Haibin Wang, Xiarui Guo, et al. Wavelength demultiplexing with layered multiple Bragg gratings in LiNbO₃:Fe crystal // Appl. Opt. – 2007. – 46, No. 23. – P. 5604 – 5607.
10. Born M., Wolf E. Principles of optics. 7-th edition. – Cambridge University Press, 1999. – 936 p.

© *Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, 2018*

ОПТИЧЕСКИЕ АКСИКОНЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ВАКУУМНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Валерий Игоревич Наливайко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Марина Александровна Пономарева

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ст. преподаватель, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-оптик, тел. (383)333-30-92, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su

Александр Евгеньевич Колдаев

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент кафедры оптических информационных технологий, e-mail: koldaev11195@mail.ru

Приведены результаты исследования пленочного аксикона, изготовленного с помощью вакуумного напыления тонкой халькогенидной пленки состава As_2S_3 . Напыление проводилось через маску с профилем, обеспечивающим линейное распределение толщины в зависимости от радиуса подложки. Аксикон обеспечивает рекордные величины сфокусированного отрезка до 90 м. Приведены результаты расчетов длины и диаметра фокусных отрезков для видимого и терагерцового излучения.

Ключевые слова: аксикон, фокусный отрезок, вакуумное напыление, терагерцовое излучение.

OPTICAL AXICONS OBTAINED BY VACUUM DEPOSITION

Valery I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Marina A. Ponomareva

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su; Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)333-30-92, e-mail: ponomareva@iae.nsk.su

Alexandr E. Koldaev

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student, Department of Optical Information, e-mail: koldaev11195@mail.ru

The results of an investigation of a film axicon fabricated by vacuum deposition of a thin chalcogenide film of As_2S_3 composition are presented. Deposition was carried out through a mask with a profile providing a linear thickness distribution depending on the substrate radius. Axicon provides record values of the focused distance up to 100 m. The results of calculations of the length and diameter of the focused distances for visible and terahertz radiation are presented.

Key words: axicon, focused distance, vacuum deposition, terahertz radiation.

Аксиконы – это оптические элементы, одна из сторон которых имеет коническую форму, а вторая сторона – плоская (рис. 1). Активное исследование аксиконов началось в 1954 году [1]. С тех пор аксиконы нашли применение в таких областях, как формирование плазменных каналов [2,3], оптические системы с увеличенной глубиной фокуса [4-6], когерентная оптическая томография [7,8], лазерная обработка материалов [9,10], генерация фемтосекундных лазерных импульсов [11], создание оптических ловушек для захвата частиц [12] и многие другие.

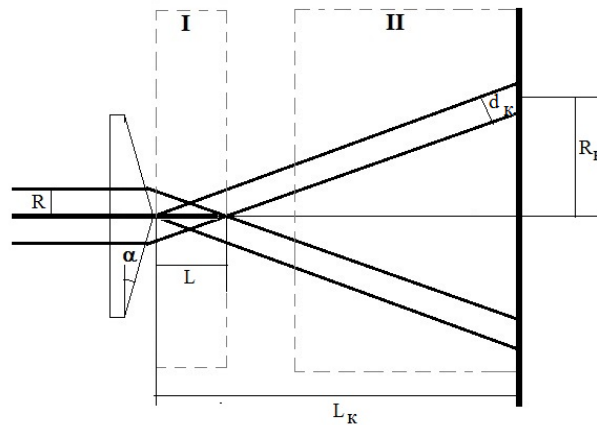


Рис. 1. Принципиальная схема работы аксикона:

I – ближняя область, II – дальняя область

Работа аксикона как линейного оптического элемента имеет свои особенности. В пространстве за аксиконом условно можно выделить две области, каждая из которых имеет свое применение. Область I – ближняя область – начинается сразу за аксиконом. В этой области аксикон генерирует узкий протяженный фокусный отрезок. Область II – дальняя область – начинается после области I и в ней аксикон формирует кольца. Ширина колец остается постоянной независимо от расстояния до аксикона, а изменяется только их диаметр.

Протяженность этих областей определяется параметрами самого аксикона, а именно показателем преломления n материала, из которого сделан аксикон, углом аксикона α , а также радиусом пучка света, падающего на аксикон R .

При этом, длина фокусного отрезка L определяется как [3,7]:

$$L = \frac{R}{(n-1)\alpha},$$

а ширина t_κ и радиус R_κ колец в области II на расстоянии L_κ от аксикона находится из геометрических соображений:

$$t_\kappa = \frac{R}{2} \quad \text{и} \quad R_\kappa = 2L_\kappa \operatorname{tg}((n-1)\alpha).$$

Промышленно изготавливаемые оптические аксиконы имеют углы от $0,5^\circ$ до 20° . В табл. 1 приведены значения указанных характеристик аксиконов из стекла К-8 диаметром 2,5 см для разных значений углов аксикона α . Видно, что для применения аксикона в области II хорошо подходят аксиконы с большим углом α . Но если необходимо получить длинный фокусный отрезок, то угол аксикона приходится уменьшать, и в связи с этим усложняется технология его производства.

Таблица 1

Параметры аксиконов в зависимости от угла α
для излучения с $\lambda = 0,63$ мкм

$\alpha, ^\circ$	$L, \text{ см}$	$L_K, \text{ см}$	$R_K, \text{ см}$
0,5	275	400	11
		600	16
1	138	200	11
		300	16
10	13,8	20	11
		50	28
20	7	20	24
		50	58

Рассмотрим подробнее применение аксиконов в качестве генератора узкого протяженного фокального отрезка. Аксикон создает так называемый бездифракционный пучок, профиль интенсивности которого остается неизменным при распространении в свободном пространстве. Профиль его интенсивности в поперечном сечении имеет вид функции Бесселя нулевого порядка первого типа [13]. Такие пучки называются бесселевыми в отличие от гауссовых, которые испытывают дифракционное расширение при распространении. Диаметр центрального пятна бесселева пучка определяется из положения первого минимума функции Бесселя:

$$d = \frac{2.4\lambda}{\pi\alpha(n-1)}.$$

Объемные аксиконы изготавливаются, как и любой оптический элемент, с помощью шлифования или прессования. Для микроаксиконов с диаметром меньше 1 мм также используют технологии лазерной записи [14], фотополимеризации [15]. Обычно аксиконы имеют углы порядка 10° - 30° , этому соответствуют длины фокусных отрезков порядка 1-20 см. Меньшие углы сделать проблематично. А если необходимы фокусные отрезки в десятки метров, то углы должны составлять меньше одного градуса.

Поэтому в нашей работе аксикон изготавливался с помощью вакуумного напыления халькогенидной пленки состава As_2S_3 на подложку из плавленого кварца. Напыление халькогенидного слоя проводилось через вращающуюся мас-

ку, расположенную на расстоянии 1 мм от подложки. Форма маски (рис. 2, а) соответствовала нанесению слоя с толщиной, линейно изменяющейся по радиусу. Толщина халькогенидного слоя изготовленного образца (рис. 2, б) уменьшалась от центра к периферии. Измерения толщины напыленных слоев (рис. 2, в) проводилась с помощью лазерного интерферометра ФТИ-1000PS, разработанного в ИАиЭ СО РАН, по методике, используемой для определения профилей тонких пленок [16].

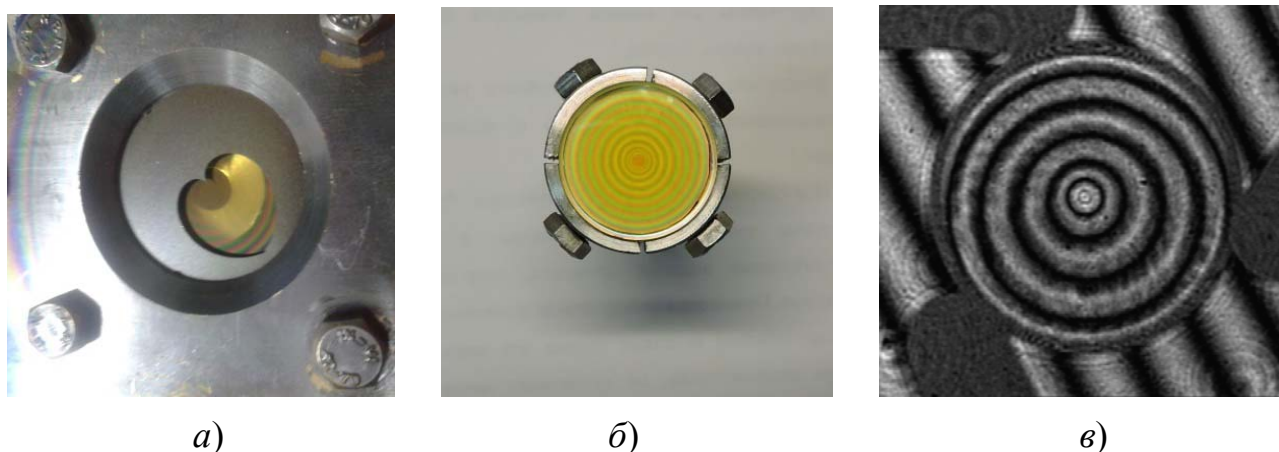


Рис. 2: а) маска для напыления аксикона; б) фотография аксикона в отраженном свете; в) интерферограмма изготовленного аксикона в проходящем свете на $\lambda = 0,63$ мкм

Обработанная профилограмма аксикона приведена на рис. 3, из которой видно линейное нарастание толщины пленки ХСП от края к центру образца.

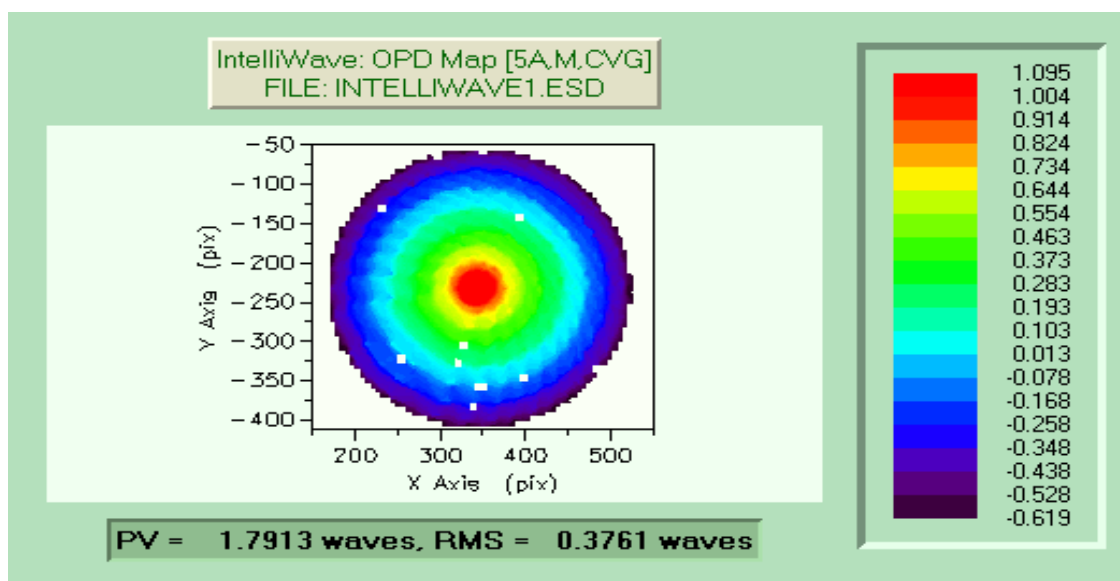


Рис. 3. Оптическая профилограмма изготовленного аксикона

Изготовленный аксикон имел следующие параметры: диаметр – 2,5 см, толщина слоя в центре аксикона – 1 мкм, показатель преломления – 2,7 на длине волны 0,63 мкм. Рассчитанный угол α для этих параметров аксикона составлял 8×10^{-5} рад или 17". Изготовление такого аксикона механической обработкой крайне затруднительно из-за отсутствия средств контроля при изготовлении.

При этом расчетная длина фокусного отрезка при использовании всей площади аксикона составила порядка 90 м.

Диаметры фокусного отрезка в зависимости от диаметра падающего пучка измерялись на различных расстояниях от аксикона с помощью CCD камеры. На рис. 4 приведены фотографии фокусного пятна на расстоянии 6 м от аксикона для различных значений диаметра падающего пучка. Видно, что размер центрального пятна при уменьшении диаметра падающего пучка практически не изменяется и составляет порядка 1 мм, что подтверждает бездифракционную природу бесселева пучка, даваемого аксиконом.

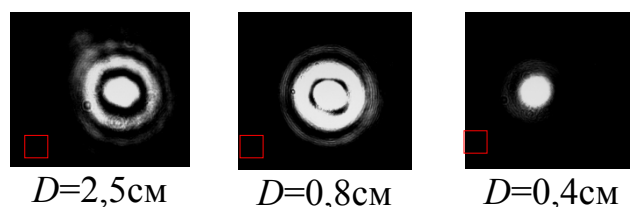


Рис. 4. Размер фокусного пятна на расстоянии 6 м от аксикона для различных диаметров D падающих пучков с $\lambda = 0,64$ мкм (масштаб представлен в виде красного квадрата со стороной 1 мм)

Некоторые халькогенидные стекла имеют малое поглощение в терагерцовом диапазоне излучения [17]. В этом диапазоне востребованы аксиконы для фокусировки излучения [18-20]. Поэтому в табл. 2 приведены для сравнения параметры формируемых аксиконами бесселевых пучков в оптическом и терагерцовом спектральных диапазонах.

Если в оптическом диапазоне для формирования фокусного отрезка диаметром 3,5 мм достаточно аксикона с углом 17", то для терагерцового излучения с $\lambda = 500$ мкм необходимо увеличить угол до 5° , чтобы получить диаметр пучка 2,5 мм. Чтобы изготовить аксикон с углом 5° диаметром 2,5 см, толщина аксикона в центре должна составлять 1 мм.

Таким образом экспериментально показана возможность изготовления оптических аксиконов с фокусными отрезками большой величины. Технология изготовления включает вакуумное напыление слоев халькогенидного стекла переменной толщины, которая линейно изменяется в зависимости от радиуса подложки.

Сравнение параметров аксиконов для видимого и терагерцового излучений

λ , мкм	Диаметр пучка, падающего на аксикон D , см	Угол аксикона α	Диаметр центрального пятна d	Длина фокусного отрезка L , м
0,63	2,5	17''	3,5 мм	92
	1			37
	0,5			18
	2,5	0,5°	32 мкм	0,84
	1			0,33
	0,5			0,17
500	2,5	0,5°	26 мм	0,84
	1			0,33
	0,5			0,17
	2,5	2°	6,4 мм	0,21
	1			0,084
	0,5			0,042
	2,5	5°	2,5 мм	0,084
	1			0,033
	0,5			0,017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mcleod J.H. The axicon: a new type of optical element // J. Opt. Soc. Am. – 1954. – V.44. – P. 592-597.
2. Пятницкий Л.Н. Оптический разряд в поле лазерного бесселева пучка // Успехи физических наук. – 2010. – Т.180. – № 2. – С.165-185
3. Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. – М.: Физматлит, 2012. – 408 с.
4. Khonina S.N., Ustinov A.V. Lenses to form a longitudinal distribution matched with special functions // Opt.Comm. – 2014. – V.341. – P.114-121.
5. Wereley S., Zhang Y., Khor J.-W., Snoeyink C. Single-acquisition wide-field super resolution for telescopes // Appl. Opt. – 2016. – V.55. – N.35. – P.10025-10029.
6. Saikaley A., Chebbi B., Golub I. Imaging properties of three refractive axicons // Appl. Opt. – 2013. – V.52. – P. 6910-6918.
7. Weber N., Spether D., Seifert A., Zappe H. Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultra miniaturized multi-micro-axicon systems // J. Opt. Soc. Am. A. – 2012. – V.29 – P.808-816.
8. Ding Zh., Ren H., Zhao Y., Nelson J. S., ChenZh. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens // Opt.Lett. – 2002. – V.27. – N.4. – P.243-245.
9. Dudutis J., GeČys P., RaČiukaitis G. Non-ideal axicon-generated Bessel beam application for intra-volume glass modification // Opt. Express. – 2016. – V.24. – P. 28433-28443.
10. Wu P., Sui Ch., Huang W. Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation // Photon. Res. – 2014. – V.2. – P.82-86.
11. Summers A. M., Yu X., Wang X., Raoul M., Nelson J., Todd D., Zigo S., Lei Sh., Trallero-Herrero C.A. Spatial characterization of Bessel-like beams for strong-field physics // Opt. Express. – 2017. – V.25. – N.3. – P.1646-1655.

12. Kampmann R., Chall A.K., Kleindienst R., Sinzinger S. Optical system for trapping particles in air // *Appl. Opt.* – 2014. – V.53. – P.777-784.
13. Durnin J., Miceli, Jr J.J., Eberly J.H. Diffraction-Free Beams // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V.58. – P. 1499-1501.
14. Huang H., Chen Sh., Zou H., Li Q., Fu J., Lin F., Wu X. Fabrication of micro-axicons using direct-laser writing // *Opt. Express.* – 2014. – V.22 – P.11035-11042.
15. Žukauskas A., Malinauskas M., Reinhardt C., Chichkov B.N., Gadonas R. Closely packed hexagonal conical microlens array fabricated by direct laser photo polymerization // *Appl. Opt.* – 2012. – V.51. – P.4995-5003.
16. Chen Q., Zhang Y., Qiu Ch., Wan Y., Hou X. Method for measuring the cone angle and the shape of the axicon simultaneously using computer-generated holograms // *Appl. Opt.* – 2015. – V.54. – P.8290-8292.
17. Мамрашев А.А., Наливайко В.И., Николаев Н.А. Оптические свойства халькогенидных стекол в терагерцовой области спектра // *Известия РАН. Серия Физическая.* – 2013. – Т.77. – № 9. – С. 1327–1329.
18. Wu Zh., Wang X., Sun W., Feng Sh., Han P., Ye J., Yu Y., Zhang Y. Vectorial diffraction properties of THz vortex Bessel beams // *Opt. Express.* – 2018. – V.26. – P.1506-1520.
19. Khonina S. N., Degtyarev S. A. Analysis of the formation of a longitudinally polarized optical needle by a lens and axicon under tightly focused conditions // *J. Opt. Technol.* – 2016. – V.83. – P.197-205.
20. Агафонов А.Н., Володкин Б.О., Павельев В.С., Тукмаков К.Н., Кавеев А. К., Качалов Д.Г., Князев Б.А., Кропотов Г.И., Чопорова Ю.Ю. Фокусировка излучения Новосибирского лазера терагерцового диапазона (NOVOFEL) в соосный отрезок // *Комп.оптика.* – 2015. – Т.39. – № 1. – С.58-63.

REFERENCES

1. Mcleod J.H. (1954). The axicon: a new type of optical element. *J. Opt. Soc. Am.*, 44, 592-597. doi:10.1364/JOSA.44.000592.
2. Pyatnitskii L.N. (2010). Optical discharge in the field of a bessel laser beam. *Physics-Uspekhi*, 53(2), 159-177.
3. Pyatnitskii L.N. (2012). *Volnovye besselevy puchki*. Moscow: Physmatlit [in Russian].
4. Khonina S.N., Ustinov A.V. (2014). Lenses to form a longitudinal distribution matched with special functions. *Opt. Comm.*, 341, 114-121. doi: 10.1016/j.optcom.2014.12.023.
5. Wereley S., Zhang Y., Khor J.-W., Snoeyink C. (2016). Single-acquisition wide-field super resolution for telescopes. *Appl. Opt.*, 55(35), 10025-10029. doi: 10.1364/AO.55.010025.
6. Saikaley A., Chebbi B., Golub I. (2013). Imaging properties of three refractive axicons. *Appl. Opt.*, 52, 6910-6918. doi: 10.1364/AO.52.006910.
7. Weber N., Spether D., Seifert A., Zappe H. (2012). Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultra miniaturized multi-micro-axicon systems. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 29, 808-816. doi: 10.1364/JOSAA.29.000808.
8. Ding Zh., Ren H., Zhao Y., Nelson J. S., ChenZh. (2002). High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens. *Opt. Lett.*, 27(4), 243-245. doi: 10.1364/OL.27.000243.
9. Dudutis J., GeČys P., RaČiukaitis G. (2016). Non-ideal axicon-generated Bessel beam application for intra-volume glass modification. *Opt. Express.*, 24, 28433-28443. doi: 10.1364/OE.24.028433.
10. Wu P., Sui Ch., Huang W. (2014). Theoretical analysis of a quasi-Bessel beam for laser ablation. *Photon. Res.*, 2, 82-86. doi: 10.1364/PRJ.2.000082.
11. Summers A. M., Yu X., Wang X., Raoul M., Nelson J., Todd D., Zigo S., Lei Sh., Trallero-Herrero C.A. (2017). Spatial characterization of Bessel-like beams for strong-field physics. *Opt. Express.*, 25(3), 1646-1655. doi: 10.1364/OE.25.001646.

12. Kampmann R., Chall A.K., Kleindienst R., Sinzinger S. (2014). Optical system for trapping particles in air. *Appl. Opt.*, 53, 777-784. doi: 10.1364/AO.53.000777.
13. Durnin J., Miceli, Jr J.J., Eberly J.H. (1987). Diffraction-Free Beams. *Phys. Rev. Lett.*, 58, 1499-1501. doi: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
14. Huang H., Chen Sh., Zou H., Li Q., Fu J., Lin F., Wu X. Fabrication of micro-axicons using direct-laser writing. (2014). *Opt. Express.*, 22, 11035-11042. doi: 10.1364/OE.22.011035.
15. Žukauskas A., Malinauskas M., Reinhardt C., Chichkov B.N., Gadonas R. (2012). Closely packed hexagonal conical microlens array fabricated by direct laser photopolymerization. *Appl. Opt.*, 51, 4995-5003. doi: 10.1364/AO.51.004995.
16. Chen Q., Zhang Y., Qiu Ch., Wan Y., Hou X. (2015). Method for measuring the cone angle and the shape of the axicon simultaneously using computer-generated holograms. *Appl. Opt.*, 54, 8290-8292. doi: 10.1364/AO.54.008290.
17. Mamrashev A.A., Nalivaiko V.I., Nikolaev N.A. (2013). Optical properties of chalcogenide glasses in the terahertz spectral region. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.*, 77(9), 1161-1163. doi: 10.7868/S0367676513090299.
18. Wu Zh., Wang X., Sun W., Feng Sh., Han P., Ye J., Yu Y., Zhang Y. (2018). Vectorial diffraction properties of THz vortex Bessel beams. *Opt. Express.*, 26, 1506-1520. doi: 10.1364/OE.26.001506.
19. Khonina S. N., Degtyarev S. A. (2016). Analysis of the formation of a longitudinally polarized optical needle by a lens and axicon under tightly focused conditions. *J. Opt. Technol.*, 83, 197-205. doi: 10.1364/JOT.83.000197.
20. Agafonov A.N., Volodkin B.O., Kaveev A.K., Kachalov D.G., Knyazev B.A., Kropotov G.I., Tukmakov K.N., Pavelyev V.S., Tsypishka D.I., Choporova Y.Y. (2015). Binary doe with elongated focal depth to focus terahertz free electron laser radiation (NOVOFEL). *Computer Optics*, 39(1), 58-63. doi:10.18287/0134-2452-2015-39-1-58-63(In Russian).

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, А. Е. Колдаев, 2018

ТРЕХМЕРНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Аскар Асанбекович Кутанов

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, доктор технических наук, академик НАН КР, зав. лабораторией «Лазерные технологии», тел. (996)312-64-26-77, e-mail: askarktnv@gmail.com

Нурбек Сыдык уулу

Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика Ж. Жеенбаева Национальной Академии наук Кыргызской Республики, 720071, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 265а, научный сотрудник, лаборатории «Лазерные технологии», тел. (996)312-64-26-77, e-mail: s.nurbek@mail.ru

Замиргуль Мукамбетовна Казакбаева

Кыргызско-Турецкий университет Манас, 720042, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 56, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии, тел. (996)312-49-27-88, e-mail: zamirgul@gmail.com

Представлены результаты трехмерной лазерной записи изображений на пленках аморфного кремния интерференционного фильтра сфокусированным излучением однододового полупроводникового лазера с $\lambda = 405$ nm. Прямая лазерная запись проводилась на пленки аморфного кремния толщиной $\sim 1-3$ мкм при изменении глубины фокуса записи в объеме регистрирующей среды. При локальном воздействии сфокусированным излучением на слой аморфного кремния наносекундными импульсами происходит его переход в кристаллическое состояние. За счет рассеяния света на оптических неоднородностях среды после лазерной записи и различной фазы рассеянных волн визуально можно наблюдать трехмерные сцены. Предложенный способ трехмерной лазерной записи на слое аморфного кремния a-Si привлекателен для создания 3D принтера для записи изображений и дот матрикс голограмм.

Ключевые слова: трехмерная лазерная запись, слой аморфного кремния, лазер Blu-ray, Рэлеевское рассеяние, точечные голограммы, лазерное излучение, 3D принтер.

3D LASER IMAGE RECORDING ON AMORPHOUS SILICON LAYER

Askar A. Kutanov

Institute of physics-technical problems named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, D. Sc., NAS KR Academician, Head of Laboratory of Laser Technologies, phone: (996)312-64-26-77, e-mail: askarktnv@gmail.com

Nurbek Sydyk uluu

Institute of physics-technical problems named after academician J. Jeenbaev National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 265a, Prospect Chui St., Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, Researcher, Laboratory of Laser Technologies, phone: (996)312-64-26-77, e-mail: s.nurbek@mail.ru

Zamirgul M. Kazakbaeva

Kyrgyz Turkish Manas University, 56 Prospect Mira, Bishkek, 720042, Kyrgyz Republic, Ph. D., Associate Professor, Department of Computer Engineering, phone: (996)312-49-27-88, e-mail: zamirgul@gmail.com

The results of three-dimensional laser recording of images on the amorphous silicon layer of the interference filter by focused radiation from a semiconductor laser with $\lambda = 405$ nm is demonstrated. Direct laser recording was carried out to the amorphous silicon layer with a thickness of $\sim 1-3$ μm under change in the depth of the recording focus in the recording medium volume. Local amorphous silicon transition to a crystalline state occurs under interaction of focused radiation to a-Si layer with nanosecond pulses. Due to light scattering on optical inhomogeneities after laser recording on a-Si layer and different phase of the scattered waves, the three-dimensional scenes are well observed for human eyes. This method of 3D laser recording on a-Si is attractive for creating a 3D image printer.

Key words: 3D laser recording, amorphous silicon film, Blu Ray laser, Rayleigh scattering, Dot holograms, laser radiation, 3D printer.

Введение

Прямая лазерная запись на слое аморфного кремния является привлекательной для записи дифракционных структур без мокрой химической обработки, и открывает новые возможности изготовления и применений дифракционных структур с использованием лазерного записывающего устройства [1-4]. Один из простых применений дифракционных структур – это антиотражающие покрытия на основе субволновых решеток [3] с периодом около половины длины волны света. Применение скоростных сканирующих систем интерференционной литографии (СИЛ) или голографического принтера [1-3], формирующих дифракционные структуры путем последовательной записи небольших фрагментов или ячеек, привлекательно для получения дифракционных структур, дот матрикс голограмм, создания микро- и наноструктур с помощью лазерного излучения. С помощью СИЛ микроструктурирование поверхности осуществляется путем последовательной записи микрорешеток, сформированных интерференцией двух когерентных сфокусированных лазерных пучков и регистрацией в светочувствительном материале.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможностей трехмерной лазерной записи в объеме толстой пленки аморфного кремния под действием наносекундных импульсов сфокусированного лазерного излучения. Исследование возможностей использования пленок аморфного кремния в качестве трехмерной среды для прямой лазерной записи и создания 3D принтера.

Эксперименты

Экспериментальная часть работы базируется на отработанной технологии получения толстых пленок аморфного кремния магнетронным нанесени-

ем и на экспериментальных результатах по разработке интерференционных фильтров, полученных методом магнетронного нанесения пленок аморфного кремния на предварительно нанесенный металлический слой на стеклянной подложке [4, 5].

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Для прямой записи на аморфном кремнии использовался одномодовый полупроводниковый лазер с $\lambda = 405 \text{ nm}$ мощностью 120 мВт. Лазерный пучок коллимировался асферической линзой, а затем фокусировался микрообъективом на регистрирующую среду. Глубина фокуса изменялась для записи отдельных фрагментов изображения. Перетяжка формируемого лазерного пучка позволяла сохранять необходимую плотность энергии записи на аморфном кремнии. Компьютер контролировал длительность лазерных импульсов, их частоту, и движение координатного стола. Для прямой лазерной записи использовались пленки аморфного кремния различной толщины $\sim 1\text{-}3 \text{ мкм}$. При взаимодействии сфокусированного лазерного луча на слой a-Si происходит локальная кристаллизация и формирование рельефной структуры [6].

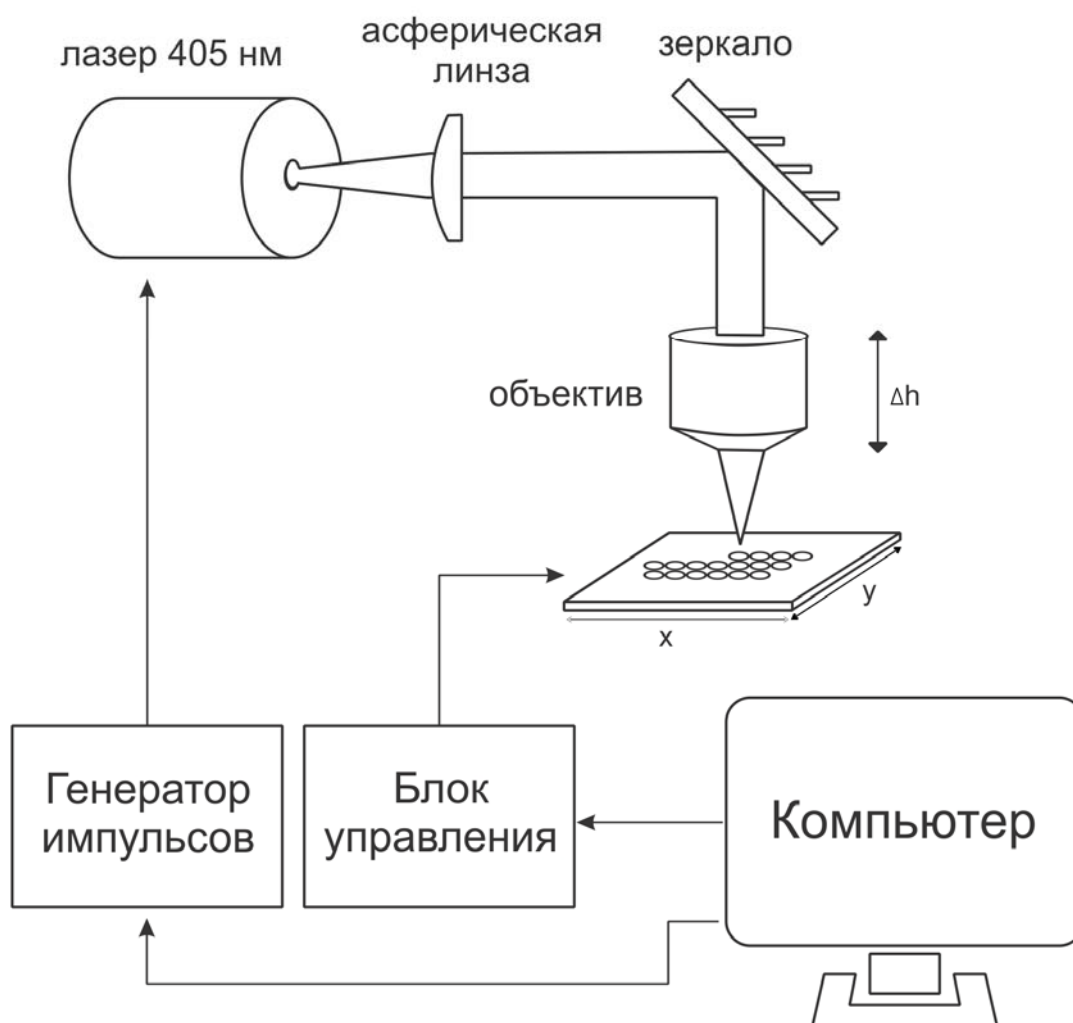


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

За счет рассеяния Рэлея на локальных оптических неоднородностях показателя преломления среды, возникших при трехмерной лазерной записи, можно наблюдать трехмерные сцены за счет различной фазы рассеянных волн (рис. 2).

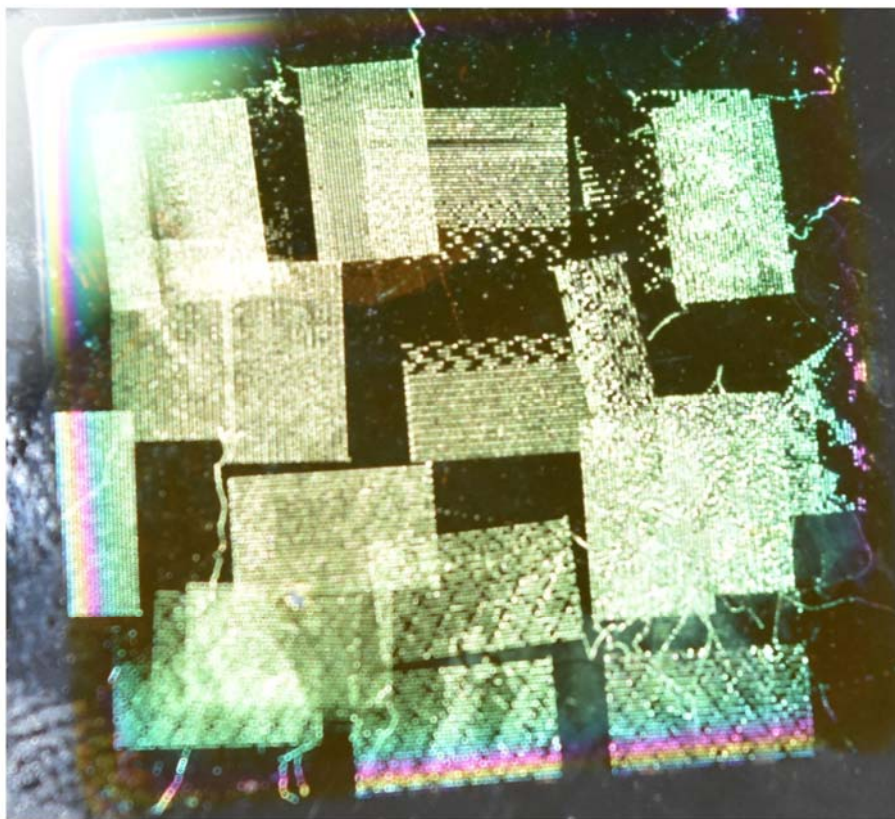


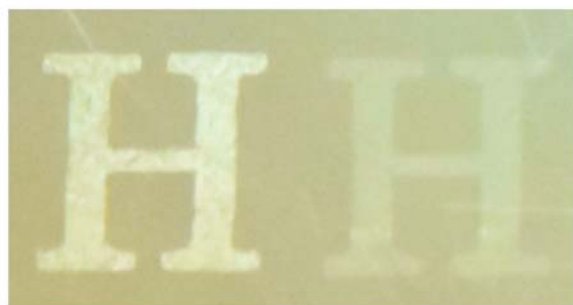
Рис. 2. Фотография 3D изображения записанного на пленке a-Si

Визуально наблюдается одно изображение над другим (рис. 2) для прямой лазерной записи в толстых пленках аморфного кремния. За счет изменения длительности импульса лазерного излучения и изменения размера записываемых структур на a-Si изменяется спектр рассеянного на них излучения от источника света со сплошным спектром. Экспериментально продемонстрировано, что в зависимости от размера элементов записанной структуры наблюдается рассеянное излучение в голубом или бордовом цвете. Для определения длины волны рассеянного излучения использовался метод сравнения. Измерения выполнялись на УФ спектрофотометре SP8-100. Длина волны рассеянного излучения в голубой области спектра на структуре записи на аморфном кремнии составила 490 ± 10 нм. Интенсивность рассеянного света пропорциональна концентрации плотности точечных элементов записи ($\sim N$).

На рис. 3 приведены фотографии изображения буквы Н, записанных на поверхности и в глубине слоя a-Si, снятых для различных углов падения света на пластинку.



а)



б)

Рис. 3. Фотографии изображения двух букв Н, записанных на поверхности (*а*) и в глубине слоя а-Si (*б*)

При наблюдении в нулевом порядке отраженного света от поверхности слоя аморфного кремния изображение, записанное в глубине слоя аморфного кремния, становится скрытым. Таким образом, регистрация изображения в глубине слоя аморфного кремния может использоваться в качестве скрытого изображения для применений в области защиты от копирования.

Благодаря высокому разрешению записи с изменением показателя преломления и отсутствию мокрой химической обработки, прямая лазерная запись на пленках аморфного кремния является привлекательной для записи дифракционных структур, создания микро- и наноструктур с помощью сфокусированного лазерного излучения.

Заключение

Экспериментально показаны возможности использования пленок аморфного кремния в качестве трехмерной среды для оптической лазерной записи. Представлены результаты трехмерной лазерной записи изображений в объеме слоя аморфного кремния. За счет изменения длительности импульса лазерного излучения и изменения размера записываемых структур на а-Si изменяется спектр рассеянного на них излучения от источника света со сплошным спектром. Предложенный способ трехмерной лазерной записи на а-Si привлекателен для создания 3D принтера с записью изображений и дот матрикс голограмм.

Благодарности

Нурбек Сыдык уулу выражает признательность Всемирной Федерации ученых, Лозанна, Швейцария, за предоставление стипендии для молодых ученых на проведение исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poleshchuk A. G., Kutanov A.A. et al. Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures Optoelectronics/ Instrumentation and Data Processing.– 2010.– Vol. 46. – No. 2. – pp. 171-180.
2. Кутанов А.А., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Исследование лазерной записи на пленках аморфного кремния для интерференционной литографии // Журнал Доклады НАН КР. – 2015. – №2 . – С.19-26.
3. Schopf R. E. Antireflective Submicrometer Surface-Relief Gratings for Solar Applications / Schopf R. E. T. Hultsch, J. Lotz, et al. // Solar Energ. Mater. Solar Cells. – 1998. – 54 (1). – pp. 333-342
4. Kutanov, A.A., Snimshikov I., & Sydyk uulu N. (2015). Direct Laser Recording on Amorphous Silicon Film. Physics Procedia 2015. – Vol. 73. – pp. 82-86.
5. Kutanov, A.A., Sydyk uulu, N., Snimshikov I., & Kazakbaeva, Z.M. (2016). Interference filter with amorphous silicon layer and direct laser recording on it. Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 737.– N. 1. (012025).
6. Полешук А.Г., Кутанов А.А., Бесмельцев В.П, Снимщиков И.А. Устройство для записи дифракционных элементов. – Евраз. патент № 007874, 2007. – Оpubл. Бюл. № 1.

REFERENCES

1. Poleshchuk A. G., Kutanov A.A. et al. Microstructuring of Optical Surfaces: Technology and Device for Direct Laser Writing of Diffractive Structures Optoelectronics/ Instrumentation and Data Processing. – 2010. – Vol. 46. – No. 2. – pp. 171-180.
2. Кутанов А.А., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Исследование лазерной записи на пленках аморфного кремния для интерференционной литографии // Журнал Доклады НАН КР. – 2015. – №2 . – С.19-26.
3. Schopf R. E. Antireflective Submicrometer Surface-Relief Gratings for Solar Applications/ Schopf R. E. T. Hultsch, J. Lotz, et al.//Solar Energ. Mater. Solar Cells. – 1998. – 54 (1). – pp.333-342
4. Kutanov, A.A., Snimshikov I., & Sydyk uulu N. (2015). Direct Laser Recording on Amorphous Silicon Film. Physics Procedia. – 2015.– Vol. 73. – pp.82-86.
5. Kutanov, A.A., Sydyk uulu, N., Snimshikov I., & Kazakbaeva, Z.M. (2016). Interference filter with amorphous silicon layer and direct laser recording on it. Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 737.– N. 1. (012025).
6. Полешук А.Г., Кутанов А.А., Бесмельцев В.П, Снимщиков И.А. Устройство для записи дифракционных элементов. – Евраз. патент № 007874, 2007. – Оpubл. Бюл. № 1.

© А. А. Кутанов, Нурбек Сыдык уулу, З. М. Казакбаева, 2018

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ ФОКУСАТОРОВ

Петр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, директор, зав. лабораторией, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Максим Сергеевич Кравченко

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, инженер, тел. (383)306-59-40, e-mail: max@tdisie.nsc.ru

Марк Владимирович Савченко

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, программист, тел. (383)306-59-40, e-mail: savchenko_mark@bk.ru

Виталий Викторович Уржумов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, техник, тел. (383)306-59-40; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, e-mail: vitaliy010195@mail.ru

Рассмотрен оптико-электронный метод контроля торцевой поверхности цилиндрических объектов с применением дифракционных фокусаторов на примере имитаторов топливных таблеток тепловыделяющих сборок атомных энергетических реакторов. Метод основан на формировании с помощью дифракционных фокусаторов световой структуры в виде набора точек с определенными параметрами на торцевой поверхности имитаторов топливных таблеток и считывании стереоизображений цифровыми камерами. Представлена стереоскопическая структурная схема устройства, основанная на данном методе. Описан алгоритм программной обработки стереоизображений, связанный с распознаванием световой структуры, поиском соответствий на стереоизображениях и вычислений реальных трехмерных координат поверхности исследуемого объекта. Продемонстрирован экспериментальный стереоскопический стенд со структурным освещением и использованием дифракционных фокусаторов, а также результаты исследований с определением 3D-профиля торцевой поверхности имитаторов ядерных топливных таблеток.

Ключевые слова: топливная таблетка, стереоизображение, дифракционный фокусатор, структурное освещение.

STEREOSCOPIC METHOD OF INSPECTION THE FUEL PELLETS FACE SURFACE WITH THE USE OF DIFFRACTION FOCUSERS

Peter S. Zavyalov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Director, Head of Laboratory, phone: (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Maxim S. Kravchenko

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Engineer, phone: (383)306-59-40, e-mail: max@tdisie.nsc.ru

Mark V. Savchenko

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Programmer, phone: (383)306-59-40, e-mail: savchenko_mark@bk.ru

Vitaliy V. Urzhumov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Technician, phone: (383)306-59-40; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, e-mail: vitaliy010195@mail.ru

The optical-electronic method of inspection the cylindrical objects face surface on the example of fuel pellets simulators for fuel assemblies of nuclear power reactors is considered. The method is based on the formation of a light structure by diffractive focusers in the form of a points set with certain parameters on the end face of the fuel pellet simulator as well as the reading of stereo images by digital cameras. The stereoscopic structural scheme of the device based on this method is presented. The algorithm for software processing of the stereo images is described. It is associated with the recognition of the light structure, with the search for the correspondences on stereo images and with the calculation of real three-dimensional coordinates of the object's surface under study. The experimental stereoscopic stand with structural lighting as well as with the use of diffraction focusers is demonstrated. The results of determination of the end face 3D profile for nuclear fuel pellets simulators are presented.

Key words: fuel pellet, stereo image, diffraction focuser, structural lighting.

Введение

Безопасность электростанций является приоритетной задачей в современной атомной промышленности. Она решается, в том числе, благодаря развитию и модернизации контроля основных элементов атомных реакторов. Топливные таблетки (ТТ) с диоксидом урана – это ключевые элементы тепловыделяющих сборок для атомных энергетических реакторов. ТТ представляют собой керамический цилиндр диаметром около 8 мм. При изготовлении ТТ на их торцевой поверхности возможно появление характерных дефектов: трещин, пор, сколов, царапин и др.

На сегодняшний день в производственный цикл внедрены автоматические оптико-электронные системы [1, 2], принцип работы которых основан на контрастном методе выделения дефектов по изображению ТТ. Такие системы [3] обладают хорошим быстродействием, высокой вероятностью отбраковки некачественных изделий, но при этом не позволяют определять глубину дефектов, что ограничивает возможности такого контроля. Поэтому, актуально применение методов контроля, позволяющих определять 3D-профиль ТТ.

Возможным вариантом решения проблемы является применение метода структурного освещения, по аналогии с методами контроля внутренней поверхности ячеек дистанционирующих решеток [4, 5], или же боковой части ТТ

[6–10]. Известна так же система контроля торцевой части керамических колец с использованием дифракционных оптических элементов [11, 12]. Устройства, на основе метода светового сечения [13] и структурного освещения [14–17], активно разрабатываются и за рубежом. Стереоскопические системы, как и в [18–20], с такой структурной подсветкой активно используются в современных системах технического зрения для получения карты глубин контролируемого объекта, с помощью заданного структурного освещения решается задача стерео соответствия изображений.

В данной работе рассмотрен стереоскопический оптико-электронный метод контроля внешнего вида торцевой части ТТ с определением 3D-профиля поверхности. Представлены структурная схема устройства, реализующего предлагаемый метод контроля, расчеты элементов оптической системы, программная обработка и результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований предложена структурная схема устройства, реализующая стереоскопический метод контроля ТТ. Предлагаемая система представлена на рис. 1, где осветительная часть I состоит из источника света 1 (полупроводниковый лазер), коллиматора 2, формирователя 3. ТТ 4 закрепляется держателем 5 торцом к осветительной части I. Устройство содержит два идентичных приемных канала II для регистрации изображений ТТ 4 с левой и правой сторон. Приемный канал II включает в себя объектив 6 и матричный фотоприемник 7.

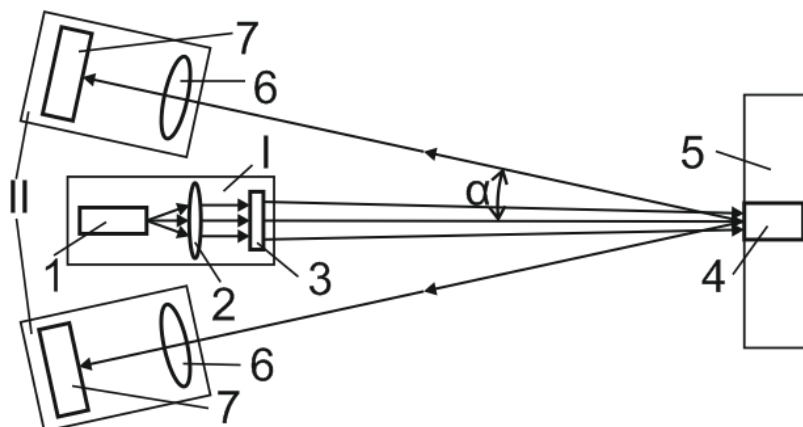


Рис. 1. Структурная схема
стереоскопического устройства контроля ТТ

В ходе работы устройства одновременно регистрируются изображения поверхности торцевой части ТТ 4 двумя приемными каналами под углом α к оптической оси Z осветителя. Изображения содержат световую структуру,

создаваемую формирователем 3 на поверхности торца ТТ 4, т. е. в плоскости, перпендикулярной продольной оси ТТ. По расчетным данным, минимальный угол α , при котором надежно определяется дефект глубиной в 0,1 мм, составляет $\sim 4^\circ$.

В схеме устройства на рис. 1 под формирователем 3 подразумевается дифракционный фокусатор (ДФ). Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДФ формировал на торцевой поверхности ТТ особую точечную световую структуру – совокупность проецируемых точек на фокусном расстоянии формирователя, в данном случае, распределенных друг относительно друга на известном расстоянии в виде квадратной структуры.

На данный момент существуют различные аналитические методы расчета фазовой функции ДФ [21], однако в предложенной системе ДФ вычислен на основе численного решения интеграла Френеля-Кирхгофа. Метод достаточно универсален и прост, он заключается в дискретизации формируемой световой структуры. Формируемое поле задается в виде набора из N точек (δ -функций) с некоторым шагом Δ друг относительно друга.

Так, известно, что комплексная амплитуда поля единичной функции $\delta(x_i, y_i, z_i)$ описывается импульсным откликом свободного пространства:

$$h_i(x, y) = \frac{e^{jkr_i}}{j\lambda r_i}, \quad (1)$$

где x, y – координаты точки в плоскости ДФ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны света, $r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}$; x_i, y_i, z_i – координаты точек, лежащих на световой структуре; $1 \leq i \leq N$.

К тому же, поле описывается суперпозицией N импульсных откликов в каждой точке ДФ:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i} \cdot h_i(x, y), \quad (2)$$

где I_i – относительные интенсивности точек.

Функция пропускания ДФ рассчитывается в круге диаметром D_0 с некоторым шагом (около 1 мкм). Вместе с этим из результирующего поля (2) выделяется его фазовая составляющая:

$$T(x, y) = \arg\{E(x, y)\}, \quad T(x, y) \in [-\pi; \pi]. \quad (3)$$

Перед процессом изготовления функция пропускания (3) бинаризуется:

$$T_b(x, y) = \begin{cases} 1, & T(x, y) \geq 0; \\ 0, & T(x, y) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Далее, при помощи программного обеспечения MATLAB из полученного массива значений рассчитывается ВМР-изображение микроструктуры ДФ. ДФ изготавливались на круговом лазерном фотоплоттере CLWS-300/C-M [22, 23]. Диаметр ДФ D_0 составляет 10 мм, фокусное расстояние $F_0 = 180$ мм, шаг дискретизации $\Delta = 1$ мкм, рабочая длина волны $\lambda = 405$ нм.

Для определения массива координат точек световой структуры, сформированной ДФ на поверхности ТТ, создан программный алгоритм обработки, состоящий из трех этапов: поиск световых точек на изображениях ТТ и определение центра каждой точки, поиск соответствующих точек на изображениях, вычисление координат точек в трехмерном пространстве по соответствиям (3D-профиль поверхности ТТ).

Основная цель первого этапа – это выделение точек через бинаризацию изображения и определение пикселей, принадлежащих точкам, используя подобие метода волны (поиск пути в ширину в графе) [24, 25] для каждой точки (рис. 2). Для левой и для правой картинки этот этап проходит одинаково. В алгоритме поиска происходит обход всех пикселей, при этом поочередно создается таблица принадлежности пикселей точкам. Как только все пиксели, образующие точку, будут найдены, вычисляется центр точки с учетом яркости каждого пикселя (центр масс точки). Итоговая таблица принадлежности пикселей служит как средство для поиска нужной световой точки.

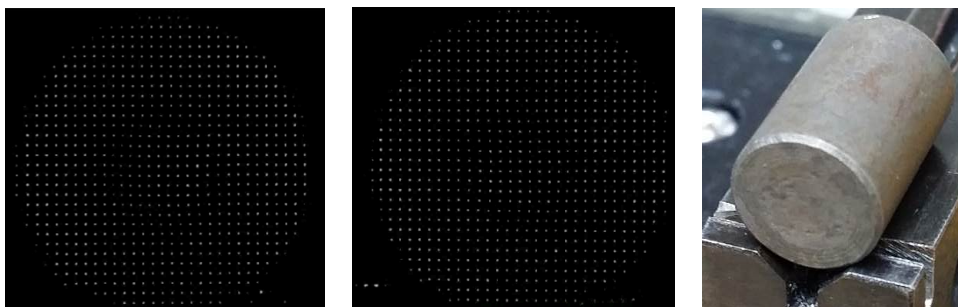


Рис. 2. Бинанизированные изображения точек световой структуры, полученные на левом и правом приемных каналах от поверхности имитатора ТТ и фотография одного из имитаторов ТТ на держателе

На втором этапе происходит распознавание точек и поиск их соответствия на левом и правом изображениях световой структуры. Алгоритм аналогично первому этапу использует метод поиска в ширину, только вместо вершин графа – точки из таблицы принадлежности. На этом этапе поиск в ширину начинается с пары точек, которым заранее задано соответствие на каждом из изображений (стартовая точка), волнообразно расходясь от нее на соседние точки. При этом если на левом и на правом изображении соответствующая соседняя точка будет найдена, то эти соседи помечаются как пара соответствующих друг другу точек. В результате получается список пар соответствующих точек. Те точки, которые остались без пары, исключаются.

Третий этап состоит в нахождении точек на поверхности объекта путем поиска пересечения двух прямых, исходя из действительного положения центров соответствующих точек в пространстве для каждой пары. На данном этапе решается задача поиска пересечения двух прямых (назовем их l_{line} и r_{line} для левого и правого изображений соответственно), проведенных через центры пары соответствующих точек. Из-за погрешностей в регистрации и обработке изображений, маловероятно, что прямые l_{line} и r_{line} пересекутся в пространстве. Поэтому, необходимо искать середину общего перпендикуляра между этими двумя прямыми. В итоге, завершив этот алгоритм со всеми точками, получаем массив координат точек, соответствующий реальной поверхности объекта.

Для экспериментальных исследований предложенной структурной схемы стереоскопического устройства на рис. 1 и измерения глубины дефектов собран экспериментальный стенд контроля торцевой части ТТ (рис. 3). В системе имеется осветительная часть, состоящая из полупроводникового лазера SLD3237vf мощностью 150 мВт с $\lambda = 405$ нм 1, коллиматора 2 и ДФ 3, и фотоприемная часть с КМОП-матрицей MT9V032C12STM ON Semiconductor 7 с разрешением 752×480 пикселей и размером пикселя 6 мкм, и объективом Гелиос-44 6 с $f = 58$ мм. Объект 4 закрепляется на держателе 5. Калибровка системы осуществляется путем помещения плоской пластины вместо объекта. Из-за значительных габаритов отдельных элементов системы угол α между приемной частью и осью Z осветительной составляет $12^\circ 30'$, что фактически не сказывается на чувствительности, но несколько уменьшает разрешение.

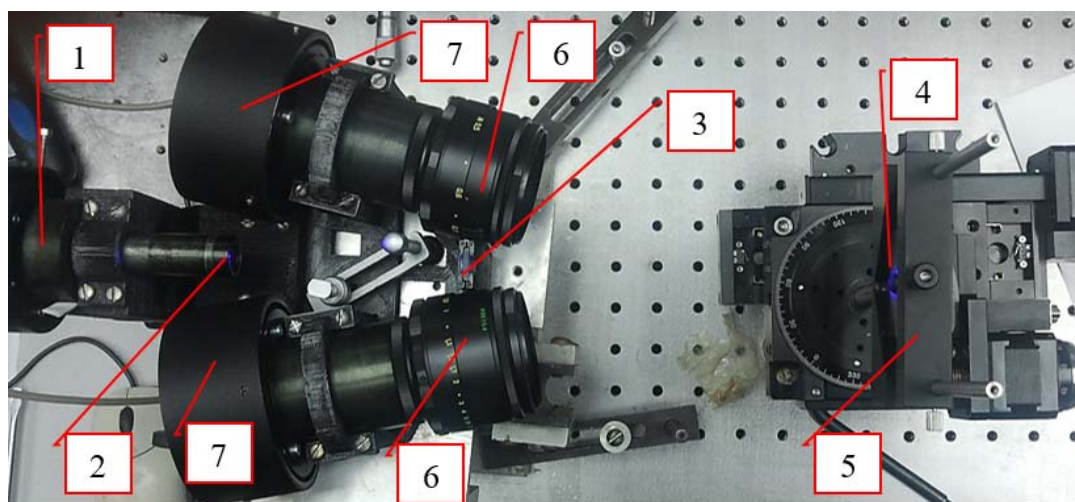


Рис. 3. Экспериментальный стереоскопический стенд контроля ТТ

Для эксперимента в качестве объектов изготовлены стальные имитаторы ТТ 4 диаметром 8 мм, имеющие условные обозначения 8В и 8М с дефектами типа «пора». Результат сканирования поверхностей имитаторов представлен на рис. 4 а, б.

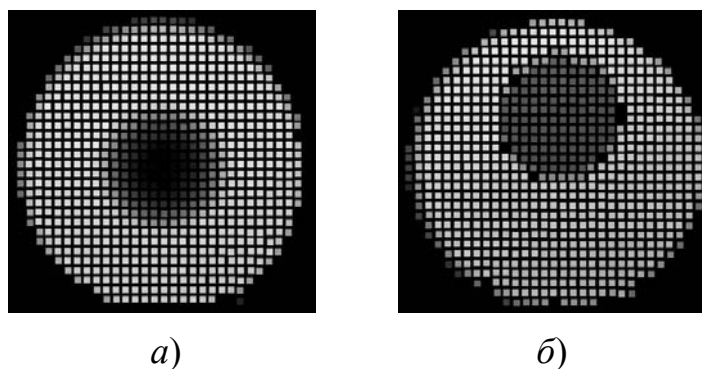


Рис. 4. Результаты сканирования поверхности имитаторов ТТ 8В (а) и 8М (б) (с учетом вычета наклона поверхности; чем светлее, тем ближе к камере)

На рис. 5 а, б представлены значения координат по оси Z для точек на поверхности, и на рис. 5 в, г размер общих перпендикуляров $Dist$ между прямыми l_{line} и r_{line} для соответствующих пар точек в пространстве на стереоизображении для имитаторов ТТ. Из графиков видно, что полученная глубина отверстий составляет порядка 0,56 и 0,35 мм с максимальным расхождением между прямыми l_{line} и r_{line} 0,12 и 0,2 мм для 8В и 8М соответственно.

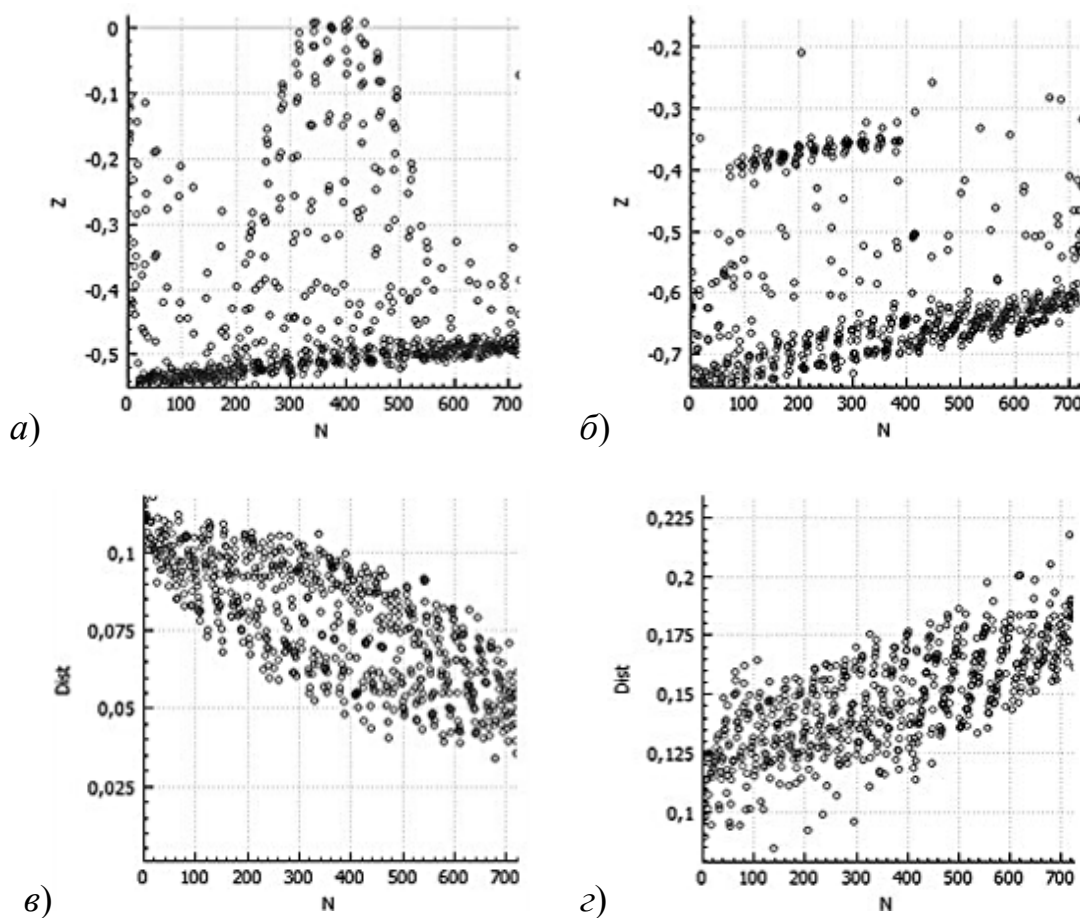


Рис. 5. Полученные графики для 8В (а, в) и 8М (б, г).

На вертикальных осях значения в мм, на горизонтальных – номер точки

Вид со стороны образующей имитатора ТТ и положение графиков строго зависят от выбора стартовой точки в программной обработке. На рис. 5 а, б разброс «выпадающих» точек происходит исключительно на краях имитатора ТТ. На рис. 5 в, г погрешность определения точки в пространстве на изображениях связана с небольшим наклоном имитатора ТТ относительно положения камер.

Обсуждение

В результате экспериментальных исследований подтверждено, что в отличие от существующих контрастных систем контроля ТТ представленная стереоскопическая система со структурной подсветкой позволяет определять 3D-профиль торцевой поверхности ТТ. Ниже приведена таблица, в которой представлены значения паспортных глубин дефектов, экспериментально полученные значения и их разность.

Паспортные и измеренные значения глубины дефектов

Имитатор ТТ	Паспортные значения глубины дефекта, мм	Измеренные значения глубины дефекта, мм	Погрешность измерения, мм
8В	0,61	0,56	0,05
8М	0,39	0,35	0,04

Из таблицы можно заключить, что максимальное отклонение глубины от паспортных значений составляет ~ 50 мкм. Такая погрешность может быть обусловлена:

- отличием фактического угла между приемными каналами от расчетного;
- ручной юстировкой оптической системы, вследствие чего, присутствует небольшой наклон приемных матриц друг относительно друга, а также различное увеличение приемных объективов;
- пространственным несовпадением между прямыми l_{line} и r_{line} . Перпендикуляры между ними достигают значения 0,2 мм, тогда как прямые должны пересекаться в точке, а перпендикуляры должны быть равны 0.

Для минимизации погрешностей, улучшения достоверности и увеличения быстродействия стереоскопической установки внешнего вида ТТ необходимы дальнейшие исследования в направлениях:

- выбор менее габаритных компонентов системы и, как следствие, уменьшение угла α между осветительной и приемными частями;
- улучшение разрешения;
- применение автоматической системы подачи и юстировки положения ТТ;
- дальнейшая модернизация программной обработки: автоматический поиск стартовой точки и т.п.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали применимость предложенного метода контроля для получения 3D-профиля торцевой поверхности ТТ. Так, созданный оптико-электронный стенд контроля торца ТТ на основе данного метода, в сравнении с контрастными устройствами, позволяет определять 3D-профиль ТТ.

В ходе работ собран экспериментальный стенд стереоскопического устройства контроля торцевой части ТТ со структурной подсветкой, рассчитан и изготовлен ДФ с бинанизированной структурой на основе численного решения интеграла Френеля-Кирхгофа.

Создан и применяется в экспериментальной установке полноценный авторский программный алгоритм обработки получаемых стереоизображений ТТ на основе метода поиска пути в ширину в графе. Разработанный программный алгоритм состоит из трех этапов: поиск световых точек и определение центра каждой точки, поиск и создание массива соответствующих точек на стереоизображениях, вычисление координат световых точек в трехмерном пространстве по сформированному массиву.

Сравнивая численные результаты, полученные с помощью разработанной программной обработки при определении глубины дефектов на поверхности имитаторов ТТ, с паспортными значениями, можно оценить погрешность стереоскопической системы при измерениях и сделать вывод, что результаты сканирования отвечают техническим требованиям контроля торца ТТ.

Проведение исследований послужит основой для создания промышленного варианта системы контроля внешнего вида торцевой части ТТ (или иных подобных объектов) с определением глубины дефектов с погрешностью не более 10 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белобородов А. В., Власов Е. В., Завьялов П. С. и др. Оптико-электронный контроль внешнего вида топлива для АЭС. Юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН «Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы». – Новосибирск : ГЕО, 2012. – С. 285–299.
2. Автоматизированный комплекс оптико-электронной разбраковки таблеток керамического ядерного топлива / Д. Г. Сырецкий, Г. А. Сырецкий, П. С. Завьялов и др. // Интер-экспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. и выст. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 124–129.
3. Финогенов Л. В., Белобородов А. В., Ладыгин В. И. и др. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток // Дефектоскопия. – 2007. – Т. 43, № 10. – С. 68–79.
4. Finogenov L. V., Lemeshko Yu. A., Zavyalov P. S. Using the diffractive optics for 3D inspection of nuclear reactor fuel assembly grid spacers // Measurement Science Review. – 2008. – Vol. 8. – Sect. 3 (3). – P. 71–77.

5. Завьялов П. С., Лемешко Ю. А., Финогенов Л. В., Чугуй Ю. В. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // *Автометрия*. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 23–31.
6. Завьялов П. С., Хакимов Д. Р., Финогенов Л. В. Пат. 2604109 С2 Российская Федерация, МПК G21C17/00. Способ обнаружения поверхностных дефектов цилиндрических объектов; заявитель и патентообладатель ФГБУН КТИ ИП СО РАН. – № 2015112760/28; заявл. 07.04.2015; опублик. 10.12.2016, Бюл. № 34.
7. Chang T. S. Pat. 20140152771 A1 US. Method and apparatus of profile measurement; publ. 05.06.2014.
8. Завьялов П. С., Карлин В. Э., Кравченко М. С. Применение дифракционных элементов для повышения производительности систем контроля цилиндрических поверхностей // *Автометрия*. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 40–47.
9. Финогенов Л. В., Завьялов П. С., Карлин В. Э. и др. Высокопроизводительный метод контроля боковой поверхности цилиндрических объектов с определением глубины дефектов // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. и выст. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 58–65.
10. Финогенов Л. В., Завьялов П. С., Карлин В. Э., Хакимов Д. Р. Высокопроизводительный оптико-электронный контроль боковой поверхности топливных таблеток с определением глубины дефектов // *Датчики и системы*. – 2016. – № 7. – С. 53–59.
11. Белобородов А. В., Гущина А. А., Завьялов П. С., Лемешко Ю. А., Финогенов Л. В. Установка для бесконтактного контроля размеров керамических колец // *IX Международная конференция «Прикладная оптика-2010»: сб. трудов в 3 т. (Санкт-Петербург, 18–22 октября, 2010 г.)*. – Санкт-Петербург : Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2010. Т. 1(2). Оптическое приборостроение. – С. 167–172.
12. Белобородов А. В., Гущина А. А., Завьялов П. С. и др. Оптико-электронный контроль керамических колец // *Датчики и системы*. – 2012. – № 4. – С. 25–28.
13. Experiment on mobile light-section device for automatic crack inspection of actual-size tunnel lining concrete / D. Inoue, T. Ueno, S. Nakamura // *Proc. 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. – 2017. – P. 1–4.
14. Dual structured light 3D using a 1D sensor / J. Wang, A. C. Sankaranarayanan, M. Gupta // *Proc. ECCV 2016: 14th European Conference on Computer Vision, Amsterdam, The Netherlands*. – 2016. – P. 383–398.
15. Zhou P., Yu Y., Cai W. Non-iterative three dimensional reconstruction method of the structured light system based on polynomial distortion representation // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 100. – P. 216–225.
16. Song Z., Jiang H., Lin H. A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2017. – Vol. 95. – P. 8–16.
17. Lin H., Nie L., Song Z. A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features // *Pattern Recognition*. – 2016. – Vol. 54. – P. 178–189.
18. Горевой А. В., Колочкин В. Я. Методы восстановления трехмерной структуры объектов для многоканальных систем регистрации с использованием структурированной подсветки // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2012. – № 12(12). – С. 20.
19. Володин Ю. С. Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2009. – № 11. – С. 35–42.
20. Нгуен А. В., Михайлов Б. Б. Метод распознавания многогранных 3D объектов // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2014. – № 1. – С. 65–70.
21. Волков А. В., Казанский Н. Л., Сойфер В. А. и др. Методы компьютерной оптики. – М. : Физматлит, 2003. – 688 с.

22. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автометрия. – 1998. – № 6. – С. 5–26.
23. Gurenko V. M., Kastorsky L. B., Kiryanov V. P., et al. Laser writing system CLWS-300/C-M for the microstructures synthesis on the axisymmetric 3-D surfaces // Proc. SPIE 4900 : 7th International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. – 2002. – Vol. 4900. – Part One. – P. 320–325.
24. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. – 3rd ed. – MIT Press, 2009. – 1312 p.
25. Левитин А. В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. Метод уменьшения размера задачи: Поиск в ширину. – М. : Вильямс, 2006. – 576 с.

REFERENCES

1. Beloborodov, A. V., Vlasov, E. V., Zavyalov, P. S., et al. (2012). Optoelectronic inspection of the External View of Fuel for Atomic Stations. Jubileiny Sbornik izbrannih trudov KTI NP SO RAN “Optiko-informatsionnye izmeritel’nye i lazernye tehnologii i sistemy” [Jubilee collection of selected works of TDI SIE SB RAS “Optical measuring information and laser technologies and systems”]. Novosibirsk: GEO, 285–299 [in Russian].
2. Syretskiy, D. G., Syretskiy, G. A., Zavyalov, P. S., et al. Automated complex optical-electronic sorting of tablets ceramic nuclear fuel. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir’-2016: XII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa i vystavki: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2016 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2016] (pp. 124–129). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
3. Finogenov, L. V., Beloborodov, A. V., Ladygin, V. I., et al (2007). An Optoelectronic System for Automatic Inspection of the External View of Fuel Pellets. Russian Journal of Nondestructive Testing, 43(10), 692–699.
4. Finogenov, L. V., Lemeshko, Yu. A., & Zavyalov, P. S. (2008). Using the diffractive optics for 3D inspection of nuclear reactor fuel assembly grid spacers. Measurement Science Review, 8, Sect. 3(3), 74–77. doi: 10.2478/v10048-008-0018-7.
5. Zav’yalov, P. S., Lemeshko, Yu. A., Finogenov, L. V., & Chugui, Yu. V. (2008). Three-Dimensional Inspection of Grid Spacers of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors using Diffractive Optical Elements. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 44(2), 111–117.
6. Zavyalov, P. S., Hakimov, D. R., & Finogenov, L. V. (2016). Patent RF 2604109 C2. Novosibirsk: IP Russian Federation.
7. Chang, T. S. (2014). Patent 20140152771 A1 US.
8. Zavyalov, P. S., Karlin, V. E., Kravchenko, M. S., Finogenov, L. V., & Khakimov, D. R. (2017). Application of diffractive elements for improving the efficiency of systems for cylindrical surface inspection. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 53(5), 1–7.
9. Finogenov, L. V., Zavyalov, P. S., Karlin, V. E., et al. (2017). A high-performance inspection method of cylindrical object lateral surface with defect depth determination. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir’-2017: XIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa i vystavki: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. SibOptika-2017 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 2. SibOptics-2017] (pp. 58–65). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
10. Finogenov, L. V., Zavyalov, P. S., Karlin, V. E., & Hakimov, D. R. (2016). A high-performance optoelectronic inspection of fuel pellets side surface with defect depth determination. Datchiki i Sistemy [Sensors & Systems], 7, 53–59 [in Russian].
11. Beloborodov, A. V., Gushchina, A. A., Zavyalov, P. S., Lemeshko, Yu. A., & Finogenov, L. V. (2010). System for noncontact dimensional inspection of ceramic rings. In Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy konferentsii “Prikladnaya Optika-2010”: T. 1(2). Opticheskoe priborostroenie [Proceedings of International Conference “Applied Optics-2010”: Vol. 1(2). Optical Instrument Making] (pp. 167–172). Saint-Petersburg: D. S. Rojdestvensky Optical Society [in Russian].

12. Beloborodov, A. V., Gushchina, A. A., Zavyalov, P. S., et al. (2012). Optoelectronic inspection for ceramic rings. *Datchiki i Sistemy [Sensors & Systems]*, 4, 25–28 [in Russian].
13. Inoue, D., Ueno, T., & Nakamura, S. (2017). Experiment on mobile light-section device for automatic crack inspection of actual-size tunnel lining concrete. *Proceedings of 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2017*, 1–4.
14. Wang, J., Sankaranarayanan, A. C., & Gupta, M. (2016). Dual structured light 3D using a 1D sensor. *Proceedings of ECCV 2016: 14th European Conference on Computer Vision*, 383–398.
15. Zhou, P., Yu, Y., & Cai, W. (2018). Non-iterative three dimensional reconstruction method of the structured light system based on polynomial distortion representation. *Optics and Lasers in Engineering*, 100, 216–225.
16. Song, Z., Jiang, H., & Lin, H. (2017). A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface. *Optics and Lasers in Engineering*, 95, 8–16.
17. Lin, H., Nie, L., & Song, Z. (2016). A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features. *Pattern Recognition*, 54, 178–189.
18. Gorevoy, A. V., & Koluchkin, V. Ya. (2012). Reconstruction methods of subject three-dimensional structure for multichannel systems of recording using structured illumination. *Injenerny jurnal: nauka i innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovation]*, 12, 20 [in Russian].
19. Volodin, Yu. S. (2009). Method of structural light coding for the television system of three-dimensional robot vision complex. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [Mechatronics, automation, control]*, 11, 35–42 [in Russian].
20. Nguyen, A. V., & Mikhaylov, B. B. (2014). Recognition method of polygonal 3D objects. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika [Robotics and Technical Cybernetics]*, 1, 65–70 [in Russian].
21. Volkov, A. V., Kazanskiy, N. L., Soifer, V. A., et al. (2003). *Metody komp'yuternoy optiki [Methods of computer optics]*. Moscow: Fizmatlit [in Russian]. ISBN 5-9221-0434-9.
22. Koronkevich, V. P., Korolkov, V. P., & Poleshchuk, A. G. (1998). Laser technologies in diffractive optics. *Avtometriya [Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing]*, 6, 5–26 [in Russian].
23. Gurenko, V. M., Kastorsky, L. B., Kiryanov, V. P., et al. (2002). Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on the axisymmetric 3-D surfaces. *Proceedings of SPIE 4900: 7th International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life 2002*, Vol. 4900, part 1, 320–325.
24. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. MIT Press. ISBN 978-0262033848.
25. Levitin, A. V. (2006). *Algoritmy. Vvedenie v razrabotku i analiz. Metod umensheniya razmera zadachi: poisk v shirinu [Algorithms. Introduction to development and analysis. Method for reduction of task size: search in width]*. Moscow: Williams [in Russian].

© П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, М. В. Савченко, В. В. Уржумов, 2018

ОСЕВЫЕ АБЕРРАЦИИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ФОКУСИРУЮЩЕГО ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Александра Алексеевна Дианова

АО «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, инженер, тел. (923)107-79-46, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

Татьяна Сергеевна Маганакова

АО «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, инженер, тел. (913)795-71-01, e-mail: tanushka_a88@mail.ru

В работе обсуждаются результаты расчетов осевых aberrаций высших порядков фокусирующих дифракционных оптических элементов.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент.

AXIAL ABERRATIONS OF HIGHER ORDERS OF FOCUSING DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT

Yuri Ts. Batomunkuev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

Alexandra A. Dianova

Novosibirsk Instrument-making Plant, 179/2, D. Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Engineer, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

Tatyana V. Maganakova

Novosibirsk Instrument-making Plant, 179/2, D. Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Engineer, e-mail: tanushka_a88@mail.ru

The results of calculations of the higher-order axial aberrations of focusing diffractive optical elements are discussed.

Key words: diffractive optical element.

Известно, что пространственный фильтр оптического сигнала в виде микроскопического отверстия, помещенного в фокус дифракционного оптического элемента (ДОЭ), может выполнять функцию узкого спектрального фильтра [1]. Такой фильтр позволяет выделить отраженный от объекта монохроматический оптический сигнал зондирующего излучения лазера на фоне сильного полихроматического светового шума, например, на фоне естественного белого света или на фоне световых помех (специальной засветки). Для выделения монохроматического оптического сигнала необходимо высокое значение относительно-

го отверстия дифракционного элемента. Вместе с тем известно, что при больших относительных отверстиях дифракционного элемента на рабочей длине волны, например, близких к 1:1, уже требуется учитывать его осевые монохроматические aberrации пятого и более высших порядков [2, 3].

В связи с этим целью работы является анализ сферических aberrаций высших порядков светосильного фокусирующего дифракционного элемента для их коррекции на заданных длинах волн оптического диапазона спектра.

Известно, что методы расчета aberrаций для интерференционных голограммных оптических элементов применимы и к дифракционным оптическим элементам, изготавливаемым на специализированном оборудовании [3]. Для таких дифракционных элементов длина волны записи считается расчетной рабочей длиной волны, поэтому аналитические выражения радиусов поперечных сферических aberrаций первого, третьего и высших порядков осевого ДОЭ могут быть представлены из [5–8] в виде

$$\Delta r_j = C_j z_i r^j \left| \left(1/z_c^j + 1/z_i^j \right) - \left(k\lambda_c / \lambda_o m_r^{j+1} \right) \left(1/z_r^j + 1/z_o^j \right) \right|, \quad (1)$$

где Δr_j – радиус поперечной сферической aberrации j -го порядка ($j = 1, 3, 5, 7, 9 \dots$); C_j – численные коэффициенты aberrаций; r – радиус выходного зрачка ДОЭ; z_r и z_c – расстояния от точечного источника световой волны до центра ДОЭ в расчетной и реальной схемах использования ДОЭ; z_o и z_i – расстояния от центра ДОЭ до изображения точечного источника световой волны в расчетной и реальной схемах использования ДОЭ; k – порядок дифракции; λ_c – рабочая длина волны; λ_o – расчетная длина волны; m_r – коэффициент деформации ДОЭ вдоль радиальной координаты r . При выполнении численных расчетов коэффициент деформации принят равным $m_r = 1$. Величины расстояний z_c и z_i в схеме использования ДОЭ определяются из известных условий [9]:

$$\begin{aligned} z_c &= 2m_r^2 F_o / k\mu \left(1 + \sqrt{-\frac{1}{3} + \frac{4m_r^2 (\beta_o^3 + 1)}{3k^2 \mu^2 (\beta_o + 1)^3}} \right), \\ z_i &= 2m_r^2 F_o / k\mu \left(1 - \sqrt{-\frac{1}{3} + \frac{4m_r^2 (\beta_o^3 + 1)}{3k^2 \mu^2 (\beta_o + 1)^3}} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mu = \lambda_c / \lambda_o$ – отношение реальной и расчетной рабочих длин волны, β_o и F_o – соответственно коэффициент линейного увеличения и фокусное расстояние ДОЭ на длине волны λ_o .

Результаты расчета по формулам (1) зависимости радиусов Δr_j сферических aberrаций пятого, седьмого и девятого порядков ДОЭ от реальной рабочей длины волны λ_c (в первом порядке дифракции) представлены на рис. 1, а, б. При выполнении вычислений расчетная длина волны, предполагается равной $\lambda_o = 1,064$ мкм. Диаметр ДОЭ равен 40 мм, фокусное расстояние ДОЭ на расчет-

ной длине волны λ_o равно 40 мм. Расстояния z_r приняты соответственно равными 60 мм и 53,33 мм, а расстояния z_o , равными 120 мм и 160 мм. На рис. 1, а, б сплошной кривой указана зависимость радиуса Δr_5 поперечной сферической aberrации пятого порядка, кривой с длинными штрихами – радиуса Δr_7 aberrации седьмого порядка, пунктирной кривой – радиуса Δr_9 aberrации девятого порядка.

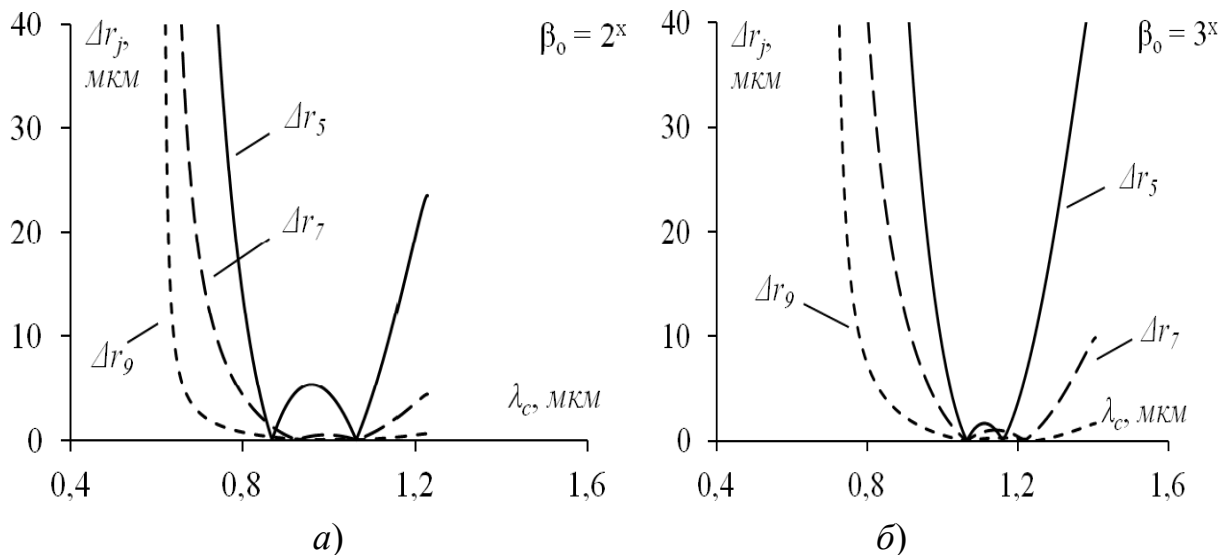


Рис. 1. Зависимости радиуса Δr_j поперечной сферической aberrации пятого, седьмого и девятого порядков осевого ДОО от изменения рабочей длины волны λ_c при коэффициентах увеличения:
а) $\beta_o = 2^x$, б) $\beta_o = 3^x$

Получено, что при коэффициенте увеличения $\beta_o = 2^x$ (рис. 1, а) в первом порядке дифракции рабочий спектральный диапазон ДОО ограничен диапазоном с минимальной длиной волны 0,614 мкм и максимальной длиной волны 1,228 мкм. В этом случае ограничение рабочего спектрального диапазона обусловлено не выполнением условия исправления сферической aberrации третьего порядка [10], а заданной величиной сферической aberrации пятого порядка. Сферической aberrацией девятого порядка можно пренебречь во всем рабочем спектральном диапазоне. Получено также, что в рабочем спектральном диапазоне от 0,836 мкм до 1,104 мкм радиусы aberrаций высших порядков ДОО не превышают величины 5,3 мкм, а относительное отверстие ДОО в этом диапазоне увеличивается от 1:1,28 до 1:0,96. При выполнении расчетов, представленных на рис. 1, б получено, что в первом порядке дифракции рабочий спектральный диапазон ДОО ограничен диапазоном 0,704 мкм – 1,406 мкм. Получаем, что рабочий спектральный диапазон ДОО и в этом случае ограничен заданной величиной сферической aberrации пятого порядка. Сферической aberrацией девятого порядка можно пренебречь во всем рабочем спектральном диапазоне. В диапазоне от 1,046 до 1,180 мкм радиусы aberrаций высших порядков ДОО

не превышают величины 1,7 мкм. Относительное отверстие ДОЭ при этом увеличивается от 1:1,02 (на длине волны 1,046 мкм) до 1:0,92 (на длине волны 1,180 мкм).

Из выражений (2) следует, что каждой рабочей длине волны λ_c соответствуют, присущие только ей, значения расстояний z_c, z_i . В качестве примера рассмотрим схему использования ДОЭ с увеличением $\beta_0 = 2^\times$, осевые aberrации высших порядков которого представлены на рис. 1, а.

График зависимости расстояния z_c ДОЭ от изменения рабочей длины волны λ_c представлен на рис. 2, а. Из графика видно, что при увеличении рабочей длины волны от 0,616 до 1,064 мкм расстояние z_c уменьшается нелинейно с величины 69,3 мм до минимального значения $z_c = 60$ мм при длине волны 1,064 мкм и затем нелинейно увеличивается до 68,4 мм. Причем в рабочем спектральном диапазоне от 0,616 до 1,064 мкм линейная дисперсия $\partial z_c / \partial \lambda_c$ имеет отрицательный знак, а в диапазоне от 1,064 мкм до 1,228 мкм – положительный знак. При длине волны 1,064 мкм дисперсия $\partial z_c / \partial \lambda_c$ равна нулю. Этот эффект изменения знака линейной дисперсии ДОЭ позволяет определить в диапазоне длин волн от 0,864 мкм до 1,228 мкм две рабочие длины волны при одном и том же значении расстояния z_c . Полученный эффект также позволяет в некоторой окрестности минимального значения $z_c = 60$ мм заменить кривую зависимости $z_c(\lambda_c)$ постоянной величиной, например $z_c = 60,154$ мм. Тогда в диапазоне длин волн от 1,00 до 1,12 мкм можно считать, что расстояние z_c не изменяется.

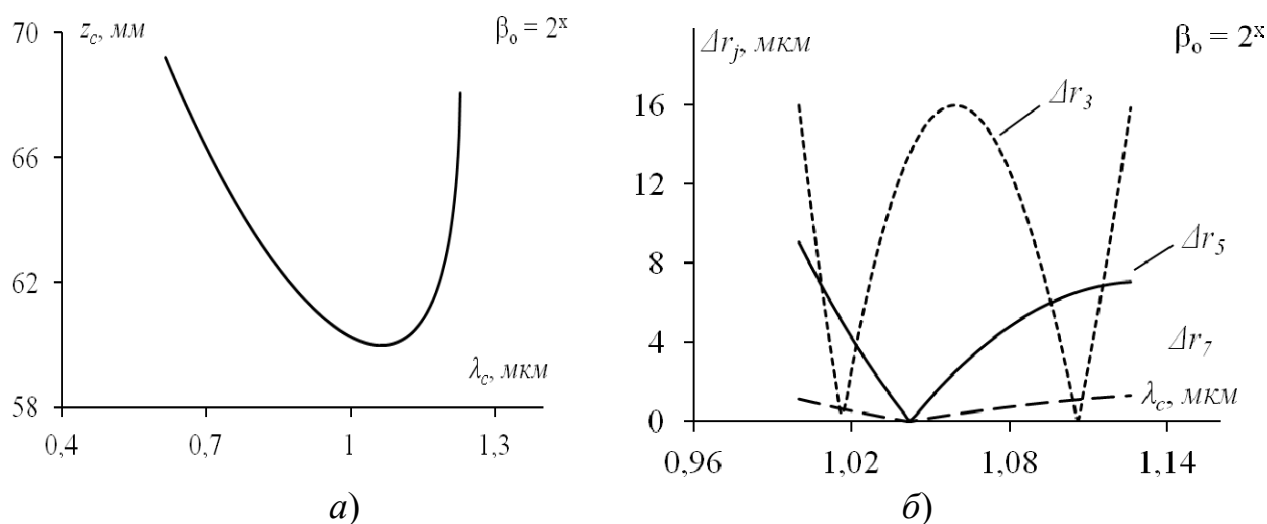


Рис. 2: а) Зависимость расстояния z_c в первом порядке дифракции ДОЭ от изменения рабочей длины волны λ_c ; б) зависимость радиусов сферических aberrаций третьего, пятого и седьмого порядков изображения точечного полихроматического источника ДОЭ от изменения рабочей длины волны λ_c

Таким образом, можно рассчитать осевые aberrации ДОО, формирующего изображение точечного полихроматического источника с рабочим спектральным диапазоном 1,00–1,12 мкм и находящегося на расстоянии ~ 60 мм от ДОО. Результаты расчета зависимости в первом порядке дифракции радиусов Δr_3 , Δr_5 , Δr_7 сферических aberrаций третьего, пятого и седьмого порядков ДОО от длины волны источника представлены на рис. 2б. На этом рисунке пунктирной кривой указана зависимость радиуса сферической aberrации третьего порядка, сплошной кривой – сферической aberrации пятого порядка, штриховой кривой – сферической aberrации седьмого порядка.

Расстояние от точечного источника полихроматической волны до ДОО принято равным $z_c = 60,154$ мм. Получено, что на всем рабочем диапазоне от 1,00 до 1,12 мкм радиус сферической aberrации третьего порядка не превышает 20,7 мкм, пятого порядка – 6,8 мкм, седьмого порядка – 0,8 мкм. На рис. 2б радиус сферической aberrации третьего порядка ДОО равен нулю на длинах волн 1,016 мкм и 1,116 мкм. Радиусы сферических aberrаций пятого и седьмого порядков ДОО равны нулю на длине волны 1,042 мкм. При этом относительное отверстие ДОО увеличивается (во всем рабочем диапазоне) от 1:1 до 1:0,89.

Таким образом, получено, что осевые сферические aberrации третьего порядка ДОО можно исправить на двух длинах волн λ_{1cor} и λ_{2cor} рабочего спектрального диапазона, существенно отличающихся от расчетной длины волны 1,064 мкм. Причем перемещая ДОО вдоль оптической оси можно уменьшать и увеличивать, как сами длины волн λ_{1cor} и λ_{2cor} , так и спектральный диапазон между ними. Исправляются aberrации и вблизи этих двух волн, тем самым создавая ДОО с двумя узкими рабочими спектральными диапазонами – двух диапазонные ДОО. Ширина спектрального диапазона при длине волны $\lambda_{1cor} = 1,016$ мкм равна 16 нм, при второй длине волны $\lambda_{2cor} = 1,116$ мкм – 20 нм. Величина радиуса сферической aberrации третьего и высших порядков в этих диапазонах не превышает 7 мкм.

Так как в выражениях (2) расстояния z_c , z_i зависят от произведения $k\mu$, то во втором порядке дифракции ДОО графики зависимости $z_c(\lambda_c)$ и $z_i(\lambda_c)$ совпадают с графиками в первом порядке дифракции (рис. 2) при замене λ_c на $0,5\lambda_c$. Зависимости радиусов сферических aberrаций третьего, пятого и седьмого порядков изображения точечного полихроматического источника ДОО во втором порядке дифракции от изменения рабочей длины волны λ_c совпадают с графиками на рис. 2. Отличие заключается лишь в изменении рабочего спектрального диапазона 1,00–1,12 мкм на диапазон 0,50 – 0,56 мкм. Поэтому длины волн, на которых имеет место равенство нулю сферических aberrаций ДОО во втором порядке дифракции меньше в два раза, чем в первом порядке и равны: для третьего порядка 0,508 мкм и 0,553 мкм, для пятого и седьмого порядков 0,522 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мустафин К. С. Голограммная оптика и перспективы ее применения // В кн.: Материалы пятой Всесоюзной школы по голографии. – ЛИЯФ, 1973. – 602 с.

2. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
3. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
4. Жердев А. Ю., Одинокоев С. Б., Лушников Д. С., Кайтуков Ч. Б. Высокоапертурная дифракционная линза для голографического принтера // Фотоника. – 2016. – № 3. – С. 88-96.
5. Батомункуев Ю. Ц., Дианова А. А. Расчет осевых сферических aberrаций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической aberrацией третьего порядка. Часть 1 // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 44-53.
6. Latta J. N. Fifth-order hologram aberrations // Applied Optics. – 1971. – Vol. 10(3) – P. 666–667.
7. Mehta P. S., Rao K. Sunder S, Hradaynath R Higher order aberrations in holographic lenses // Applied Optics. – 1982. –Vol. 21(24). –P. 4553–4558.
8. Батомункуев Ю. Ц. Aberrации девятого порядка объемного голограммного оптического элемента // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 142-146.
9. Буйнов Г. Н., Мустафин К. С. Об одной возможности компенсации сферической aberrации осевых голограммных линз // Оптика и спектроскопия. – 1976. – Т. 41, вып. 2. – С. 341-342.
10. Батомункуев Ю. Ц., Дианова А. А. Расчет спектрального диапазона многопорядкового фокусирующего голограммного оптического элемента с исправленной сферической aberrацией третьего порядка // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 192–201.

REFERENCES

1. Mustafin, K.S. (1973). Holographic optics and perspectives of its application. In book: Materials of the fifth holography school: Saint Petersburg: “LIYAF” Publisher [In Russian].
2. Gan, M.A. (1984) Theory and methods of calculation of hologram and kinoform optical elements. Saint Petersburg: “GOI” Publisher [In Russian].
3. Bobrov, S.T, Greisukh, G.I, Turkevich, Yu.G. (1986). The diffraction optics elements and systems. Saint Petersburg: Mechanical Engineering [In Russian].
4. Zherdev, A.Yu., Odinokov, S.B., Lushnicov, D.S., Kaytukov. Ch.B. (2016). High-aperture diffractive lens for holographic printer. Photonics, 3, 88-96.
5. Batomunkuev, Yu.Ts., Dianova, A.A. (2018) Calculation of the higher-order axial spherical aberrations of a high-aperture focusing holographic optical element with the corrected third-order spherical aberration. Part 1. Computer Optics, 42(1), 44-53. doi: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-44-53 [In Russian].
6. Latta, J.N. (1971) Fifth-order hologram aberrations. Applied Optics, 10(3), 666–667.
7. Mehta, P.S., Rao, K., Sunder, S., Hradaynath, R. (1982). Higher order aberrations in holographic lenses. Applied Optics, 21(24), 4553–4558.
8. Batomunkuev, Yu.Ts. (2012) Aberrations of the ninth order of a off-axis volume hologram optical element. Polzunovsky Vestnik, 3/2, 142-146 [In Russian].
9. Bujnov, G.N, Mustafin, K.C. (1976) Compensation spherical aberration holographic lens at the short-wavelength shift of the emission reducing. Optics and Spectroscopy, 41 (2): 341-342 [In Russian].
10. Batomunkuev, Yu.Ts, Dianova, A.A. (2017) Calculation of the spectral range of a focusing HOE with the corrected third-order spherical aberration. Computer Optics, 41(2), 192- 201. doi: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-192-201 [In Russian].

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, Т. С. Маганакова, 2018

АХРОМАТИЗАЦИЯ ДВУХ ОСЕВЫХ ГОЭ С ИСПРАВЛЕННЫМИ СФЕРИЧЕСКИМИ АБЕРРАЦИЯМИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (913)794-84-78, e-mail: opttechnic@mail.ru

Александра Алексеевна Дианова

АО «Новосибирский приборостроительный завод», 630049, Россия, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 179/2, инженер, тел. (923)107-79-46, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

В работе представлен результат расчета голографической системы, состоящей из двух многопорядковых осевых ГОЭ с исправленными сферическими aberrациями третьего порядка. Показана возможность ароматизация этой голографической системы для двух рабочих спектральных диапазонов: для видимого (0,489-0,794 мкм) и для ближнего инфракрасного (0,978–1,588 мкм).

Ключевые слова: хроматическая aberrация, голографический объектив, спектральный диапазон, ахроматизация.

ACHROMATIZATION OF TWO AXIAL GOE WITH CORRECTED THIRD-ORDER SPHERICAL ABERRATIONS

Yury Ts. Batomunkuev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (913)794-84-78, e-mail: opttechnic@mail.ru

Alexandra A. Dianova

Novosibirsk Instrument-making Plant, 179/2, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Engineer, phone: (923)107-79-46, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

The paper presents the result of calculating a two-component holographic system consisting of two multi-order axial GOEs with corrected third-order aberrations. Method of achromatization of holographic system operating simultaneously in two range – visible (0,489-0,794 μm) and near infared (0,978–1,588 μm) is proposed.

Key words: chromatic aberration, holographic lens, spectral range, achromatization.

Дифракционные оптические элементы, в том числе голограммные оптические элементы (ГОЭ), находят применение в задачах коллимирования и фокусировки монохроматического лазерного излучения. Однако в виду наличия значительной хроматической aberrации, использование ГОЭ в даже в относительно широком спектральном диапазоне затруднено. Проблеме ахроматизации ГОЭ посвящен ряд основополагающих работ [1, 2], в которых предложен способ уменьшения хроматической aberrации за счет введения в предметную полихроматическую волну заданной хроматической aberrации. В последующие годы были предложены голографические системы, состоящие из двух и трех

ГОО, у которых хроматические aberrации ГОО взаимно корректировались в параксиальной области [3]. Однако для светосильной голографической системы существует дополнительная потребность в исправлении aberrаций ГОО третьего и более высоких порядков [4, 5].

В связи с этим целью данной работы является изучение возможности коррекции хроматической aberrации двухкомпонентной голографической системы, состоящей из светосильных ГОО с исправленными сферическими aberrациями третьего порядка.

Рассмотрим два ГОО, записанных в осевой схеме с расходящимися опорной и объектной волнами (рис. 1). На рис. 1 и в тексте работы расстояния z_r , z_o — это расстояния от центра ГОО до точечных источников опорной и объектной волн.

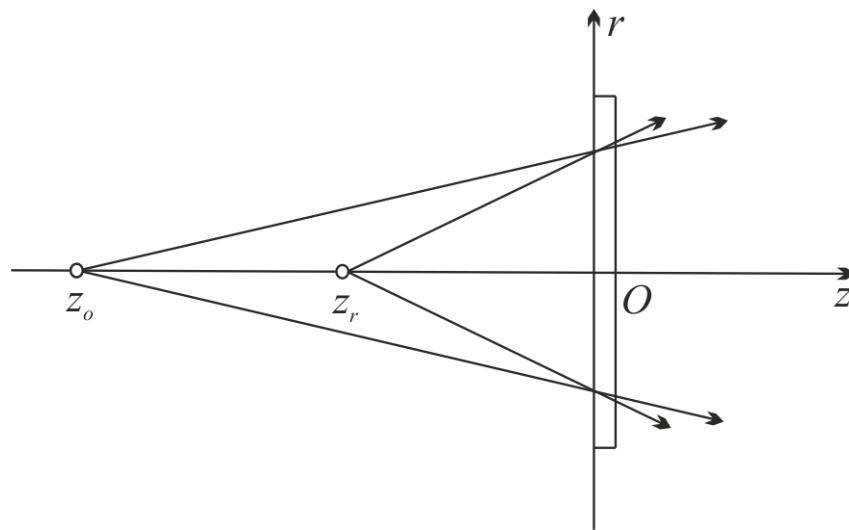


Рис. 1. Схема записи ГОО

На рис. 2, а, б представлены соответственно схемы использования первого и второго ГОО. Расстояния z_c , z_i , z'_i — это соответственно расстояния от центра ГОО до точечного источника восстанавливающей волны, до точки действительного изображения точечного источника восстановленной (дифрагировавшей) волны и до точки мнимого изображения точечного источника восстановленной волны. На обоих рис. 1 и 2 указана цилиндрическая система координат, у которой ось Oz перпендикулярна ГОО и является его оптической осью. ГОО находится в плоскости радиальной координаты r .

Выражение для радиуса поперечной монохроматической сферической aberrации первого порядка (дефокусировки) может быть записано в виде [6, 7]:

$$\Delta r_1 = z_i r \left| \frac{1}{z_c} + \frac{1}{z_i} - \left(\frac{k \lambda_c}{\lambda_o m_r^2} \right) \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_o} \right) \right|, \quad (1)$$

где Δr_l – радиус поперечной аберрации; r – радиус выходного зрачка ГОЭ; k – порядок дифракции; λ_c – рабочая длина волны; λ_o – длина волны записи, m_r – коэффициент масштабирования ГОЭ вдоль радиуса r . При выполнении численных расчетов в работе предполагается, что коэффициент масштабирования m_r принят равным $m_r = 1$, порядок дифракции $k = 1$.

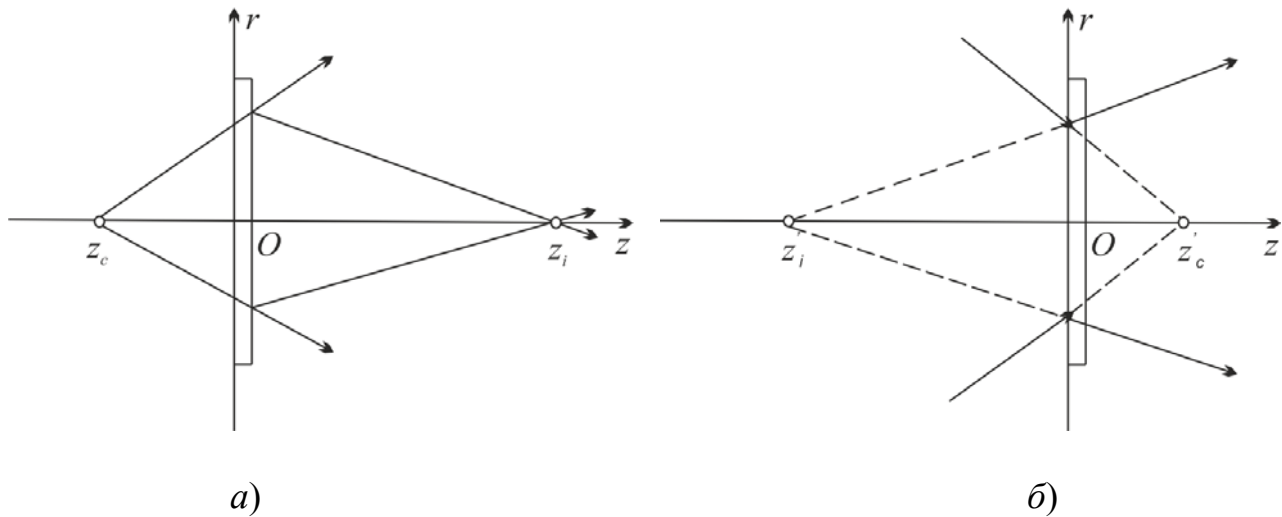


Рис. 2. Схема использования (восстановления):

а) первого ГОЭ; б) второго ГОЭ

Величины расстояний z_c и z_i в схеме использования могут быть определены из известных условий отсутствия дефокусировки и сферической аберрации третьего порядка тонкого ГОЭ [8]:

$$\begin{cases} \frac{1}{z_c} = \left(\frac{k\mu}{2m_r^2 F_o} \right) \left(1 + \sqrt{-\frac{1}{3} + \frac{4m_r^2(\beta_o^3 - 1)}{3k^2 \mu^2 (\beta_o - 1)^3}} \right), \\ \frac{1}{z_i} = \left(\frac{k\mu}{2m_r^2 F_o} \right) \left(1 - \sqrt{-\frac{1}{3} + \frac{4m_r^2(\beta_o^3 - 1)}{3k^2 \mu^2 (\beta_o - 1)^3}} \right); \end{cases} \quad (2)$$

В таблице указаны величины, характеризующие первый и второй ГОЭ. Строка под номером 1 соответствует первому ГОЭ, а строка с номером 2 второму ГОЭ.

На рис. 3 представлены зависимости координаты z_i осевой точки изображения от изменения рабочей длины волны λ_c в диапазоне 1,116–1,772 мкм (рис. 3, а) и в диапазоне 1,3–1,5 мкм (рис. 3, б). Сплошной линией на рис. 3 показана зависимость координаты z_i осевой точки изображения первого ГОЭ, штриховой линией – второго ГОЭ.

Основные параметры ГОЭ

№ ГОЭ	r , мм	Схема записи					Схема использования				
		λ_o , мкм	z_r , мм	z_o , мм	F_o , мм	β_o , крат	λ_c , мкм	z_c , мм	z_i , мм	F , мм	β , крат
1	10	0,6328	49,6	351,8	57,8	7,09	1,375	39,9	79,8	26,6	2
2	4	0,694	16,2	78,8	20,5	4,84		13,08	49,8	10,3	3,81

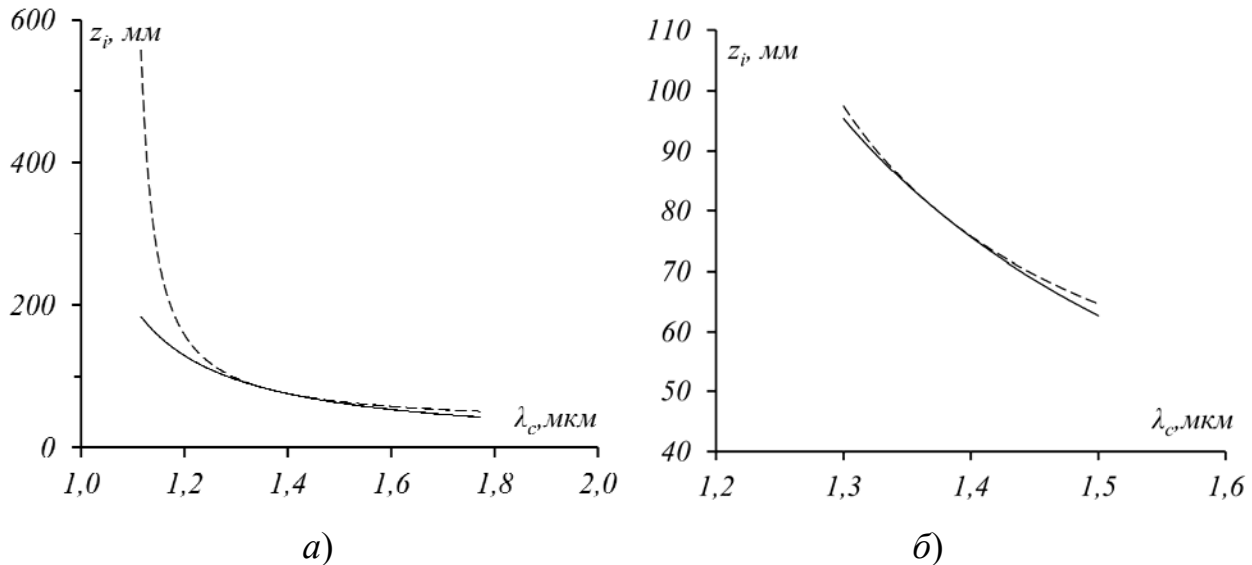


Рис. 3. Зависимость расстояний z_i от изменения рабочей длины волны λ_c в диапазонах:
а) от 1,166 мкм до 1,772 мкм; б) от 1,3 мкм до 1,5 мкм

Из рис. 3, а видно, что в пространстве изображений как первый, так и второй ГОЭ имеют практически совпадающие координаты z_i осевой точки изображения в рабочем спектральном диапазоне 1,3–1,5 мкм. При использовании этих ГОЭ в качестве компонентов голографической системы будет иметь место не только исправление aberrаций третьего порядка (в соответствии с системой уравнений (1)), но и исправление хроматических aberrаций положения на двух длинах волн. В отличие от первого ГОЭ, второй ГОЭ рассчитывается в обратном ходе падающей и дифрагирующей волн.

На рис. 4 приведена схема двухкомпонентной голографической системы на основе двух пропускающих ГОЭ, работающей в первом порядке дифракции в спектральном диапазоне 0,978–1,588 мкм, а во втором порядке – в диапазоне 0,489–0,794 мкм. Первый элемент данной системы является фокусирующим ГОЭ, а второй элемент – рассеивающим ГОЭ. Голографическая система формирует мнимое изображение точечного полихроматического источника S_1 в точке S_2' . Точка S_1' является одной из монохроматических изображений источника S_1 , которые создаются первым ГОЭ.

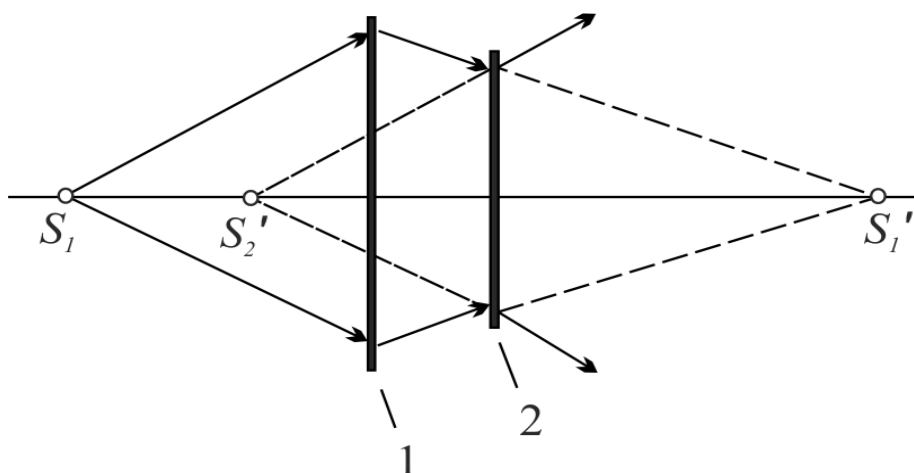


Рис. 4. Схема голографической двухкомпонентной системы:
1 – фокусирующий ГОЭ; 2 – рассеивающий ГОЭ

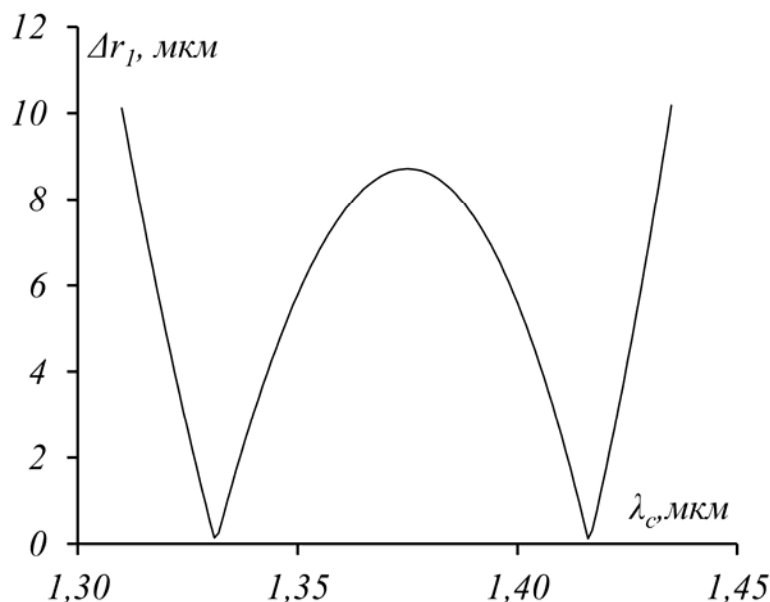


Рис. 5. Зависимость радиуса Δr_1 поперечной aberrации голографической двухкомпонентной системы от изменения рабочей длины волны λ_c

В плоскости изображения S_2' двухкомпонентной голографической системы зависимость радиуса Δr_1 поперечной aberrации первого порядка, рассчитанного по формуле (1), от изменения рабочей длины волны λ_c в диапазоне 1,31 – 1,435 мкм представлена на рисунке 5. На рисунке 5 видно, что хроматическая aberrация положения равна нулю на двух длинах волн: 1,331 мкм и 1,416 мкм. Во всем заданном спектральном диапазоне величина хроматической aberrации положения не превышает 10,1 мкм. Также в предлагаемой голографической системе оба ГОЭ являются светосильными – относительные отверстия первого и второго ГОЭ составляют 1:1,3 на рабочей длине волны 1,375 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Snow, K. A., Givens M. P. Production of partially achromatic zone plates by holographic techniques // JOSA. – 1968. – V. 58, N. 7. – P. 871-874.
2. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // Applied optics. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542-545.
3. Weingärtner, I., Rosenbruch K.J. Chromatic correction of two- and three-element holographic imaging systems // Optica Acta. – 1982. – V. 29, N. 4. – P. 519-529.
4. Ган, М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
5. Батомункуев Ю.Ц., Дианова А.А. Расчет осевых сферических aberrаций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической aberrацией третьего порядка. Часть 1 // Компьютерная оптика. – 2018. – Т.42, №1. – С.44-53. – DOI:10.18278/2412-6179-2018-42-1-44-53.
6. Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
7. Батомункуев, Ю.Ц. Aberrации девятого порядка объемного голограммного оптического элемента // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 142-146.
8. Батомункуев, Ю. Ц. Дианова А.А. Расчет спектрального диапазона многопорядкового фокусирующего голограммного оптического элемента с исправленной сферической aberrацией третьего порядка // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 192-201. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-192-201.

REFERENCES

1. Snow, K. A., Givens M. P. Production of partially achromatic zone plates by holographic techniques // JOSA. – 1968. – V. 58, N. 7. – P. 871-874.
2. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // Applied optics. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542-545.
3. Weingärtner, I., Rosenbruch K.J. Chromatic correction of two- and three-element holographic imaging systems // Optica Acta. – 1982. – V. 29, N. 4. – P. 519-529.
4. Gan MA. Theory and methods of calculation of hologram and kinoform optical elements. Leningrad: “GOI” Publisher; 1984.
5. Batomunkuev YuTs, Dianova AA. Calculation of the higher-order axial spherical aberrations of a high-aperture focusing holographic optical element with the corrected third-order spherical aberration. Part 1. Computer Optics 2018; 42(1): 44-53. DOI: 10.18287/2412-6179- 2018-42-1-44-53.
6. Bobrov ST, Greisukh GI, Turkevich YG. The diffraction optics elements and systems. Leningrad: Mechanical Engineering; 1986.
7. Batomunkuev YuTs. Aberrations of the ninth order of a off-axis volume hologram optical element; Polzunovsky Vestnik 2012; 3/2: 142-146.
8. Batomunkuev YuTs. Calculation of the spectral range of a focusing HOE with the corrected third-order spherical aberration. Computer Optics 2017; 41(2): 192- 201. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-192-201.

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, 2018

РАСЧЕТ ВНЕОСЕВОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВХОДНОЙ ЩЕЛИ СВЕТОСИЛЬНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Андрей Дмитриевич Безруков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, тел. (961)224-80-01, e-mail: igossotheonly@gmail.com

Игорь Александрович Зарубин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Представлен расчет зеркальной осветительной системы входной щели светосильных спектрометров с относительными отверстиями $1/2.3$ и $1/6$ для использования в составе жидкостного хроматографа и атомно-абсорбционного комплекса с электротермической атомизацией соответственно, с рабочим спектральным диапазоном в УФ области спектра: 190–410 нм. Предлагаемая система освещения с эллипсоидными зеркалами переносит большее количество мощности излучения источника света через образец на входную щель спектрометра в сравнении с конденсором с ахроматами.

Ключевые слова: зеркальная система освещения, эллипсоидное зеркало, светосильный спектрометр, внеосевая оптическая система, исправление аберраций.

OFF-AXIS MIRROR LIGHTING SYSTEM CALCULATION FOR HIGH-APERTURE SPECTROMETER SLIT

Andrei D. Bezrukov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, phone: (961)224-80-01, e-mail: igossotheonly@gmail.com

Igor A. Zarubin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Academician Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

The present paper demonstrates lightning mirror system calculation for high-aperture spectrometer slit with aperture ratio equal to $1/2.3$ and $1/6$ for use in assembling of liquid chromatography and atomic absorption complex based on electrothermal atomization devices respectively in UV-spectral range of 190–410 nm. Proposed optical system using ellipsoidal mirrors is able to transfer higher light source flux power value through sample into spectrometer slit compared to system with the achromatic lenses.

Key words: mirror lightning system, ellipsoidal mirror, high-aperture spectrometer, off-axis optical system, aberrations correction.

Введение

Жидкостная хроматография является одним из наиболее эффективных и универсальных методов спектрального анализа, основанных на неразрушающем разделении вещества [1]. Данный метод анализа активно применяется, как и промышленности, так и в исследовательских работах [2, 3]. Известны следующие актуальные области применения и исследования, в которых используется этот вид спектрального анализа: аналитическая, неорганическая и органическая химия, биохимия, микробиология, медицина, фармацевтика, биотехнологии [4, 5, 6]. Атомно-абсорбционный спектральный анализ позволяет эффективно определить содержание практически любых элементов в различных веществах, что обуславливает его широкое распространение в качестве инструмента анализа в таких направлениях и областях, как анализ растворов, неорганических веществ, биологических и органических образцов, металлургия, медицина [7, 8]. В представленных методах анализа широко применяются спектрометры и спектрофотометры для регистрации спектров пропускания (поглощения), обусловленных процессом абсорбции излучения веществом, и определяемых химическим составом исследуемых образцов.

Качество и эффективность спектрального анализа, предоставляемого упомянутыми методами, напрямую связаны с разработкой высокотехнологичных элементов и узлов готовых приборов. Одним из таких узлов является система освещения входной щели спектрометра. Система освещения состоит из источника света, ячейки с образцом, входной щели спектрометра и двух конденсоров: первый – собирает излучение источника и переносит его через исследуемый образец, формируя изображение источника в ячейке; второй – переносит прошедшее через образец излучение во входную щель спектрометра. Качество спектрального анализа можно оценить контрастом регистрируемого спектра, определяемого соотношением интенсивности слабой линии определяемого элемента к интенсивности фона. Увеличения контраста можно добиться увеличением относительного отверстия оптической системы – повышением светосилы прибора.

Использование линзовых конденсоров оказывается неэффективным по следующим причинам: ограничение относительного отверстия до $1/5$, сложность исправления хроматических aberrаций в УФ диапазоне, увеличенные габариты готовых приборов. Зеркальные конденсоры не имеют хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне, включая УФ, компактны, могут обеспечить малые габариты готовых приборов, благодаря излому хода лучей. В этом случае есть необходимость исправления aberrаций нецентрированных систем, таких как, кома, астигматизм. Их исправление может достигаться двумя путями: выбором параметров системы, таких как угол наклона падающих лучей к оптической оси зеркала, линейное увеличение, при которых вклад aberrаций минимален, и усложнением профиля отражающей поверхности, исправляющей aberrации [9]. Интерес представляют поверхности с разделенными сагитталь-

ной и тангенциальной компонентами кривизны профиля, в том числе поверхности, описываемые коэффициентами высших порядков [10, 11].

В предыдущей работе [12] главным образом были рассмотрены тороидальные зеркала, так как их параметры наглядны, легко рассчитываются с высокой точностью в параксиальном приближении и непосредственно используются при задании поверхности в среде Zemax. Хотя полученная схема и обладала всеми требуемыми качествами, производство тороидальных зеркал оказывается трудоемким процессом, а готовые зеркала имеют высокую стоимость. В данной работе, помимо прочих, рассматриваются эллипсоидные зеркала, которые не были рассмотрены в предыдущей работе.

Цель работы: расчет зеркальной системы освещения входной щели светосильного спектрометра с относительным отверстием $1/2.3$ и $1/6$ для использования в составе жидкостного хроматографа и атомно-абсорбционного комплекса с электротермической атомизацией соответственно, с рабочим спектральным диапазоном в УФ области спектра: 190–410 нм.

Моделирование

Система, в которой предполагается использование зеркального конденсора, имеет следующие параметры: источник излучения – лампа на парах дейтерия, размер тела свечения источника – 0,5 мм, рабочий спектральный диапазон – 190–410 нм, диаметр и толщина окна ячейки с образцом – 1 мм, материал – кварцевое стекло, полная длина ячейки – 4 мм, размеры входной щели спектрометра – 5 мм × 15 мкм. Удаленность ячейки от конденсоров – не менее 115 мм. Относительное отверстие системы – $1/2.3$. Расчеты и построение теоретических зависимостей выполнялось с использованием ПО MathCAD. Моделирование выполнялось с использованием ПО Zemax [13].

Были рассмотрены сферические, тороидальные, эллипсоидные, параболоидные и полиномиальные профили отражающих поверхностей. Полученные системы моделировались автоматически оптимизировались для получения наилучшей фокусировки. Качество фокусировки оценивалось величиной мощности источника, прошедшей через ячейку с образцом во входную щель спектрометра и размером пятна рассеяния.

Результаты расчета коэффициентов Зайделя для комы и сферической аберрации в виде теоретической зависимости величины коэффициентов от линейного увеличения системы приведены на рис. 1 (линейное увеличение представлено в виде длины проекции заднего отрезка зеркала на его оптическую ось).

На рис. 2 приведена зависимость размера пятна рассеяния от линейного увеличения системы зеркал в первом и втором плечах системы освещения, полученная путем моделирования. Линейное увеличение представлено величиной заднего и переднего отрезков для первого и второго зеркала, соответственно.

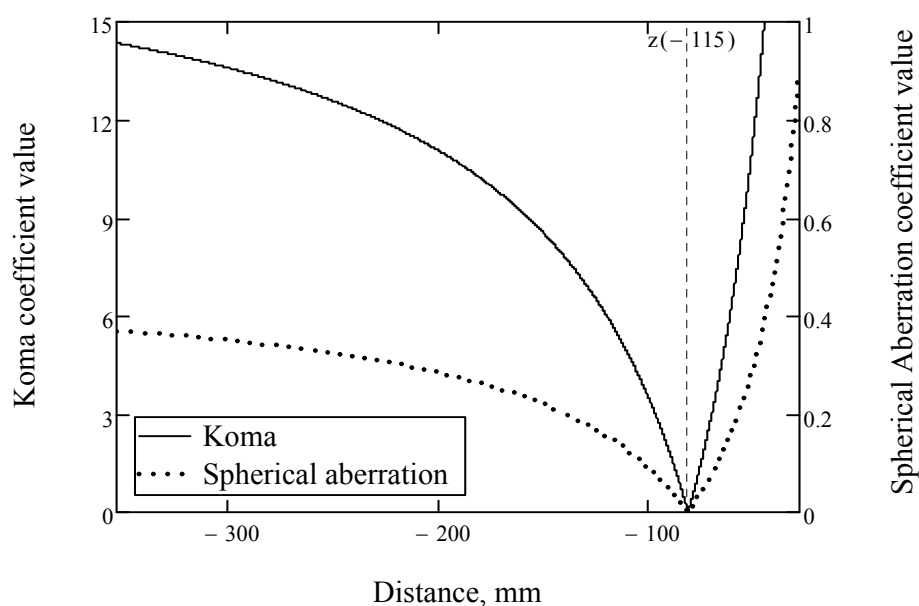


Рис. 1. Теоретическая зависимость величины коэффициентов Зайделя для комы и сферической аберрации от линейного увеличения системы. Угол поворота зеркала – 45 градусов; маркер “z(-115)” – соответствует единичному увеличению; относительное отверстие – 1/2.3

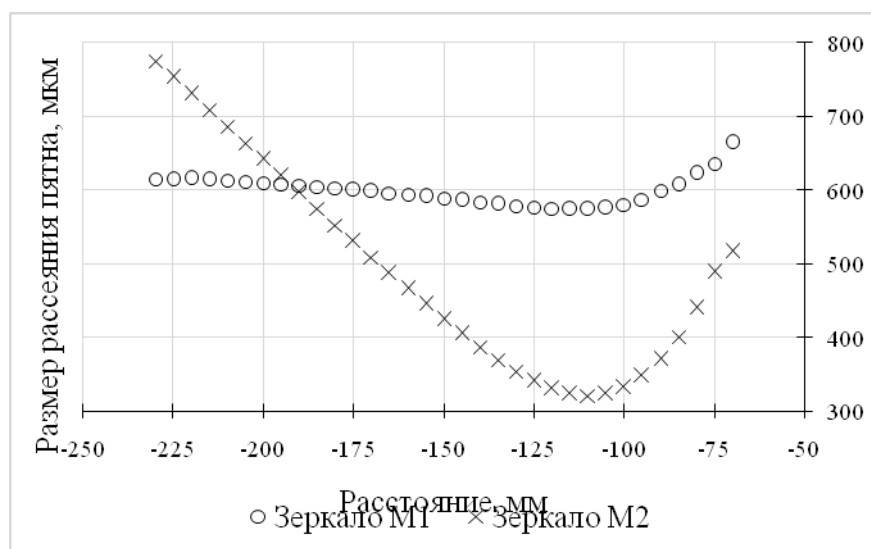


Рис. 2. Зависимость размера пятна рассеяния от линейного увеличения системы. Угол поворота зеркал – 45 градусов; расстояние 115 мм соответствует единичному увеличению системы; относительное отверстие – 1/2.3

В табл. 1 приведены наиболее эффективные из рассмотренных схем освещения с использованием различных образующих поверхностей, полученные путем моделирования для относительного отверстия 1/2.3. В таблице указаны:

схема распространения пучка – угол поворота зеркала, размер пятна рассеяния и доля мощности излучения источника, проходящей через ячейку и входную щель спектрометра. Здесь же приведена величина астигматизма.

Таблица 1

Характеристики систем с зеркальными конденсорами

Образующая поверхность	Поворот, град.	Размер пятна, мкм		Мощность, %		Астигматизм, мм
		ячейка	щель	ячейка	щель	
сфера	20 / -20	2301,980	4216,490	2,4-2,8	0,05-0,14	28,727
тор	45/45	343,107	511,523	96,4-96,6	1,9-2,2	0
эллипсоид	45/45	298,507	335,099	99,8-100	3,5-4,2	0

Эксперименты и обсуждение результатов

Наиболее эффективная зеркальная система освещения – эллипсоидный конденсор – была сопоставлена с используемым на момент выполнения работы конденсором – ахроматом $f83$ с относительным отверстием $1/8.3$. В ходе эксперимента был установлен размер пятна рассеяния изображения, формируемого ахроматом. Лампа, ахромат и щель спектрометра были выставлены на оптическую ось, отслеживаемую по лазерному указателю. Качество юстировки определялось по интенсивности линии, соответствующей длине волны лазерного указателя. Изображение регистрировалось спектрометром «Колибри-2», расположенном на столе с микро-подвижкой со щелью в плоскости изображения. По мере смещения спектрометра изменялась интенсивность регистрируемого спектра, по величине которой был установлен размер пятна рассеяния. Аналогичная схема была промоделирована с относительным отверстием $1/8.3$ и $1/2.3$. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

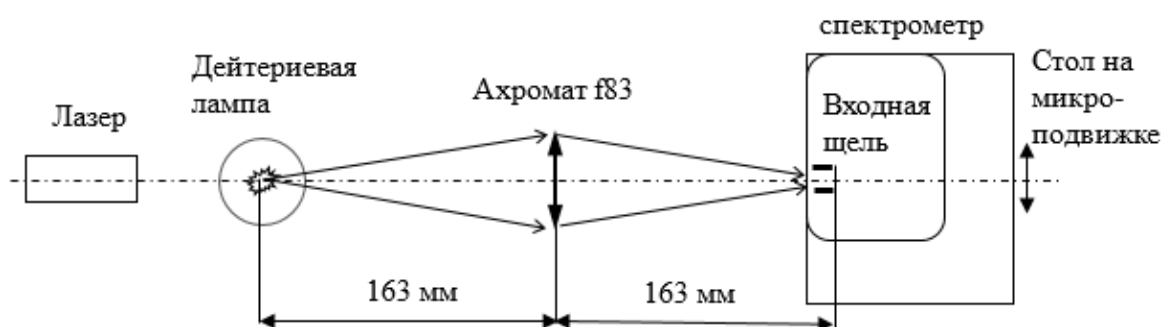


Рис. 3. Схема эксперимента

Результаты эксперимента и моделирования рассчитанной системы приведены в табл. 2.

Сравнение зеркального и линзового конденсоров

Радиус тела свечения – 0,25 мм		Относительное отверстие	Мощность, %	Размер пятна рассеяния, мм
ахромат f83	эксперимент	1/8.3	-	0,25
	моделирование	1/8.3	94,5	0,20
УФ-объектив		1/2.3	3,8	4,30
зеркало			100	0,30

Полученная теоретическая зависимость величины коэффициентов Зайделя для сферической аберрации и комы от линейного увеличения системы как функций от величины проекции заднего отрезка зеркала на оптическую ось внеосевого зеркала показывает, что минимальный вклад указанных аберраций соответствует единичному увеличению системы, и при наличии увеличения или уменьшения в системе, их вклад увеличивается (рис. 1). Эта теоретическая зависимость объясняет результаты моделирования (рис. 2) – величина коэффициентов аберрации определяет их вклад в искажение, размытие изображения – увеличение размера пятна рассеяния. Соответственно, минимальный размер пятна рассеяния и наилучшая фокусировка достигаются при единичном линейном увеличении, что согласуется с теоретической зависимостью, и, наоборот, при уменьшении или увеличении системы – пятно рассеяния увеличивается, что приводит к размытию и искажению изображения, к ухудшению его фокусировки. Зависимость размера пятна от линейного увеличения повторяет теоретическую зависимость. На основании этого дальнейшее рассмотрение выполнялось для систем с единичным увеличением.

Тороидальные и эллипсоидные зеркала имеют 2 оси симметрии, ортогональные между собой и оптической осью, что позволяет подобрать такие параметры профилей для тангенциальной и сагиттальной плоскости системы, которые позволят исправить астигматизм даже при высоких углах поворота. Эллипсоид, обеспечивающий наилучшую фокусировку, имеет следующие характеристики: параметры профиля через полуоси образующих эллипсоидов составляют 81,318 мм – малые полуоси, 115,001 мм – большая полуось. Диаметры апертуры первого и второго зеркала: 76,276 мм и 99,09 мм соответственно.

Различие результатов эксперимента и моделирования системы с использованием ахромата f83 с относительным отверстием 1/8.3 объясняется нарушением соосности расположения элементов системы в эксперименте, и их идеальным осевым расположением при моделировании. Для таких систем удастся добиться высокого качества фокусировки изображения, о чем свидетельствует размер изображения, близкий к размеру предмета, и высокая доля мощности, проходящей через окно ячейки. Это свидетельствует о низком вкладе хроматических аберраций и сферической аберрации. При увеличении относительного отверстия до 1/2.3 изображение существенно размывается и эффективность системы резко падает, что говорит об увеличении влияния хроматических и сферических аберраций, что согласуется с теорией. Использование объектива той же структуры,

что и ахромат $f83$ становится недостаточным, для работы с большими относительными отверстиями и требует усложнения его конструкции. Эллипсоидное зеркало обеспечивает эффективную фокусировку при относительном отверстии $1/2.3$, что свидетельствуют о высокой степени исправления сферической аберрации, комы, астигматизма и об отсутствии хроматических аберраций.

Заключение

Вклад сферической аберрации и комы может быть сведен к минимальному значению при единичном увеличении системы. Эллипсоидные зеркала наиболее эффективно исправляют астигматизм и обеспечивают наилучшую фокусировку при высоких углах поворота, не имеют хроматических аберраций в рабочем спектральном диапазоне. Использование линзовых конденсоров неэффективно при работе с большими относительными отверстиями. Рассчитанная зеркальная система с использованием эллипсоидных зеркал позволяет переносить через ячейку во входную щель спектрометра 98–100 % мощности излучения источника для относительного отверстия $1/2.3$. В обоих плечах системы используются зеркала с одинаковыми параметрами, схема распространения пучка – прямоугольная.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудаков О. Б., Востров И. А., Федоров С. В., Филиппов А. А., Селеменев В. Ф., Приданцев А. А. Спутник хроматографа. Методы жидкостной хроматографии. – Воронеж : Водолей, 2004. – 528 с.
2. Buszewski Bogusław, Noga Sylwia. Hydrophilic interaction liquid chromatography (HILIC) – a powerful separation technique // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2012. – Vol. 402. – P. 231–247.
3. Identification of primary amines in Titan tholins using microchip nonaqueous capillary electrophoresis / M. L. Cable, S. M. Hörst, C. He, et al. // Earth and Planetary Science Letters. – 2014. – Vol. 403. – P. 99–107.
4. Woodruff Mark. The use of High Performance Liquid Chromatography (HPLC) columns in Biomolecule analysis // Chromatography Today. – 2016. – November / December. – P. 48–51.
5. Eddhif Balkis, Allavena Audrey, Liu Sylvie, et al. Development of Liquid Chromatography High Resolution Mass Spectrometry Strategies for the Screening of Complex Organic Matter: Application to Astrophysical Simulated Materials // Talanta. – 2018. – Vol. 179. – P. 238–245.
6. Development of HPLC-Orbitrap method for identification of N-bearing molecules in complex organic material relevant to planetary environments / Thomas Gautier, Isabelle Schmitz-Afonso, David Touboul, Cyril Szopa, Arnaud Buch, Nathalie Carrasco // Icarus. – 2016. – Vol. 275. – P. 259–266.
7. Hill Steve J., Fisher Andy S. Atomic Absorption, Methods and Instrumentation. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. – 3rd ed. – University of Plymouth, UK : Elsevier, 2017. – P. 37–43.
8. Прайс В. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия; пер. с англ. Мосичева В. И.; под ред. Львова Б. В. – М. : Мир, 1976. – 358 с.
9. Liu Zhenjie, Yu Feihong. Aberration correction method for the catadioptric imaging system design // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55 (11). – P. 2943–2950.
10. Zhu Jun, Hou Wei, Zhang Xiaodong, Jin Guofan. Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view // Journal of Optics. – 2015. – Vol. 17 (1). – 015605 (8 p.).

11. Zhang Xin, Zheng Ligong, He Xin, et al. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces // Proc. SPIE : Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIII, edited by R. B. Johnson, V. N. Mahajan, S. Thibault. – 2012. – Vol. 8486, 848607 (10 p.).
12. Безруков А. Д., Лабусов В. А. Расчет зеркальной осветительной системы входной щели светосильного спектрометра // Интеллектуальный потенциал Сибири МНСК–2017. 25 межвуз. (регион.) науч. студ. конф. : сб. науч. трудов в 23 ч. (Новосибирск, 24–25 мая 2017 г.). – Новосибирск : НГТУ, 2017. Ч. 23. Современные технические и технологические вопросы фотоники и оптики. – С. 11–15.
13. ZEMAX. Optical Design Program. User's Guide. – 2009.

REFERENCES

1. Rudakov, O. B., Vostrov, I. A., Fedorov, S. V., Filippov, A. A., Selemenev, V. F., & Pridancev, A. A. (2004). Sputnik hromatografista. Metody zhidkostnoj hromatografii [Chromatographist handbook. Liquid chromatography methods]. Voronezh: Vodolej [in Russian].
2. Buszewski, B., & Noga, S. (2012). Hydrophilic interaction liquid chromatography (HILIC) – a powerful separation technique. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 402, 231–247. doi: 10.1007/s00216-011-5308-5.
3. Cable, M. L., Hörst, S. M., He, C., et al. (2014). Identification of primary amines in Titan tholins using microchip nonaqueous capillary electrophoresis. Earth and Planetary Science Letters, 403, 99–107.
4. Woodruff, M. (2016). The Use of High Performance Liquid Chromatography (HPLC) columns in Biomolecule analysis. Chromatography Today, November / December 2016, 48–51.
5. Eddhif, B., Allavena, A., Liu, S., et al. (2018). Development of Liquid Chromatography High Resolution Mass Spectrometry Strategies for the Screening of Complex Organic Matter: Application to Astrophysical Simulated Materials. Talanta, 179, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.11.008>.
6. Gautier, T., Schmitz-Afonso, I., Touboul, D., Szopa, C., Buch, A., & Carrasco, N. (2016). Development of HPLC-Orbitrap method for identification of N-bearing molecules in complex organic material relevant to planetary environments. Icarus, 275, 259–266.
7. Hill, S. J., & Fisher, A. S. (2017). Atomic Absorption, Methods and Instrumentation. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry. University of Plymouth, UK: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00099-6>.
8. Price, W. J. (1972). Analiticheskaya atomno-absorbicionnaya spektroskopiya [Analytical atomic absorption spectrometry]. Mosichev, V. I., trans., L'vov, B. V., ed. Moscow: Mir [in Russian].
9. Liu, Z., & Yu, F. (2016). Aberration correction method for the catadioptric imaging system design. Applied Optics, 55(11), 2943–2950.
10. Zhu, J., Hou, W., Zhang, X., & Jin, G. (2014). Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view. Journal of Optics, 17(1), 015605. doi: 10.1088/2040-8978/17/1/015605.
11. Zhang, X., Zheng, L., He, X., et al. (2012). Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces. Proceedings of SPIE 8486: Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIII, Vol. 8486, 848607. doi: 10.1117/12.928387.
12. Bezrukov, A. D., & Labusov, V. A. (2017). Mirror Lightning System Calculation for High-Aperture Spectrometer Slit. In Sbornik nauchnyh trudov Intellektual'nyj potencial Sibiri. MNSK–2017: 25 meyvuzovskoi (regional'noi) nauchnoi studencheskoi konferencii [Proceedings of Intellectual potential of Siberia ISSC–2017: 25th interuniversity (region) student conference] (part 23, pp. 11–15). Novosibirsk: NGTU [in Russian]. ISBN 978-5- 7782-3267-9.
13. ZEMAX. Optical Design Program. User's Guide, 2009.

© А. Д. Безруков, И. А. Зарубин, 2018

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ КАМЕР ДЛЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Станислав Андреевич Арбузов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: stan_i_slav84@mail.ru

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, тел. (383)343-91-11, e-mail: gricew@mail.ru

Рассматривается методика использования изображений подстилающей поверхности, получаемых в результате работы цифровой камеры с матричным фотоприемником, установленной на борту беспилотного воздушного судна. Приведены базовые энергетические соотношения, лежащие в основе рассматриваемой модели. Рассмотрены пути практической реализации методики спектральной калибровки видеокамеры по эталонным поверхностям.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, спектральный коэффициент отражения, фотоприемная матрица, элементарный фотоприемник, подстилающая поверхность, калибровка, спектральный фильтр.

USE OF DIGITAL CAMERAS FOR MULTISPECTRAL SURVEY FULFILLED FROM AN UNMANNED AIRCRAFT

Stanislav F. Arbuzov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: stan_i_slav84@mail.ru

Evgenij V. Gritskevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Information Security, phone: (383)343-91-11, e-mail: gricew@mail.ru

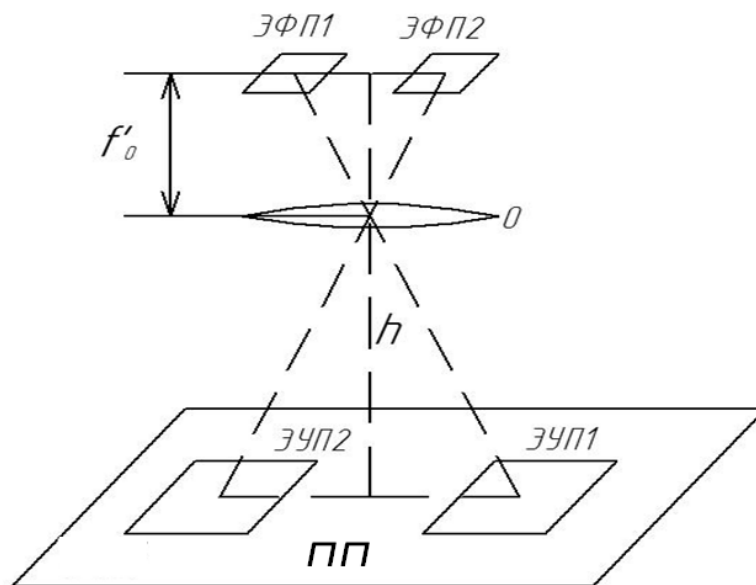
The method for using the images of the underlying surface obtained as a result of the operation of a digital camera with a matrix photodetector installed on board of unmanned aircraft is considered. The basic energy equations describing the model under consideration are given. The ways of practical realization of the method for spectral calibration of a camera with the use of reference surfaces are considered.

Key words: unmanned aerial system, spectral reflection coefficient, photodetector matrix, elementary photodetector, underlying surface, calibration, spectral filter.

Для целей дистанционного зондирования в настоящее время активно применяются беспилотные авиационные системы (БАС). При этом беспилотное

воздушное судно (БВС), входящее в состав БАС может снабжаться различными съемочными камерами. Широко применяются цифровые камеры (ЦК), снимающие в видимом диапазоне электромагнитного спектра и специализированные мультиспектральные камеры, снимающие в нескольких достаточно узких спектральных диапазонах. Такие камеры используются с целью определения различных качественных и количественных характеристик подстилающей поверхности [1, 2].

На рис.1 представлена упрощенная схема съемки подстилающей поверхности (ПП) с борта БВС с помощью одной ЦК (рисунок).



Упрощенная схема съемки с помощью одной камеры:

ПП – подстилающая поверхность; О – объектив ЦК; ЭУП1 и ЭУП2 – элементарные участки ПП, оптически сопряженные с элементарными фотоприемниками ЭФП1 и ЭФП2; h – высота БАС над ПП; f'_0 – заднее фокусное расстояние объектива ЦК

БВС находится на высоте h над ПП и имеет в своем составе ЦК. На рисунок показан объектив O этой ЦК с задним фокусным расстоянием f'_0 , причем $h \gg f'_0$. Элементарные фотоприемники ЭФП1 и ЭФП2 являются пикселями фотоприемной матрицы (ФПМ) ЦК. Эти пиксели оптически сопряжены с элементарными участками ПП ЭУП1 и ЭУП2. Соответственно, освещенности фоточувствительных площадок ЭФП1 E'_1 и ЭФП2 E'_2 определяются средними по площади (пространственно-интегральными) освещенностями участков ЭУП1 E_1 и ЭУП2 E_2 , а также отражательными свойствами последних.

В рассматриваемой модели введены следующие допущения и ограничения.

Во-первых, освещенность ПП формируется за счет прямого и (или) рассеянного солнечного излучения.

Во-вторых, в течение времени наблюдения эта освещенность не изменяется.

В-третьих, ПП является диффузным (ламбертовским) отражателем.

В-четвертых, фотоприемники ЭФП1 и ЭФП2 абсолютно идентичны.

В-пятых, высота полета БВС над ПП h (длина трассы наблюдения) не превышает 200 метров, а метеорологическая дальность видимости атмосферы превышает 20 километров. Последнее допущение (по длине трассы и метеорологической дальности видимости) позволяет считать влияние потерь излучения в атмосферном канале ничтожно малым и не учитывать изменение высоты нахождения БАС над ПП при определении условий и величин освещенности ПП и ФПМ во время видеосъемки (кроме изменений размеров площадок ЭУП1 и ЭУП2).

В-шестых, материал, из которого изготовлен объектив, подобран для работы в области спектра оптического излучения, определяемого спектральной чувствительностью ФПМ, и его характеристики (прежде всего – спектральный коэффициент пропускания) не оказывают заметного влияния на оптический сигнал, детектируемый фотоприемником.

Перечисленные выше допущения и ограничения позволяют провести математическую формализацию модели на уровне, достаточном для инженерного использования рассматриваемой методики. В то же время они не носят искусственный или принудительный характер, а являются условиями, обычно применяемыми в инженерных расчетах оптико-электронных систем. Ограничения же по высоте полета определяются естественными условиями работы БВС.

Пусть естественная спектральная освещенность ПП составляет $E_e(\lambda)$, а участки ЭУП1 и ЭУП2 покрыты растительностью со спектральными коэффициентами отражения $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ соответственно. Предполагается, что эти участки покрыты разными типами растительности. Спектральные плотности яркостей участков составят соответственно [3, 4]:

$$L_1(\lambda) = \frac{E_e(\lambda)}{\pi} \rho_1(\lambda), \quad (1)$$

$$L_2(\lambda) = \frac{E_e(\lambda)}{\pi} \rho_2(\lambda). \quad (2)$$

Пусть участки ЭУП1 и ЭУП2 находятся рядом друг с другом вблизи визирной линии объектива (в параксиальной области). Если за исходные полезные сигналы принять яркости участков, то разница между сигналами от каждого участка будет определяться только разницей между спектральными коэффициентами отражения покрытий этих участков. Поскольку выражения (1) и (2) являются однотипными, то для сокращения математических записей в дальнейшем изложении будут использоваться обозначения обобщенных спектраль-

ных величин $\rho(\lambda)$ и $L(\lambda)$. Так как спектральные коэффициенты отражения разных типов ПП отличаются друг от друга по величине на разных длинах волн, то для решения задачи детектирования этих различий целесообразно использовать способ спектральной фильтрации [5], что предполагает введение в оптический канал ЦК спектрального фильтра (СФ) со спектральным коэффициентом пропускания $\tau(\lambda)$.

С учетом сделанных выше допущений для рассматриваемой модели обобщенный сигнал на выходе любого элементарного фотоприемника может быть рассчитан по формуле [4, 6]:

$$u = \frac{1}{4} \left(\frac{D_{\text{вх}}}{f_o} \right)^2 \int_{\Delta\lambda_{\text{сф}}} E_e(\lambda) \rho(\lambda) \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $D_{\text{вх}}$ – диаметр входного зрачка объектива ВК;

$\Delta\lambda_{\text{сф}}$ – спектральный диапазон пропускания СФ (полоса пропускания);

$S(\lambda)$ – абсолютная спектральная чувствительность ФПМ по освещенности.

Суть рассматриваемого метода детектирования спектральных коэффициентов отражения ПП состоит в следующем. Непосредственно перед началом полета БВС производится предварительная спектральная калибровка ЦК по эталонной поверхности. Методика калибровки подробно описана в работе [7]. При этом для учета возможных изменений условий освещенности необходимо предусмотреть возможность спектральной калибровки для разных точек съемочного участка в разное время (достигается путем размещения нескольких спектральных эталонов по площади съемочного участка). В результате калибровки фиксируется выходной сигнал ФПМ $u_{\text{эт}}$ для используемого СФ. Очевидно, что $u_{\text{эт}} \sim \rho_{\text{эт}}(\Delta\lambda_{\text{сф}})$, где $\rho_{\text{эт}}(\Delta\lambda_{\text{сф}})$ – среднее значение спектрального коэффициента отражения эталонной поверхности в полосе пропускания $\Delta\lambda_{\text{сф}}$. Во время полета БВС фиксируется выходной сигнал ФПМ u_p от рабочей (исследуемой) поверхности. Тогда $u_p \sim \rho_p(\Delta\lambda_{\text{сф}})$ в полосе пропускания $\Delta\lambda_{\text{сф}}$. Коэффициенты пропорциональности в обоих случаях одинаковы, поэтому:

$$\rho_p(\Delta\lambda_{\text{сф}}) = \frac{u_p}{u_{\text{эт}}} \rho_{\text{эт}}(\Delta\lambda_{\text{сф}}). \quad (4)$$

Конечно, одного значения коэффициента отражения на одной длине волны недостаточно для идентификации типа ПП. Поэтому, БВС снабжается несколькими идентичными ЦК с установленными в них разными СФ. Соответственно, и эталонных поверхностей при калибровке системы должно быть несколько.

Используемые для калибровки эталонные поверхности выбираются исходя из необходимости обеспечения требуемого по интенсивности динамического

диапазона измерений (от светлых до темных тонов). Кроме того, они должны иметь равномерный коэффициент отражения по всему спектральному диапазону чувствительности фотоприемника. Функции спектральных коэффициентов отражения эталонных поверхностей заранее измеряются в лабораторных условиях с помощью спектрофотометра.

Дискретные коэффициенты отражения ограниченного множества априорно предполагаемых рабочих подстилающих поверхностей для дискретных полос пропускания применяемых СФ могут быть взяты из специализированной справочной литературы, например, [8-11], либо также получены путем лабораторных спектрофотометрических измерений.

При выполнении анализа объектного состава ПП на мультиспектральных изображениях могут использоваться различные алгоритмы автоматизированного дешифрирования, что в значительной мере повышает оперативность получения информации о снимаемой территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Multispectral analysis for determining plant health [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://publiclab.org/wiki/multispectral-analysis-for-determining-plant-health>
2. Drone Data Management System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://event38.com/drone-data-management-system/>
3. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика.- М.: Техносфера, 2006.- 424 с.
4. Якушенков Ю.Г. Основы оптико-электронного приборостроения. – М. : Логос, 2013. – 376 с.
5. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
6. Ишанин Г.Г., Челибанов В.П. Приемники оптического излучения.- СПб.: Издательство «Лань», 2014.- 304 с.
7. Васин Б.Л., Малькова С.В., Осипов М.В, Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Федотов С.И., Фроня А.А. Методика измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы // Препринт ФИАН.- 2007.- № 18.- 20 с.
8. Кринов Е.Л., Спектральная отражательная способность природных образований – М., Л.: Издательство АН СССР, 1947. – 270 с.
9. Джабиев А.Н., Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Оптическое излучение естественных объектов и фонов и его имитация.- СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001.- 199 с.
10. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений.- М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
11. Данилин И.М., Медведев Е.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса.- Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005.- 182 с.

REFERENCES

1. Multispectral analysis for determining plant health [Electronic resource].- Access mode: <https://publiclab.org/wiki/multispectral-analysis-for-determining-plant-health>
2. Drone Data Management System [Electronic resource].- Access mode: <https://event38.com/drone-data-management-system/>
3. Shroder G., Trayber H. (2007). Tekhnicheskaya optika. Moscow: Tekhnosfera. [in Russian].

4. Yakushenkov Y.G. (2013). Osnovy optiko-elektronnogo priborostroyeniya. Moscow: Logos. [in Russian].
5. Tarasov V.V., Yakushenkov Y.G. (2007). Dvukh- i mnogodiapazonniye optiko-elektronniye sistemy s matrichnymi priyomnikami izlucheniya. Moscow: Universitetskaya kniga; Logos. [in Russian].
6. Ishanin G.G., Chelibanov V.P. (2014). Priyomniki opticheskogo izlucheniya. Saint Petersburg: Izdatelstvo «Lan». [in Russian].
7. Vasin B.L., Malkova S.V., Osipov M.V., Puzyrov V.N., Saakyan A.T., Starodub A.N., Fedotov S.I., Fronya A.A. (2007). Metodika izmereniya spektralnoy chuvstvitelnosti PZS-matritsy. Moscow: Preprint FIAN. 18. [in Russian].
8. Krinov E.L., Spectralnaya otrajatel'naya sposobnost prirodnih obrazovaniy (1947). Moscow – Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR. [in Russian].
9. Dzhabiyev A.N., Ishanin G.G., Pankov E.D., (2001). Opticheskoye izlucheniye yestestvennykh ob'yektov i fonov i yego imitatsiya. Saint Petersburg: GITMO University. [in Russian].
10. Shovengerdt R.A. (2010). Distantcionnoye zondirovaniye. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. Moscow: Tekhnosfera. [in Russian].
11. Danilin I.M., Medvedev E.M., Melnikov S.R. (2005). Lazernaya lokatsiya zemli i lesa. Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukachova SO RAN. [in Russian].

© C. A. Арбузов, E. B. Грицкевич, 2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЯХ НА СПЕКТРОМЕТРЕ «ГРАНД-ЭКСПЕРТ» С РЕГИСТРАЦИЕЙ СПЕКТРОВ ЕДИНИЧНЫХ ИСКР ЛИНЕЙНЫМИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ФОТОДЕТЕКТОРАМИ

Дмитрий Николаевич Бокк

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (383)330-22-52, e-mail: bokk@vmk.iae.nsk.su

Владимир Александрович Лабусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, зав. лабораторией; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Игорь Александрович Зарубин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Виктор Геннадьевич Гаранин

ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат химических наук, начальник отдела технического контроля, тел. (383)330-22-52, e-mail: vs@vmk.ru

Применение линейных твердотельных детекторов излучения вместо фотоэлектронных умножителей для регистрации спектров единичных искровых разрядов с целью определения содержания неметаллических включений в металлических сплавах открывает новые возможности для снижения пределов обнаружения включений и определения их химического состава за счет информативности зарегистрированных спектров. Настоящая работа посвящена разработке метода определения неметаллических включений на спектрометре «Гранд-Эксперт» с регистрацией спектров единичных искр линейными твердотельными фотодетекторами. Показаны преимущества применения разработанной однолинзовой осветительной системы с фокусировкой в области дифракционной решетки спектрометра. Приведены способы применения дополнительного интегрального спектра и фона в качестве внутреннего стандарта, которые позволяют снизить пределы обнаружения растворенного содержания элемента и неметаллических включений. Анализ охарактеризованного образца рельсовой стали подтверждает достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ, спектрометры, многоэлементные твердотельные детекторы, линейки фотодетекторов, неметаллические включения, анализ сталей и сплавов.

DETERMINATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL USING «GRAND-EXPERT» SPECTROMETER WITH LINEAR SOLID-STATE PHOTODETECTORS REGISTERING SINGLE-SPARK SPECTRA

Dmitry N. Bock

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, ; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)330-22-52, e-mail: bokk@vmk.iae.nsk.su

Vladimir A. Labusov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of laboratory; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia; D. Sc., phone: (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Igor A. Zarubin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia; Ph. D., phone: (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Viktor G. Garanin

LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Department of technical control, phone: (383)330-22-52, e-mail: vs@vmk.ru

Using linear solid-state radiation detectors instead of photomultipliers to register the single-spark spectra for determination of non-metallic inclusions content in metallic alloys reveals new opportunities to lower the inclusions' detection limits and to determine their chemical composition due to the registered spectra informativeness. This paper is devoted to the development of a non-metallic inclusions' determination method using "Grand-Expert" spectrometer with linear solid-state photodetectors registering single-spark spectra. The advantages of the developed one-lens entrance slit illumination system with focusing in the spectrometer's diffraction grating region are shown. The methods of complementary integral spectrum application and using background as an internal standard are given, which allow us to lower the detection limits of dissolved element's content and non-metallic inclusions. The characterized rail steel sample analysis confirms reliability of the results obtained.

Key words: PDA-OES, optical spectrometers, solid-state linear optical detectors, non-metallic inclusions, analysis of steels and alloys.

Введение

Чтобы обеспечить высокое качество металлического сплава, не достаточно контролировать лишь его химический состав. Примесные элементы, такие как углерод, азот, кислород, алюминий и другие, образуют различные оксидные, карбидные, нитридные и карбонитридные включения, которые существенно изменяют прочностные и пластические свойства металла. Включения нарушают однородность структуры сплава, являются концентраторами напряжений и могут породить трещины, которые в свою очередь приводят к разрушению.

Степень негативного влияния включений зависит от их химического состава и размеров. Поэтому состав, количество и размеры неметаллических включений подлежат контролю.

Определение в сталях и сплавах содержания неметаллических включений обычно осуществляется с помощью трудоемких и продолжительных по времени (несколько часов и более) металлографических или электролитических методов. Однако в последнее время, с повышением требований к качеству выпускаемых сплавов, возникла необходимость в производственном контроле содержания включений. Это потребовало создания альтернативных, более экспрессных методов контроля, таких как газовый фракционный анализ (5–10 минут) [1] и атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС) с искровым возбуждением и анализом спектров единичных искровых импульсов (1–2 минуты). Применение производственного контроля содержания неметаллических включений дает значительную экономическую выгоду за счет коррекции производственного процесса непосредственно в ходе плавки, что позволяет избежать брака. Кроме того, существуют особые сплавы, для которых практически невозможно добиться нужных показателей без производственного контроля содержания включений. Например, к таким сплавам относятся применяемые в автомобильной промышленности ULC IF стали (стали со сверхнизким содержанием углерода и неметаллических включений).

В настоящее время АЭС с искровым возбуждением и анализом спектров единичных искровых импульсов является основным методом, обладающим достаточной экспрессностью для проведения производственного контроля содержания неметаллических включений в металлах и сплавах. В ходе выполнения метода отшлифованная или заточенная поверхность образца подвергается воздействию нескольких тысяч разрядов в среде аргона. Атомно-эмиссионные спектры регистрируют для каждого разряда отдельно, в результате чего получают зависимости интенсивностей аналитических спектральных линий нужных элементов от времени. Такие зависимости содержат информацию о неоднородностях элементного состава образца. Вспышки интенсивности спектральной линии элемента соответствуют попаданию искры во включение, в состав которого входит данный элемент. Количественное определение содержания включений производят при помощи градуировочной зависимости, построенной с использованием стандартных образцов для обычной, интегральной АЭС.

Способ АЭС с искровым возбуждением и анализом спектров единичных искровых импульсов обладает рядом ограничений по сравнению с традиционными металлографическими и электролитическими методами [2]. Например, диапазон размеров определяемых им включений находится в пределах от единиц мкм до нескольких десятков мкм, тогда как металлографическими методами можно определять включения с минимальным размером порядка десятых долей мкм, а максимальный размер определяемых включений практически не ограничен. При этом требования к характеристикам, а значит и к производственному контролю выпускаемых металлических сплавов непрерывно возрастают. Поэтому расширение возможностей и улучшение метрологических харак-

теристик определения содержания неметаллических включений способом АЭС с искровым возбуждением и анализом спектров единичных искровых импульсов является актуальной задачей.

Данный метод реализован на промышленных спектрометрах путем регистрации интенсивностей спектральных линий с помощью ФЭУ. Применение вместо них линейных твердотельных детекторов излучения (ТДИ) позволяет получить информацию о форме спектральных линий и уровне фона в непосредственной окрестности регистрируемой линии, спектральных наложениях, предоставляет возможность использовать для анализа произвольные спектральные линии, за счет чего можно снизить пределы обнаружения и погрешности определения включений, улучшить достоверность измерений.

Появление быстродействующих и высокочувствительных линеек ТДИ в настоящее время дает возможность получения высококачественных спектров эмиссии образца от одного искрового разряда в вакуумных спектрометрах, а рост вычислительной мощности компьютеров позволяет получать и обрабатывать последовательности таких спектров в реальном времени (до 1000 спектров в секунду). Объединение безкорпусных линеек ТДИ в сборку [3] также дает ряд преимуществ. Например, в этом случае можно минимизировать или даже свести на нет «мертвые» (не чувствительные к излучению) зоны на стыках кристаллов без использования зеркал для разводки фрагментов спектра.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка метода и инструментальных средств для определения содержания неметаллических включений в металлических сплавах путем регистрации и обработки последовательности атомно-эмиссионных спектров отдельных искровых разрядов с помощью линейных твердотельных детекторов излучения.

Экспериментальная установка

В качестве основы для создания экспериментальной установки был выбран вакуумный спектрометр для анализа металлических сплавов «Гранд-Эксперт» [4], построенный по схеме Пашена-Рунге. Спектрометр оснащен продуваемым аргоном штативом, искровые разряды в котором формируются с помощью генератора «Шаровая молния» ШМ-250, который позволяет с высокой точностью задать форму разряда. Для обеспечения возможности регистрации спектров единичных искровых разрядов, спектрометр был оснащен быстродействующим многоканальным анализатором эмиссионных спектров (МАЭС) на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 [5]. Начало времени экспозиции МАЭС было синхронизовано с искровым импульсом генератора ШМ-250.

Параметры искрового разряда, применяемые в традиционном интегральном атомно-эмиссионном спектральном анализе, не подходят для определения включений, поскольку такой разряд обладает слишком большой энергией, что приводит к локальному переплавлению, а значит к гомогенизации пробы. С помощью серии экспериментов, а также опираясь на параметры искрового

разряда, найденные в литературе, был выбран режим искрового генератора для определения содержания неметаллических включений [6]. Форма разряда этого режима приведена на рис. 1.

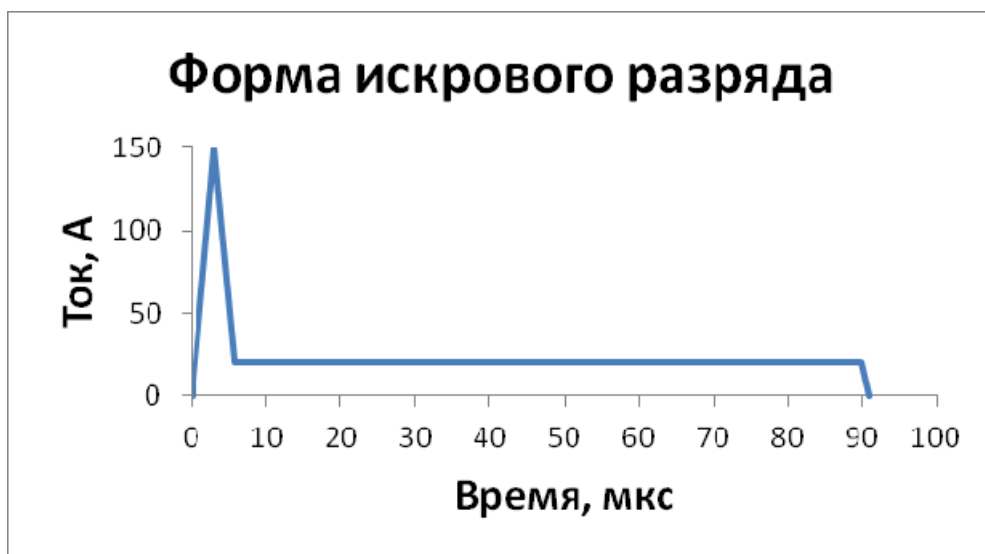


Рис. 1. Зависимость тока разряда от времени

Осветительная система

Ранее для ввода излучения в вакуумный полихроматор применялась трехлинзовая оптическая система без антивиньетирующей линзы. Эта система обладала слабой эффективностью в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) из-за поглощения коротковолнового излучения ее элементами, имела высокую чувствительность к смещению плазмы искрового разряда перпендикулярно оптической оси вдоль поверхности образца, эффективность ввода излучения в спектрометр существенно зависела от длины волны этого излучения из-за хроматических aberrаций.

С помощью моделирования в программе «Zemax» была рассчитана однолинзовая система с фокусировкой вблизи дифракционной решетки спектрометра [7]. Такой конденсор обладает наилучшими характеристиками по сравнению с другими рассмотренными системами. Благодаря увеличенному фокусному расстоянию конденсора и тому факту, что излучение в окрестности входной щели распространяется практически параллельно оптической оси прибора, значительно снижается влияние хроматической aberrации и смещения искрового разряда в плоскости, перпендикулярной оптической оси прибора, на интенсивности регистрируемых спектральных линий в спектрах отдельных искр. Конденсор был рассчитан и изготовлен из фторида магния, который пропускает излучение в диапазоне вакуумного ультрафиолета лучше других материалов. В результате, по сравнению с использовавшейся ранее трехлинзовой осветительной системой, интенсивности спектральных линий в длинноволновой об-

ласти остались на прежнем уровне, а интенсивности спектральных линий в области вакуумного ультрафиолета возросли в три раза и более. Кроме того, применение однолинзовой системы дало возможность реализовать устройство для оперативной чистки линзы, что решило существовавшую в спектрометре «Гранд-Эксперт» проблему деградации интенсивности спектральных линий за счет роста налета на поверхности оптических элементов.

Благодаря применению однолинзовой осветительной системы, эффективность спектрометра в диапазоне ВУФ существенно возросла. По сравнению с трехлинзовой системой, количество поглощающих элементов уменьшилось с трех до одного. Кроме того, линза для осветительной системы была изготовлена из фтористого магния (MgF_2), который обладает наилучшим из доступных материалов пропусканием в области глубокого ВУФ. Все это позволило регистрировать спектральные линии в диапазоне от 130 нм, в частности линии кислорода (130,16 нм) и азота (149,21 нм).

Обработка последовательностей спектров

Применение линейных ТДИ вместо ФЭУ позволяет определить форму контура спектральной линии и уровень фона в ее окрестности в спектре каждого искрового разряда. Эти преимущества можно использовать для расширения возможностей определения включений с помощью спектрометрии с искровым возбуждением.

В результате одного измерения получается последовательность из 3000 спектров (время измерения – 7,5 с, частота искрового генератора – 400 Гц), соответствующих отдельным искровым разрядам. Чтобы определить концентрации растворенной и нерастворенной долей элемента и размеры отдельных включений, содержащих этот элемент, необходимо рассчитать интенсивности аналитической линии элемента в каждом спектре последовательности и получить зависимость интенсивности этой линии от времени (рис. 2). Интенсивности спектральной линии, которые соответствуют растворенному содержанию элемента, распределены по закону Гаусса [8]. Если искра попадает во включение, которое содержит рассматриваемый элемент, появляется вспышка интенсивности спектральной линии данного элемента. Значения интенсивности линии, которые превышают границу определения $\bar{I} + 3\sigma$, считаются вспышками, порожденными неметаллическими включениями. Причем значения средней интенсивности $\bar{I}$ и среднеквадратического отклонения (СКО) σ относятся к интенсивностям спектральной линии, которые соответствуют растворенному содержанию элемента. Для того чтобы вычислить СКО и $\bar{I}$, необходимо исключить вспышки из зависимости интенсивности от времени. Сделав предположение о химическом составе включений на основе априорных сведений об образце и корреляций вспышек спектральных линий различных элементов, можно определить размеры отдельных включений с применением той же градуировочной зависимости, которая используется для интегрального анализа [9].

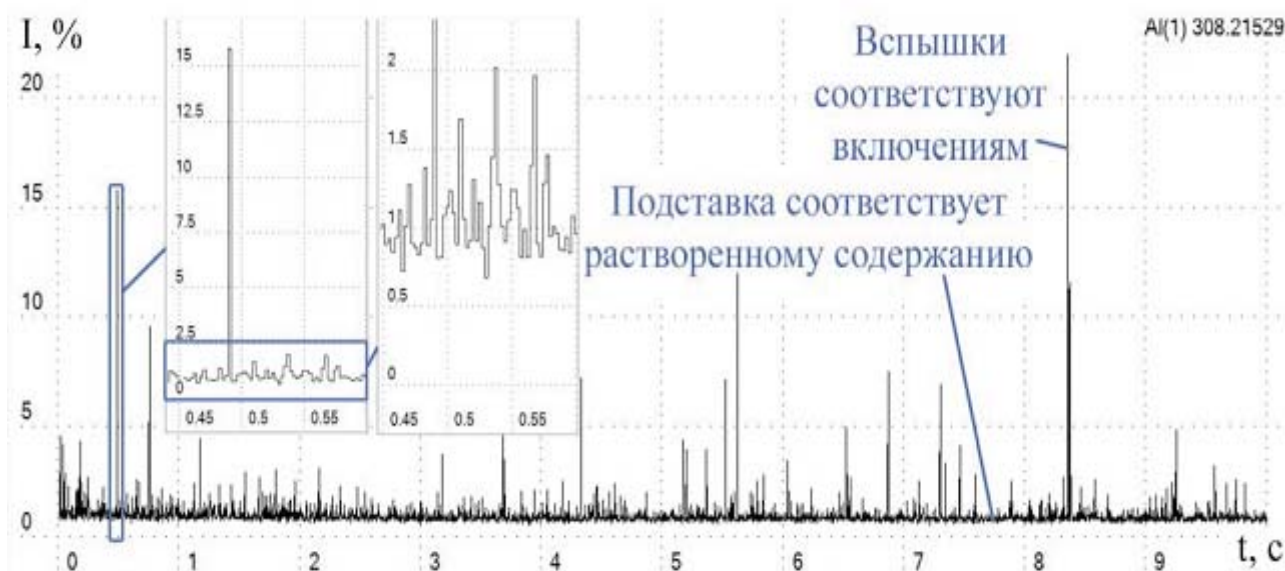


Рис. 2. Зависимость интенсивности спектральной линии алюминия от времени в стандартном образце стали УГ76

Дополнительный интегральный спектр

Важная задача при анализе содержания неметаллических включений – определение концентрации растворенной доли элемента в образце. Обычно аналитическим сигналом для ее определения служит среднее значение интенсивностей спектральной линии в спектрах, соответствующих растворенному содержанию элемента. При таком подходе и общую концентрацию элемента приходится определять не по интенсивности его линии в интегральном спектре, а по средней интенсивности спектральной линии в ее зависимости от времени. Если интенсивность спектральной линии аналита достаточно высока, разницы в результатах такого расчета концентрации и расчета по интенсивности линии в интегральном спектре наблюдаться не будет. Однако при низких содержаниях элемента спектральная линия сливается с шумом в спектрах отдельных искр, но отчетливо видна в интегральном спектре (рис. 3).

Это может привести к неправильному определению концентрации элемента за счет влияния шумов на определение фона и интенсивности спектральной линии в спектрах отдельных искр. Поэтому было предложено путем сложения спектров, в которых отсутствуют вспышки, вычислять дополнительный интегральный спектр, который будет соответствовать растворенному содержанию элемента, и определять концентрацию растворенной доли по интенсивности спектральной линии в этом спектре [10]. Таким образом, аналитическим сигналом для определения общей концентрации элемента будет служить интенсивность его спектральной линии в интегральном спектре, а для определения концентрации растворенной доли элемента – интенсивность его спектральной линии в дополнительном интегральном спектре.

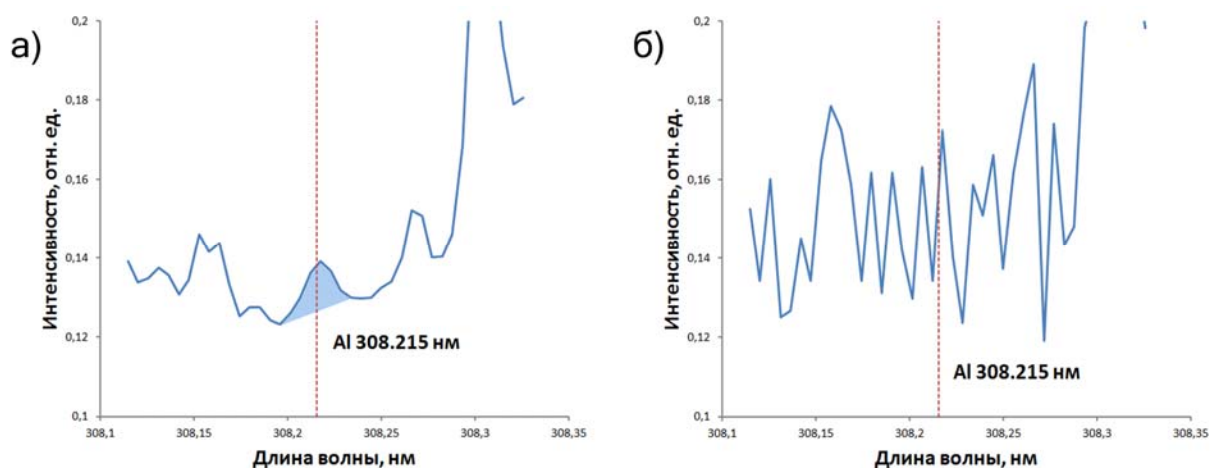


Рис. 3: а) участок интегрального спектра в окрестности линии алюминия;
 б) участок отдельного спектра, рожденного одним искровым разрядом,
 в окрестности линии алюминия

Так, в образце рельсовой стали, согласно измерениям на искровых спектрометрах «ARL iSpark 8860», «OBLF QSG750-II» и газовому фракционному анализу, содержится 29–30 ppm алюминия, из которых 3–5 ppm содержится в нерастворенном виде, то есть в неметаллических включениях. Этот образец был проанализирован на экспериментальной установке. Определение концентраций проводилось двумя способами. С использованием в качестве аналитического сигнала среднего значения интенсивности спектральной линии алюминия в ее зависимости от времени получена общая концентрация алюминия 49 ppm, из них 2,6 ppm в нерастворенном виде. По интенсивностям спектральной линии алюминия в интегральном и дополнительном интегральном спектрах – общая концентрация алюминия 30,5 ppm, из них 4 ppm в нерастворенном виде, что существенно ближе к значениям, полученным на указанных приборах.

Применение фона в качестве внутреннего стандарта

В случае регистрации спектров с помощью спектрометра на основе линейных ТДИ существует возможность учета уровня фона в непосредственной близости от спектральной линии. Это сказывается на результатах применения внутреннего стандарта. Даже при наличии корреляции между интенсивностями линий аналита и основы, нет уверенности в том, что использование отношения интенсивностей линий аналита к интенсивностям линии основы в качестве аналитического сигнала не приводит к возникновению ложных всплесков за счет низких значений интенсивности линии основы, которые могут быть вызваны дефектами на поверхности или в толще образца [11]. Поэтому был предложен алгоритм, который использует изменение уровня фона в спектрах отдельных искр относительно его среднего значения в качестве внутреннего стандарта [10].

Алгоритм был проверен на полусотне измерений и различных спектральных линиях в спектрах, полученных в результате этих измерений. Применение алгоритма приводит к снижению СКО интенсивности спектральной линии в ее зависимости от времени на величину от 10 до 50 %.

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности спектральной линии алюминия от номера искры (а) и та же зависимость после применения внутреннего стандарта (б). Видно, что за счет применения внутреннего стандарта, ОСКО сигнала снизилось более чем в полтора раза, что привело к увеличению количества зарегистрированных всплесков в 8 раз.

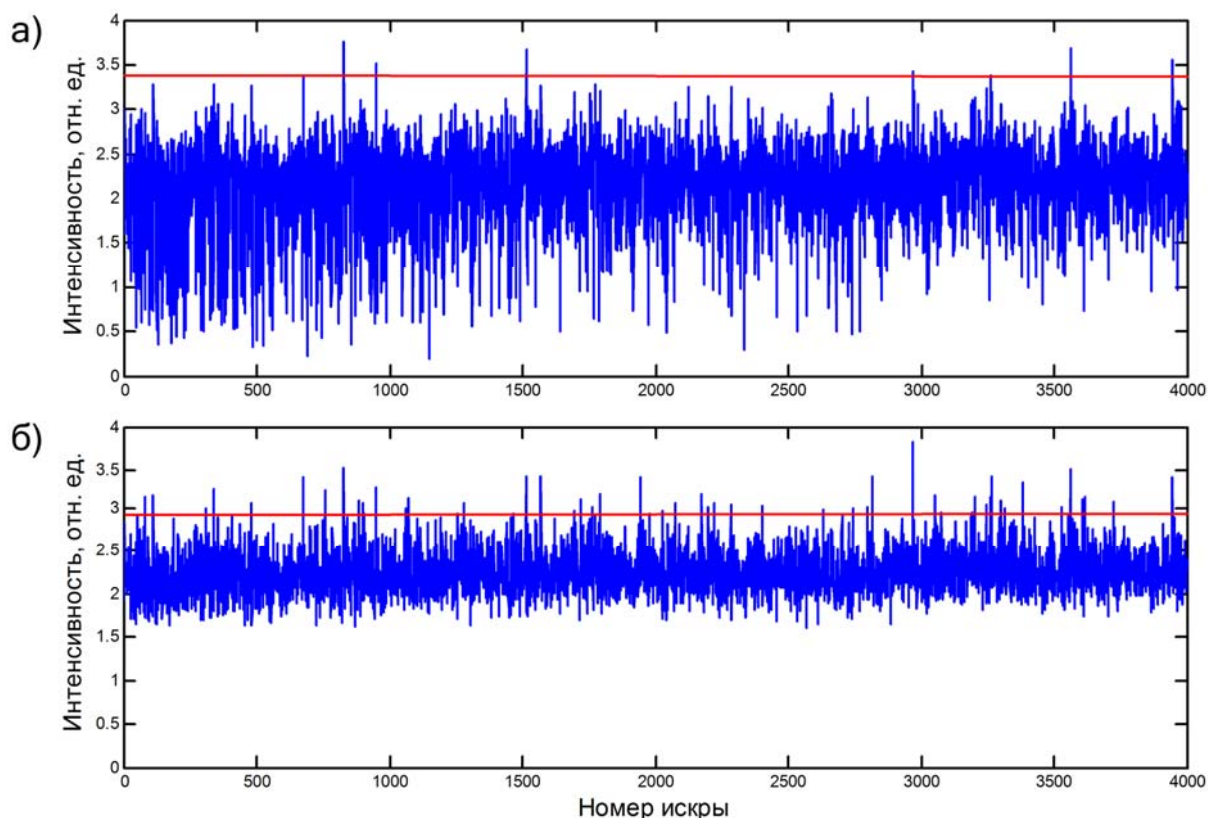


Рис. 4. Зависимость интенсивностей спектральной линии алюминия от номера искры в стандартном образце стали 129-4 (а), та же зависимость после применения внутреннего стандарта (б)

Определение содержания неметаллических включений в охарактеризованном образце рельсовой стали

На экспериментальной установке был исследован упомянутый выше охарактеризованный образец рельсовой стали. В таблице приведено сравнение результатов анализа этого образца, полученных на разных приборах и на экспериментальной установке. Отличия значений нерастворенных содержаний алюминия, титана и серы находятся в пределах 25 %. Учитывая уровень концен-

траций порядка единиц ppm (масс.) и неравномерное распределение неметаллических включений в объеме образца, можно считать, что эти данные хорошо согласуются между собой. Для определения нерастворенного кремния и марганца необходим высокоэнергетический режим искрового разряда, исследования с таким режимом на установке пока не проводились. Нерастворенное содержание магния существенно отличается на одном из приборов. Остальные данные отличаются друг от друга в пределах 50 % – при концентрации ниже 1 ppm, такой разброс можно считать удовлетворительным.

Результаты определения содержания неметаллических включений в образце рельсовой стали

	Al нераств, масс. ppm	Ti нераств, масс. ppm	S нераств, масс. ppm	Si нераств, масс. ppm	Mg нераств, масс. ppm
OBLF QSG750	3	20,4	–	–	не менее 0,5
ARL iSpark 8860	3,3	–	до 4	4	0,02
Газовый фракционный анализ	до 5,2	–	–	от 1 до 5,7	до 0,7
Экспериментальная установка	4	25,6	3	–	0,3

Выводы

На основе спектрометра «Гранд-Эксперт» была создана экспериментальная установка, в которой для регистрации спектров единичных искровых разрядов применяется гибридная сборка линейных ТДИ. В ходе работы показано, что современные линейные ТДИ обладают достаточной чувствительностью и быстродействием для решения задачи определения содержания включений, а информацию о форме спектральных линий, уровне и форме фона в непосредственной окрестности регистрируемой линии и спектральных наложениях, которую, в отличие от ФЭУ, предоставляют ТДИ, можно использовать для расширения возможностей спектрометра по определению неметаллических включений.

Разработанная однолинзовая система освещения входной щели, осуществляющая построение изображения искрового промежутка в окрестности дифракционной решетки, позволила повысить светосилу прибора в области ВУФ в три и более раз по сравнению с трехлинзовой системой и снизить относительное СКО интенсивностей спектральной линии в спектрах одиночных искр, соответствующих растворенному содержанию элемента, в среднем на 10 %. Кроме того, ее применение позволило расширить рабочий спектральный диапазон

спектрометра в область ВУФ до 130 нм и реализовать устройство для оперативной чистки линзы.

Применение дополнительного интегрального спектра для определения концентрации растворенной доли элемента позволило снизить пределы обнаружения растворенного содержания более чем в пять раз.

Способ применения фона в спектрах единичных искровых разрядов в качестве внутреннего стандарта позволил снизить СКО интенсивности спектральной линии в ее зависимости от времени на 10–50 %. Это привело к снижению пределов обнаружения включений до двух раз.

На экспериментальной установке было проведено определение содержания неметаллических включений в охарактеризованном образце рельсовой стали. Полученные данные соответствуют результатам измерений, проведенных с помощью спектрометров на основе ФЭУ и газового фракционного анализа, что подтверждает достоверность метода определения неметаллических включений на спектрометре с регистрацией спектров линейными ТДИ.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Григоровичу Константину Всеволодовичу за предоставление образца рельсовой стали, охарактеризованного по содержанию неметаллических включений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорович К. В. Новые возможности современных методов определения газообразующих примесей в металлах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 1. – С. 23–34.
2. Janis D. A Study of Different Methods for Inclusion Characterization towards On-line use during Steelmaking : дис. – KTH Royal Institute of Technology. – 2015.
3. Лабусов В. А. и др. Многоэлементные твердотельные детекторы излучения большого размера для атомно-эмиссионного спектрального анализа // Аналитика и контроль. – 2005. – Т. 9, № 2. – С. 104–109.
4. Лабусов В. А., Гаранин В. Г., Зарубин И. А. Новые спектральные комплексы на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 1-II. – С. 15–20.
5. Бабин С. А. и др. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1-II. – С. 108–113.
6. Бокк Д. Н., Лабусов В. А., Зарубин И. А. Определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1-II. – С. 92–97.
7. Бокк Д. Н. и др. Однолинзовая система освещения входной щели вакуумного спектрометра «Гранд-Эксперт» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 1-II. – С. 122–126.
8. Falk H., Wintjens P. Statistical evaluation of single sparks // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1998. – Т. 53, № 1. – С. 49–62.
9. Pande M. M., et al. Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis-optical emission spectroscopy technique // ISIJ International. – 2011. – Т. 51, № 11. – С. 1778–1787.

10. Бокк Д. Н., Лабусов В. А. Способ снижения пределов обнаружения неметаллических включений в металлических сплавах при их определении методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением // Аналитика и контроль. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 286–293.

11. Bohlen J. M., Vogeli M. Latest developments in inclusions and steel cleanliness analysis by OES // Proc. of 7th International Workshop on Progress in Analytical Chemistry in the Steel and Metal Industries. – 2006. – С. 219–223.

REFERENCES

1. Grigorovich, K. V. (2007). New Possibilities of Modern Methods for Determination of Gas-forming Impurities in Metals. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 73(1), 23–34 [in Russian].

2. Janis, D. (2015). A Study of Different Methods for Inclusion Characterization towards On-line use during Steelmaking (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).

3. Labusov, V. A., Popov, V. I., Behterev, A. V., Put'makov, A. N., & Pak, A. S. (2005). Large Multichannel Solid-state Detectors for Atomic-emission Spectrometry. *Analitika i Kontrol'* [Analytics and Control], 9(2), 104–109 [in Russian].

4. Labusov, V. A., Garanin, V. G., & Zarubin, I. A. (2017). New Spectral Systems Based on MAES Analyzers. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 83(1-II), 15–20 [in Russian].

5. Babin, S. A., Labusov, V. A., Seljunin, D. O., & Dzjuba, A. A. (2015). BLPP-2000 Array Based High-Speed Multichannel Analyzers of Atomic Emission Spectra. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1-II), 108–113 [in Russian].

6. Bock, D. N., Labusov, V. A., & Zarubin, I. A. (2015). Determination of Non-Metallic Inclusions in Metal Alloys by Spark Optical Emission Spectrometry. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1-II), 92–97 [in Russian].

7. Bock, D. N., Labusov, V. A., Zarubin, I. A., & Garanin, V. G. (2017). Single-lens Entrance Slit Illumination System for “Grand-Expert” Vacuum Spectrometer. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 83(1-II), 122–126 [in Russian].

8. Falk, H., & Wintjens, P. (1998). Statistical evaluation of single sparks. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 53(1), 49–62.

9. Pande, M. M., Guo, M., Dumarey, R., Devisscher, S., & Blanpain, B. (2011). Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis-optical emission spectroscopy technique. *ISI International*, 51(11), 1778–1787.

10. Bock, D. N., & Labusov, V. A. (2016). Means to Lower Non-metallic Inclusions Detection Limit during their Determination in Metal Alloys by Spark Optical Emission Spectrometry. *Analitika i Kontrol'* [Analytics and Control], 20(4), 286–293 [in Russian].

11. Bohlen, J. M., & Vogeli, M. (2006). Latest developments in inclusions and steel cleanliness analysis by OES. In *Proceedings of 7th International Workshop on Progress in Analytical Chemistry in the Steel and Metal Industries* (pp. 219–223).

© Д. Н. Бокк, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, В. Г. Гаранин, 2018

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ксения Дмитриевна Волкова

ООО «Оптическое Расчетное Бюро», 630120, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 200, инженер-конструктор, тел. (923)240-77-94; e-mail: volkova_kd@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Приводятся и обсуждаются оптические схемы объективов для телескопических систем с переменным увеличением. Показано, что применение оптических схем объективов с вынесенным выходным зрачком, который располагается в центре качания панкратической оборачивающей системы или вблизи от него, позволяет увеличить диапазон углов выверки, прицеливания и поправки. Найдены соотношения между параметрами оптической схемы объектива, длиной оборачивающей панкратической системой, положением выходного зрачка прицела. Приводятся результаты разработки оптических систем панкратических прицелов с использованием полученных соотношений и характеристик объективов.

Ключевые слова: объектив, переменное увеличение, панкратический прицел, телескопическая система, панкратическая система, оптическое проектирование, выходной зрачок.

FEATURES OF DESIGNING OBJECTIVE FOR TELESCOPIC ZOOM SYSTEMS

Ksenia D. Volkova

Optical Design Office Co Ltd, 200, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630120, Russia, Design Engineer, phone: (923)240-77-94; e-mail: volkova_kd@mail.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Optical systems of objective lenses for telescopic systems with variable magnification are discussed. The article provides the exit pupil of objective lenses for sights should be located in the center rotation of zoom erector system. It is allows to increase the range of windage and elevation adjustments in the system. The relationships between the parameters and characteristics of objective lenses, the length of the zoom system and the position of the exit pupil are found. The results of the development of optical zoom systems for telescopic sights using the obtained ratios and characteristics are presented.

Key words: objective lenses, variable magnification, zoom, optical zoom sight, zoom rifle-scope, optical telescopic system, afocal system, optical zoom relay system with two moving components, zoom system, optical design, exit pupil.

Введение

Проектирование панкратических телескопических систем – сложный взаимодополняющий, итерационный процесс [1, 2], который включает этапы расчетов характеристик и параметров отдельных компонентов и их совокупности. Объект исследования направлен на группу панкратических телескопических приборов [3, 4], исследование рассматривает особенности проектирования объективов панкратических телескопических систем, зависимость параметров и характеристик объективов таких систем от общих характеристик телескопической системы.

В разное время оптики-расчетчики затрагивали вопрос проектирования панкратических телескопических систем и уделяли различным аспектам проектирования этой группе приборов, например [5–13], но анализируя монографии и статьи можно сказать, что описанию расчета объективов группе панкратических телескопических систем была уделена в них самая малая часть работы. Это объясняется тем, что, если в панкратической телескопической системе осуществлялась смена увеличения за счет оборачивающей системы, то требования к параметрам и характеристикам объективов оставались теми же, что и в простых зрительных трубах с постоянным увеличением.

Согласно [7, с. 90], выбор оптимальных значений параксиальных характеристик представляет собой неоднозначную задачу, решение которой можно получить «в результате проведения исследований и получения возможной области рациональных решений». Хотя эта фраза, в большей степени, относится в монографии к выбору параметров и характеристик именно к оборачивающей панкратической системе, она, как нельзя лучше, иллюстрирует многовариантность и, одновременно, необходимость поиска оптимального соотношения всех характеристик во всей системе в процессе расчета.

Схемные решения, обеспечивающие изменение визирной оси при сохранении изображения визирного знака в центре поля зрения

На больших дальностях с целью прицеливания важно использовать большое увеличение, которое вступает в противоречие с возможностью обеспечения необходимого размера угла изменения направления визирной линии прицела (суммарных углов прицеливания, поправок и выверки) [14]. Это противоречие поставило задачу, которая привела к появлению схемных решений с панкратическими оборачивающими системами, выполненных качающимися [15]. На рис. 1 приведена оптическая система, иллюстрирующая схему панкратического визирного прибора в тонких компонентах с качающейся оборачивающей системой: компоненты оборачивающей системы 4, 5 и сетка 3 поворачиваются в пределах небольшого угла $\pm\beta$ вокруг центра качания O , совпадающего с центром полевой диафрагмы 6, расположенной во второй плоскости промежуточного изображения.

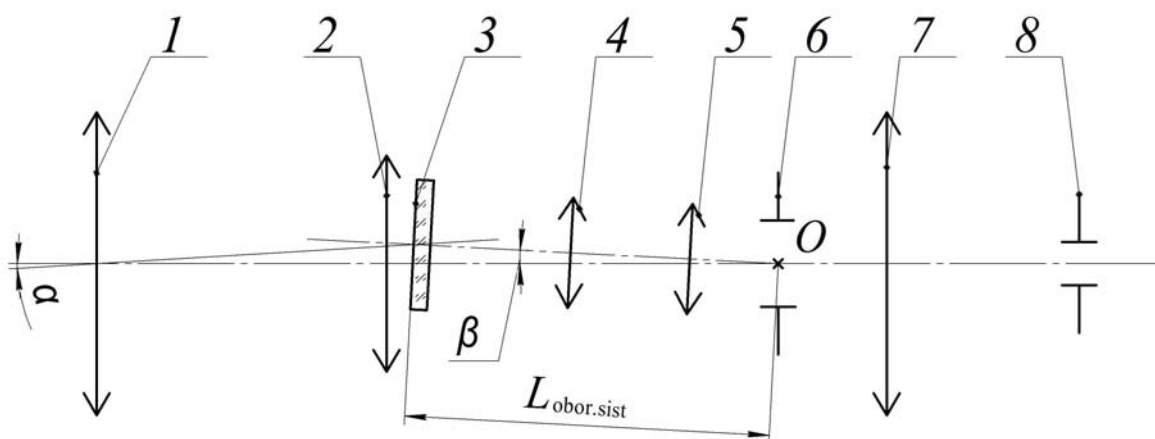


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема панкратического прицела в тонких компонентах:

1 – первый компонент объектива; 2 – второй компонент объектива; 3 – сетка; 4 – первый компонент панкратической оборачивающей системы; 5 – второй компонент панкратической оборачивающей системы; 6 – полевая диафрагма; 7 – окуляр; 8 – выходной зрачок

Использование схемных решений на основе качающейся панкратической оборачивающей системы в прицеле имеет несомненные преимущества. Изображение прицельной марки на сетке 3 при изменении направления визирной линии в пространстве предметов остается в центре поля зрения окуляра 7. При проектировании панкратического визирного прибора с качающейся оборачивающей системой обеспечивается следующее соотношение:

$$f'_{ob} \operatorname{tg} \alpha = L_{obor} \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где f'_{ob} – эквивалентное фокусное расстояние объектива 1 и 2, мм; L_{obor} – расстояние вдоль оптической оси между первой и второй плоскостями действительных изображений (длина оборачивающей системы 4, 5), мм; β – угол качения плоскопараллельной пластинки 3 с прицельной маркой и шкалами и оборачивающей системы 4 и 5, градус; α – угол изменения направления визирной оси в пространстве предметов, градус.

Согласно соотношению (1), угол изменения направления визирной оси α в пространстве предметов может превышать угловое поле при наибольшем увеличении (рис. 2), что, соответственно, дает преимущество в виде увеличения диапазона вводимых углов прицеливания, углов выверки и поправок. Следовательно, поле зрения в первой плоскости действительного изображения (объектива 1, 2), на которое должен быть рассчитан объектив, определяется согласно:

$$2y'_{ob.max} = 2y'_{\Gamma min} + 2y', \quad (2)$$

где $2y'_{ob.max}$ – максимальный линейный размер в первой плоскости действительного изображения (расчетное поле зрения объектива на рис. 2) с учетом углов выверки, поправки и прицеливания и максимального поля зрения при минимальном увеличении визирной системы, мм; $2y'_{Гmin}$ – максимальное поле зрения объектива в пространстве изображения при минимальном увеличении визирной системы, мм; $2y'$ – поле зрения в плоскости действительного изображения объектива, которое необходимо обеспечить из-за качания панкратической оборачивающей системы (для ввода углов выверки, прицеливания и поправок), мм.

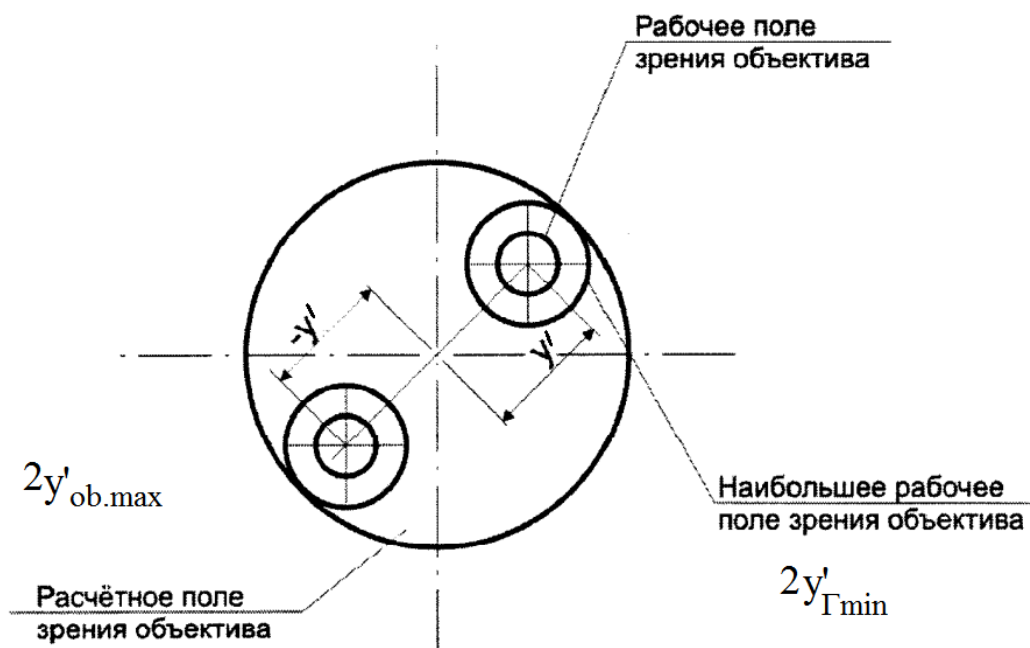


Рис. 2. Наибольшее рабочее поле зрения объектива

При размещении прицельной марки в плоскости первого промежуточного изображения, т. е. в фокальной плоскости объектива 1 и 2 (*first focal plane* – FFP) исключаются первичные ошибки, обусловленные подвижками компонентов панкратической оборачивающей системы (4 и 5) и вызывающие смещение визирной линии при смене увеличения, что имеет существенное значение для тактических оптических прицелов. А так же пользователи считают преимуществом прицелов FFP то, что прицельный знак, шкалы и марки не меняют свой угловой размер относительно объекта при смене увеличения прицела.

В соответствии с описанной выше схемой, при разработке оптических систем с компонентами конечной толщины представляется важным проведение исследований по выводу закономерностей между параметрами и характеристиками ее компонентов, которые позволяют на этапе функционально-структурного синтеза создать такую схему, которая способна удовлетворить совокупности требований, предъявляемых к рассматриваемым изделиям. Поэтому данная статья фокусируется на получении закономерностей в объективах панкратических прицелов FFP.

Зависимости между параметрами и характеристиками панкратического прицела и компонентов объектива

Разработка панкратической визирной системы, как и многие другие задачи в оптическом проектировании, является в большей степени итерационным процессом с целью поиска наилучшего оптимального решения, но сложным из-за большого количества неизвестных, которые, тем не менее, связаны между собой рядом соотношений и зависимостей, приведенных далее.

Анализ характеристик и параметров более 200 моделей оптических панкратических прицелов отечественных и зарубежных производителей, в которых сетка размещена в плоскости изображения объектива (*FFP*), показал, что *zoom*, равный пяти и более, имеют менее половины моделей. При этом в тех моделях, где указана информация о конструктивных внешних характеристиках, можно судить о длине объектива и оборачивающей системы. Длина объектива колеблется от 80 до 260 мм, а длина оборачивающей системы – от 80 до 145 мм, это можно записать в виде выражений:

$$0,3L \leq L_{ob} \leq 0,55L, \quad (3)$$

$$0,21L \leq L_{obor} \leq 0,33L, \quad (4)$$

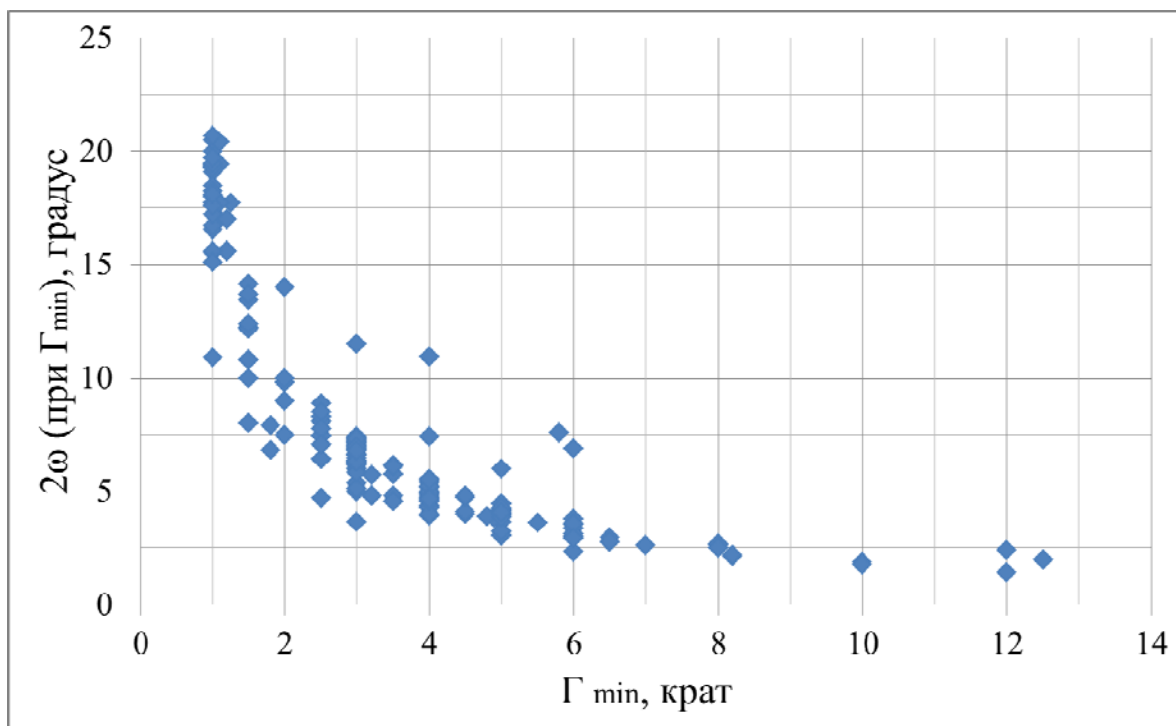
где L_{ob} – длина объектива от первой поверхности до первой плоскости действительного изображения, мм; L_{obor} – длина панкратической оборачивающей системы от первого до второго действительного изображения системы, мм; L – длина панкратической визирной системы от первой поверхности объектива до последней поверхности окуляра, мм.

С целью обеспечения величины качания панкратической оборачивающей системы меньше, чем угол прицеливания, выверки и поправок, и выполняя условие сохранения положения изображения прицельной марки в центре поля зрения при изменении направления визирной оси визирной системы, в соответствии с формулой (1), на фокусное расстояние объектива поставлено ограничение

$$0,5L_{obor} \leq f'_{ob} \leq 1L_{obor}. \quad (5)$$

В совокупности с вышесказанным о соотношении углов α и β в формуле (1), условие для f'_{ob} – меньше или равно длины L_{obor} , обусловлено ограничением посадочного места в механике прицела для его крепления на оружии, при этом сохраняя оптимальные относительные отверстия компонентов оборачивающей системы.

Суммарный угол поправок, выверки и прицеливания ограничен техническим заданием, которое составляется с учетом мирового уровня максимального угла поля зрения при минимальном увеличении, полученного, например, эмпирическим путем через исследование – рис. 3.



$$a'_{ob.P'} \geq L_{obor} - a'_{ob.F'}, \quad (8)$$

где $a'_{ob.F'}$ – положение плоскости действительного изображения объектива относительно главной плоскости второго компонента объектива, этот параметр не может быть меньше нуля (мм); $a'_{ob.P'}$ – положение выходного зрачка относительно главной плоскости второго компонента объектива (мм).

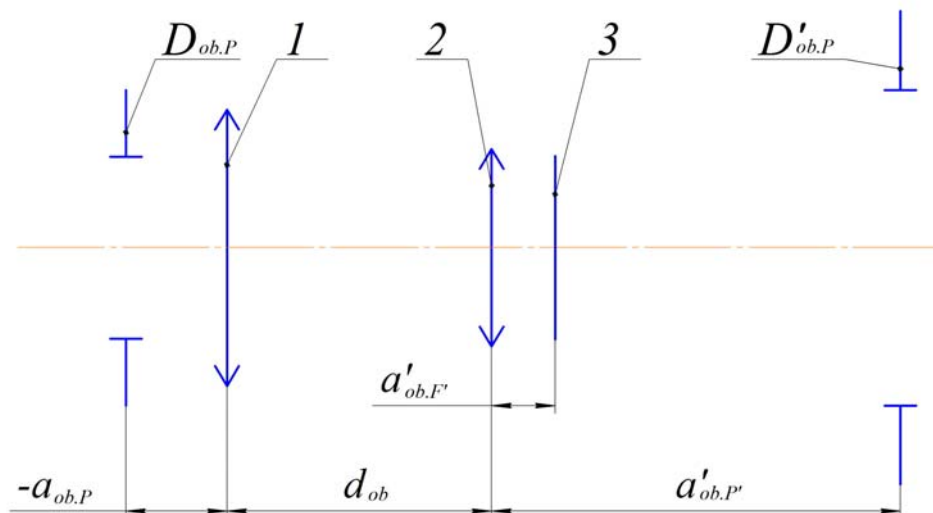


Рис. 4. Принципиальная схема объектива панкратической визирной системы в тонких компонентах:

$D_{ob.P}$ – входной зрачок объектива; 1 – первый линзовый компонент; 2 – второй линзовый компонент; 3 – плоскость изображения; $D'_{ob.P}$ – выходной зрачок объектива

Расширив диапазон для учета всех возможных вариантов, получаем условие ограничения на положение выходного зрачка в числовом выражении

$$a'_{ob.P'} \geq 60. \quad (9)$$

Положение входного зрачка объектива, соответствующее положению его выходного зрачка, рассчитывается по формуле

$$a_{ob.P} = \frac{f'_1(a'_{ob.P'}f'_2 + d_{ob}(f'_2 - a'_{ob.P'}))}{f'_1f'_2 - f'_1a'_{ob.P'} - f'_2a'_{ob.P'} + d_{ob}(a'_{ob.P'} - f'_2)}, \quad (10)$$

где f'_1 – фокусное расстояние (мм) первого линзового компонента объектива (поз. 1 на рис. 4); f'_2 – фокусное расстояние (мм) второго линзового компонента объектива (поз. 2 на рис. 4); d_{ob} – расстояние (мм) по оси между тонкими компонентами объектива; $a_{ob.P}$ – положение входного зрачка относительно главной плоскости первого компонента объектива (мм).

При нахождении областей ограничений и областей решений параметров и характеристик объективов панкратических визирных систем численными методами было просчитано и рассмотрено около 100 тыс. вариантов систем. Значение шага характеристик f'_1, f'_2 при расчетах было принято равным 5 мм, а шаг d был принят равным 10 мм.

В массиве полученных решений была сделана выборка области решений, приемлемых при разработке оптических систем с линзами конечной толщины. Для этого накладывались ограничения на ряд параметров.

В силу ограничения по относительному отверстию объектива, габаритным характеристикам объектива – длине системы, удалению выходного зрачка и др. (1)–(10) введено ограничение на фокусное расстояние объектива

$$60 \leq f'_{ob} \leq 170. \quad (11)$$

Учитывая необходимость уменьшения массогабаритных характеристик системы, расстояние по оси d (мм) между тонкими компонентами объектива было задано

$$50 \leq d_{ob} \leq 300, \quad (12)$$

несмотря на то, что верхняя граница параметра имеет большее значение, опыт в расчете оптических систем, в том числе панкратических визирных приборов, дает возможность учесть то, что усложнение каждого из двух параксиальных компонентов, принятых в модели, до двух или трех линзовых компонентов, позволит уменьшить длину на треть в системах с компонентами конечной толщины, следовательно

$$(d_{ob} + a'_{ob.F'}) \leq (1 \div 1,5) L_{ob}, \quad (13)$$

где L_{ob} – длина объектива, состоящего из компонентов конечной толщины, по характеристикам и параметрам аналогичным параксиальной модели объектива. От разделения на большее количество компонентов в исходной системе было решено отказаться в виду повышения вариативности параметров и характеристик, которые было бы сложно анализировать. Для вычисления $a'_{ob.F'}$ используется следующее выражение

$$a'_{ob.F'} = \frac{(f'_1 - d_{ob})f'_2}{f'_1 + f'_2 - d_{ob}}. \quad (14)$$

Исходя из ограничения на относительное отверстие второго компонента объектива, которое было наложено вследствие анализа примера исполнения объектива в прицеле с качающейся панкратической системой [15], фокусное расстояние второго компонента должно находиться в диапазоне

$$50 \leq f'_2 \leq 150. \quad (15)$$

На одном из этапов вычислений с точки зрения оптимизации скорости компьютерных вычислений и их анализа, а так же конструкции объективов (первый компонент должен быть длиннофокусным, но в случае отрицательного значения фокусного расстояния не может сильно увеличивать световые диаметры линз второго компонента объектива) было принято ограничение

$$\begin{aligned} -250 \leq f'_1 \leq -120; \\ 120 \leq f'_1 \leq 600. \end{aligned} \quad (16)$$

Так как f'_1 приближается к плюс бесконечности, то оптическая сила первого компонента окуляра (дптр) $\Phi_1 \rightarrow 0$. Ограничение принято в виду того, что дальнейшее увеличение диапазона незначительно влияет на результат исследования, но существенно увеличивает время вычисления и анализа результатов.

При выполнении всех перечисленных выше условий и ограничений (1)–(16) было отобрано и проанализировано около 2,5 тыс. вариантов систем.

На рис. 5 приведены области решений характеристик объективов панкратических систем в зависимости от различных переменных. Обозначение систем на рис. 5 и далее по тексту расшифровывается: $\Gamma_{min} - \Gamma_{max} \times D$, где Γ_{min} – минимальное увеличение, крат; Γ_{max} – максимальное увеличение, крат; D – диаметр входного зрачка, мм.

Результаты, представленные на рис. 5, а, демонстрируют взаимосвязь оптических сил компонентов объектива (Φ_1 и Φ_2) и расстояния между ними и позволяют определить области решений для нахождения соотношения «оптическая сила компонента – расстояние между компонентами». Взаимосвязь между оптическими силами первого и второго компонентов от оптической силы объектива иллюстрирует рис. 5, б.

Согласно рис. 5, в, можно сделать вывод о зависимости положения выходного зрачка объектива и фокусного расстояния объектива. Рисунок 5 г демонстрирует зависимость решений положения выходного зрачка объектива от оптической силы объектива для случая, когда входной зрачок совпадает с главной плоскостью первого компонента объектива.

По результатам проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы и рекомендации.

В телескопических оптических системах с панкратической сменой увеличения, в которых требуется обеспечить диапазон вводимых углов прицеливания, углов выверки и поправок не меньше поля зрения при наибольшем увеличении и при этом выполнить условие сохранения положения изображения прицельной марки в центре поля зрения, необходимо учесть ряд условий и ограничений (11), (12), (15), (16) при проектировании оптической системы объектива.

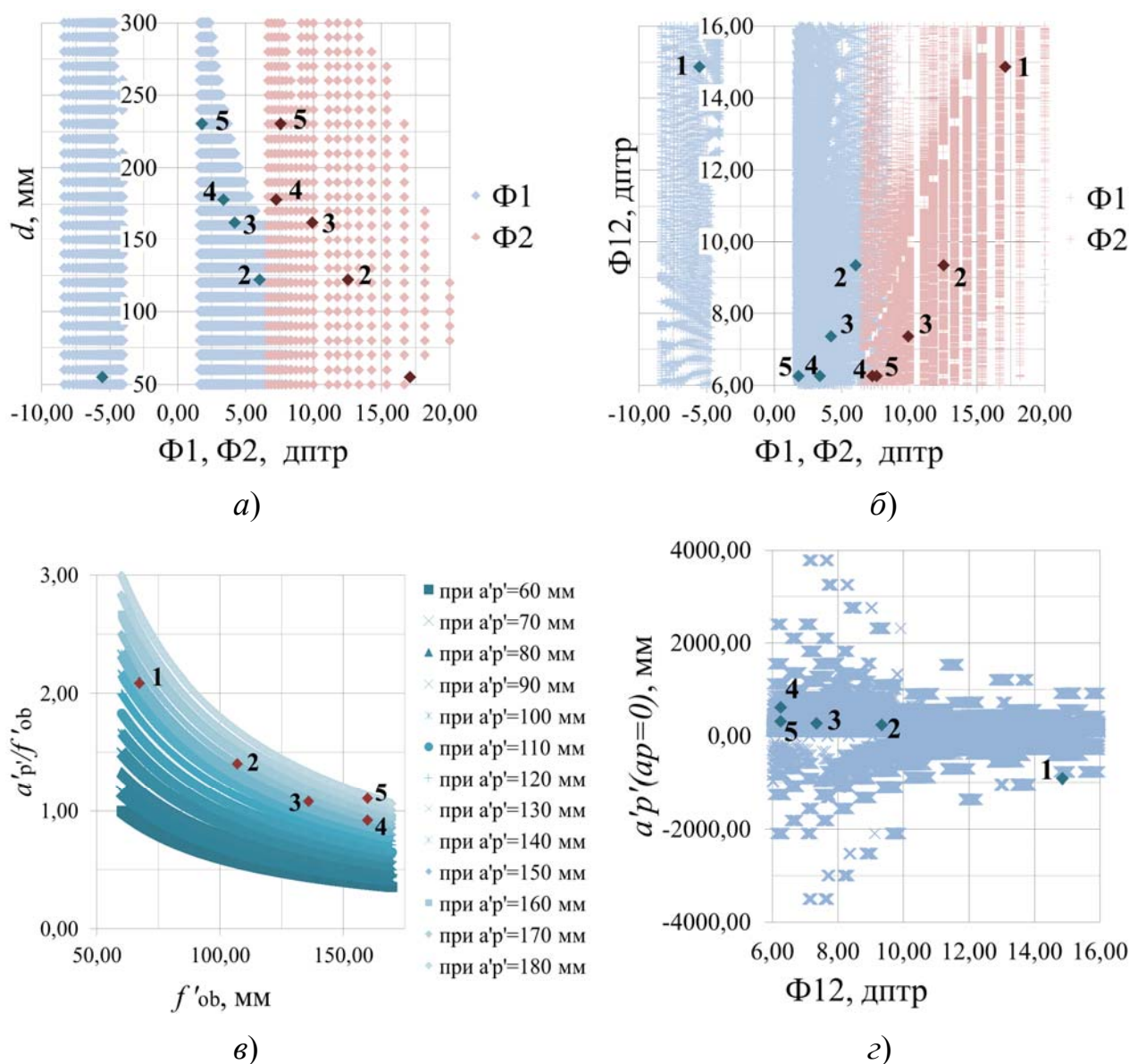


Рис. 5. Области ограничений и решений параметров и характеристик объективов панкратических телескопических систем:

1 – система 1,2–6×26; 2 – система 2–10×46; 3 – система 3–15×50; 4 – система 4–20×56; 5 – система 5–25×56

С целью обеспечения угла качания панкратической оборачивающей системы меньше, чем диапазон углов прицеливания, поправок, выверки, при расчете нужно учесть, что выходной зрачок объектива должен находиться вблизи центра качания панкратической оборачивающей системы, который должен располагаться во второй плоскости действительного изображения системы.

При расчете объектива необходимо проводить проектирование при угле поля зрения большим, чем угол поля зрения при наименьшем увеличении, а именно: расчетный рабочий угол поля зрения объектива должен быть не меньше суммы углов поля зрения при наименьшем увеличении и диапазона углов прицеливания, поправок, выверки.

Первый компонент объектива должен быть длиннофокусным, но в случае отрицательного значения фокусного расстояния компонента, не должен увеличивать световой диаметр первой линзы второго компонента объектива более чем на 5 %. Второй компонент объектива является «силовым». Поэтому дополнительно рекомендуется наложить ограничения на фокусное расстояние второго компонента объектива, которое будет меньше фокусного расстояния всего объектива в $1,1 \div 4$ раза. В этом случае длина объектива будет находиться в диапазоне от 1 до 1,3 фокусного расстояния объектива.

В следующем разделе статьи представлены результаты расчета по предложенной выше методике.

Применение методики

Результаты исследования апробированы при разработке оптических систем с компонентами конечной толщины оптических панкратических прицелов с $zoom = 5$.

На рис. 5, 6 приведены результаты разработок, представленные с позиций параметров исследованных объективов и положения выходного зрачка объектива при проектировании объективов визирных систем.

На рис. 5 отмечены точками 1–5 соответствующие значения решений характеристик объективов, положенных в основу разработанных оптических систем панкратических прицелов.

На рис. 6 показаны границы диапазонов изменения положения выходного зрачка объектива ($a'_{ob,p1}$, $a'_{ob,p2}$) в системах с компонентами конечной толщины в зависимости от крайних значений положений выходного зрачка всего прицела, результаты исследования по которому представлены в публикации [5]. Во всех системах смещение выходного зрачка прицела не превышает 5–10 % от номинального значения удаления выходного зрачка (95 мм). На рис. 6 также показано положение точки качания О относительно последней поверхности объектива (a'_O , в мм), на основании которого можно сделать вывод, что в некотором диапазоне увеличений точка О находится в диапазоне положений выходного зрачка объектива. Для четырех из пяти приведенных систем этот диапазон увеличений имеет наименьшие значения увеличений, что легко объясняется тем, что при меньших увеличениях требование к положению выходного зрачка, для обеспечения условия получения большого диапазона углов прицеливания, выверки и поправки, при виньетировании, не превышающим возможное для полевых наблюдательных приборов [17], более жесткое, чем при больших увеличениях, где угловые поля зрения в соответствующее количество раз меньше. Дополнительно рис. 6 подтверждает, что проектирование панкратических систем с $zoom$ выше 4 более сложная задача, с точки зрения оптического расчета – для этого достаточно обратить внимание на характер изменения кривых: когда $zoom$ начинает превышать 4, зависимости, близкие по характеру к линейным, резко меняют свой вид на зависимости высших порядков.

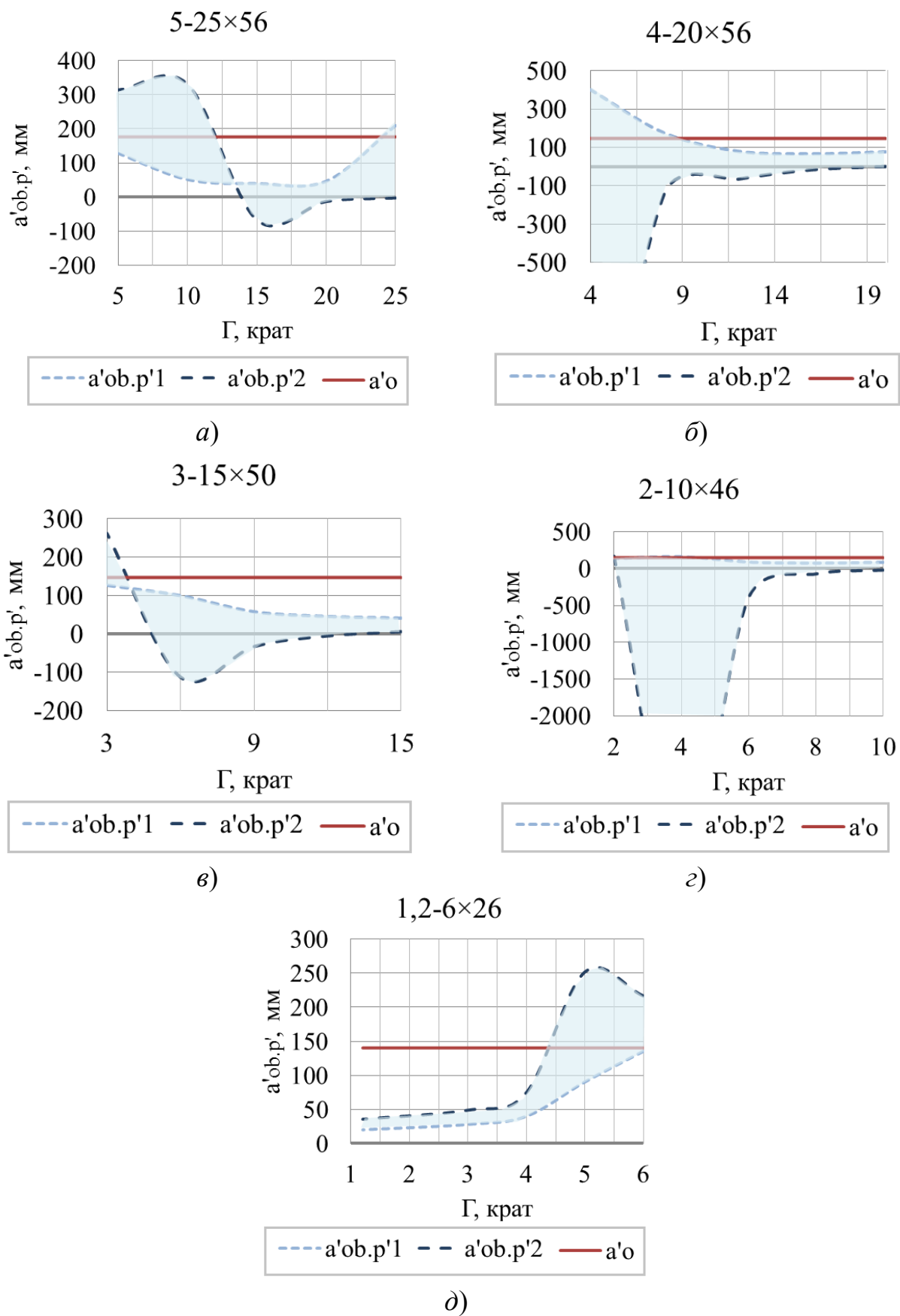


Рис. 6. Области решений положения выходного зрачка объективов панкратических прицелов:

а) 5–25×56; б) 4–20×56; в) 3–15×50; г) 2–10×46; д) 1,2–6×26

Все оптические системы обеспечивают качество изображения, соответствующее критериям «хорошо» и «отлично», применяемым для полевых наблюдательных приборов [7, 18, 19]. В качестве примера на рис. 7 представлена оптическая схема оптической панкратической визирной системы, построенной с использованием только сферических преломляющих поверхностей, со следующими оптическими характеристиками: увеличение от 4 до 20 крат, диаметр входного зрачка 56 мм, длина 362 мм. Таким образом, при разработке оптических систем панкратических прицелов с $zoom = 5$, доказана эффективность полученных рекомендаций и выводов с целью обеспечения диапазона вводимых углов прицеливания, углов выверки и поправок не меньше поля зрения при наибольшем увеличении и одновременном выполнении условия изменения направления визирной оси прицела при сохранении положения изображения прицельной марки в центре поля зрения.

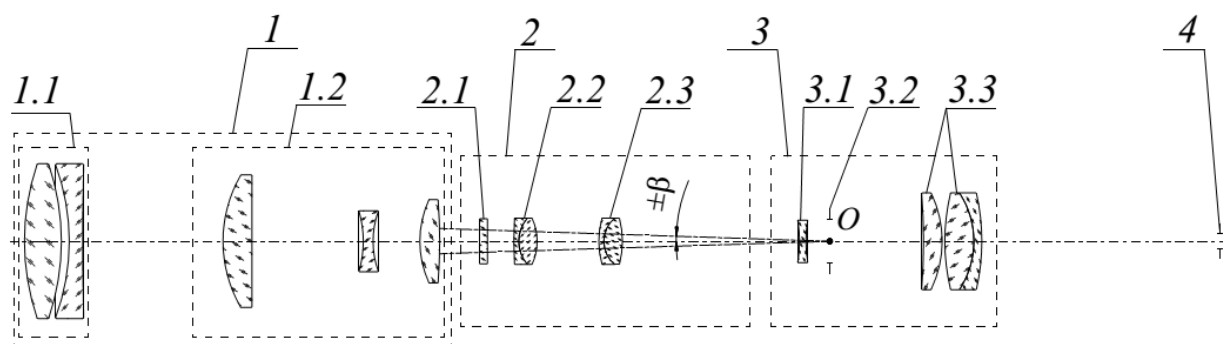


Рис. 7. Схема панкратического прицела 4–20×56:

1 – объектив; 2 – качающаяся оборачивающая панкратическая система; 3 – окуляр; 4 – выходной зрачок; 1.1 – первый компонент объектива; 1.2 – второй компонент объектива; 2.1 – сетка; 2.2 – первый компонент оборачивающей панкратической системы; 2.3 – второй компонент оборачивающей панкратической системы; 3.1 – первый компонент окуляра; 3.2 – полевая диафрагма; 3.3 – второй компонент окуляра; O – центр поворота панкратической оборачивающей системы

По мнению авторов, результаты проведенного исследования могут быть востребованы на этапе структурного синтеза и разработки оптических систем новых панкратических прицелов, в том числе и с $zoom$ более 5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шехонин А. А. Домненко В. М., Гаврилина О. А. Методология проектирования оптических приборов : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
2. Systematic design processes to improve the manufacturability of zoom lenses / Chir-Weei Chang, Chy-Lin Wang, Chuan-Chung Chang, et al. // Proc. SPIE 6342 : International Optical Design Conference 2006. – 2006. – Vol. 6342. – С. 634228-1 – 634228-8.
3. Волкова К. Д., Хацевич Т. Н. Оптические системы с переменными характеристиками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Си-

бОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 13–20.

4. Волкова К. Д., Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Особенности оптического проектирования систем с дискретной сменой увеличения с учетом технологических возможностей отечественных производителей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 191–201.

5. Хацевич Т. Н., Волкова К. Д. Обеспечение стабильности положения выходного зрачка при смене увеличения в оптических панкратических прицелах // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 9. – С. 34–43.

6. Заварзин В. И. Оптический прицел переменного увеличения // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2009. – № 2. – С. 10–21.

7. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. – М. : Логос, 2000. – 584 с.

8. Михайловская Л. И. Панкратическая зрительная труба : учеб. пособие. – М. : МГТУ, 1993. – 31 с.

9. Чижигов В. А., Ермакова Л. В. Оптическая схема панкратических прицелов для спортивного и охотничьего оружия // Оптико-механическая промышленность. – 1977. – № 8. – С. 70–72.

10. Чижигов В. А. Оптические системы прицелов для спортивного и охотничьего оружия // Оптико-механическая промышленность. – 1978. – № 8. – С. 44–47.

11. Малогабаритная панкратическая зрительная труба / Е. Н. Гончаренко, Л. П. Осипова, В. В. Луцько, О. Д. Шакало // Оптико-механическая промышленность. – 1975. – № 7. – С. 29–31.

12. Нгуен Ван Луен. Автоматизация проектирования панкратической телескопической системы // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 12. – С. 22–25.

13. Пахомов И. И. Панкратические системы. – М. : «Машиностроение», 1976. – 160 с.

14. Бутримов И. С., Айрапетян В. С. Оптико-электронный комплекс для контроля положения линии визирования прицельных устройств в ходе стендовых испытаний // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 124–138.

15. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Пат. 2501051 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 В 23/10, F 41 G 1/38. Способ изменения направления визирной оси в оптическом прицеле и прицел с переменным увеличением, реализующий способ; патентообладатели Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2012124196/28; заявл. 09.06.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

16. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В., Волкова К. Д. Пат. 2642889 Российская Федерация, МПК G 02 В 23/00, F 41 G 1/38. Оптический прицел (варианты); патентообладатель ООО «Оптическое Расчетное Бюро» – № 2016118898; заявл. 16.05.2016; опубл. 29.01.2018, Бюл. № 4.

17. Панов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 742 с.

18. Хацевич Т. Н. Прикладная оптика. Лабораторный практикум. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 108 с.

19. Верхотуров О. П. Введение в вычислительную оптику : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 1998. – 273 с.

REFERENCES

1. Shehonin, A. A., Domnenko, V. M., & Gavrilina, O. A. (2006). Metodologija proektirovanija opticheskikh priborov [The methodology of designing optical devices]. Saint Petersburg: ITMO University [in Russian].

2. Chir-Weei Chang, Chy-Lin Wang, Chuan-Chung Chang, et al. (2006). Systematic design processes to improve the manufacturability of zoom lenses. *Proceedings of SPIE 6342: International Optical Design Conference 2006*, Vol. 6342, 634228-1–634228-8. doi: 10.1117/12.692249.
3. Volkova, K. D., & Khatsevich, T. N. (2014). Optical systems with variable characteristics. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2014 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2014]* (pp. 13–20). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
4. Volkova, K. D., Druzhkin, E. V., & Khatsevich, T. N. (2015). Specialty optical design of discrete systems according to technological possibilities of domestic producers. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. SibOptika-2015 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3. SibOptics-2015]* (pp. 191–200). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
5. Khatsevich, T. N., & Volkova, K. D. (2017). Stabilization of the exit pupil in an optical zoom sight with variable magnification. *Journal of Optical Technology*, 84(9), 605–612. doi: 10.1364/JOT.84.000605.
6. Zavarzin, V. I. (2009). Optical zoom sight. *Vestnik MGTU im. Bauman [Vestnik MSTU]*, 2, 10–21 [in Russian].
7. Zaprjagaeva, L. A., & Sveshnikova, I. S. (2000). *Raschet i proektirovanie opticheskikh sistem [Calculation and Design of an Optical Systems]*. Moscow: Logos [in Russian].
8. Mihajlovskaja, L. I. (1993). *Pankraticheskaja zritel'naja truba [Zoom telescope]*. Moscow: MSTU [in Russian].
9. Chizhikov, V. A., & Ermakova, L. V. (1977). Optical system of zoom sights for sporting and hunting weapons. *Optiko-mehanicheskaja promyshlennost' [Optical and Mechanical Industry]*, 8, 70–72 [in Russian].
10. Chizhikov, V. A. (1978). Optical sights for sporting and hunting weapons. *Optiko-mehanicheskaja promyshlennost' [Optical and Mechanical Industry]*, 8, 44–47 [in Russian].
11. Goncharenko, E. N., Osipova, L. P., Luc'ko, V. V., & Shakalo, O. D. (1975). Compact zoom telescope. *Optiko-mehanicheskaja promyshlennost' [Optical and Mechanical Industry]*, 7, 29–31 [in Russian].
12. Van Luen, N. (2013). Automation of the design of a telescopic zoom system. *Journal of Optical Technology*, 80(12), 735–737. doi: 10.1364/JOT.80.000735.
13. Pahomov, I. I. (1976). *Pankraticheskie sistemy [Zoom systems]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
14. Butrimov, I. S., & Ajrapetjan, V. S. (2016). Optical electronic complex for control of checking lines' position of sighting unit during stand tests. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 124–138 [in Russian].
15. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2012). Patent RF No 2501051. Novosibirsk: IP Russian Federation.
16. Khatsevich, T. N., Druzhkin, E. V., & Volkova, K. D. (2017). Patent RF No 2642889. Novosibirsk: IP Russian Federation.
17. Panov, V. A., Kruger, M. Ja., Kulagin, V. V., et al. (1980). *Spravochnik konstruktora optiko-mehanicheskikh priborov [Handbook of the designer of optical-mechanical devices]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
18. Khatsevich, T. N. (2006). *Prikladnaja optika [Applied Optics]*. Novosibirsk: SSGA [in Russian].
19. Verhoturov, O. P. (1998). *Vvedenie v vychislitel'nuju optiku [Introduction to Computational Optics]*. Novosibirsk: SSGA [in Russian].

© К. Д. Волкова, Т. Н. Хацевич, 2018

КОМПЬЮТЕРНАЯ РАСШИФРОВКА АНАЛОГОВЫХ ГОЛОГРАММ

Владимир Иванович Гужов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных, тел. (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

Сергей Петрович Ильиных

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, тел. (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

Григорий Александрович Поздняков

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (383)346-08-46, e-mail: worlaff@gmail.com

Показана система оцифровки голограмм, записанных на фотографических пластинах. Приведена оптическая схема получения голограмм. Основой системы регистрации является модифицированный оптический микроскоп. Модификация заключается в установке камеры в качестве окуляра и предметного автоматизированного столика для перемещения объекта. Качество сшивания было достигнуто путем программного выбора особых точек в изображениях. Система позволяет оцифровывать голограммы размером до 100×100 мм. Наблюдение и оцифровка голограмм осуществлялись в проходящем свете. Расшифровывались голограммы Фурье и Френеля. Рассмотрены вопросы выбора необходимого пространственного разрешения. Проведен анализ голограмм с углами между опорным и объектным пучками 5, 10, 15 и 20 градусов соответственно.

Ключевые слова: голография, оптическая микроскопия, микрообъективы, интерференция, цифровая голография, преобразование Френеля, преобразование Фурье.

COMPUTER DECODING OF ANALOG HOLOGRAMS

Vladimir I. Guzhov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

Sergej P. Ilinykh

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

Grigorij A. Pozdnjakov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)346-08-46, e-mail: worlaff@gmail.com

The system of digitization of the holograms which are written down on photographic plates is shown. The optical scheme of obtaining holograms is provided. A basis of system of registration is the modified optical microscope. Modification consists in installation of the camera as an eyepiece and the subject automated little table for movement of an object. The quality of sewing together has been reached by the program choice of special points in images. The system allows digitizing holo-

grams up to 100×100 mm in size. Observation and digitization of holograms were carried out in the passing light. Fourier and Fresnel's holograms were deciphered. Questions of the choice of necessary spatial resolution are considered. The analysis of holograms with corners between basic and object bunches of 5, 10, 15 and 20 degrees respectively is carried out.

Key words: holography, optical microscopy, micro-lenses interference, digital holography, Fresnel transform, Fourier transform.

Введение

Целью статьи является разработка системы для расшифровки голограмм, зафиксированных на фотопластинке. В ряде случаев необходим компьютерный анализ голограмм, полученных обычным фотохимическим способом. Поскольку пространственное разрешение таких голограмм достаточно большое, для оцифровки использовался модифицированный микроскоп, а восстановление действительного и мнимого изображений производилось методом цифровой голографии.

Метод записи голограмм

Голография – это метод регистрации, позволяющий зафиксировать как амплитуду, так и фазу произвольного оптического фронта [1]. С появлением голографии появилась возможность проведения интерференционных измерений и диффузно отражающих объектов [2].

Наряду с цифровой голографией аналоговая голография попрежнему занимает важное положение в ряду оптических методов измерений [3–16].

Голограмма – результат интерференции двух пучков. При увеличении угла между объектным и опорным пучком искажения, вызванные влиянием центрального пучка, снижаются, и качество восстановленного изображения увеличивается. Однако при этом размер полос на голограмме становится меньше и требуется обеспечить большее пространственное разрешение.

Для определения расстояния между пиками полос, образующимися в результате интерференции двух плоских пучков, используется следующее выражение

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, монохроматического света, используемого для освещения, α – угол между интерферирующими пучками.

Выражение (1) используется для грубой оценки необходимого пространственного разрешения фотоматериалов, используемых для записи голограмм и разрешения необходимого для оцифровки голограмм. Если использовать источник освещения с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм, то для угла 15 градусов $\Delta x = 2$ мкм. По теореме Котельникова для обеспечения необходимого разрешения необходимо

как минимум две точки на полосу, т.е. необходимое разрешение $\Delta x = 1$ мкм. Однако эти рассуждения верны только для регистрации несущей частоты (при интерференции двух плоских волн). Для регистрации информации об объекте разрешение должно быть на порядок больше. Таким образом, для регистрации голограмм необходима регистрирующая среда с разрешением не менее 2000 лин./мм. Такое разрешение необходимо только для регистрации только несущей частоты. Для регистрации диффузных объектов разрешение должно быть как минимум в три раза больше.

Для получения голограмм использовалась следующая схема записи голограмм [17] (рис. 1).

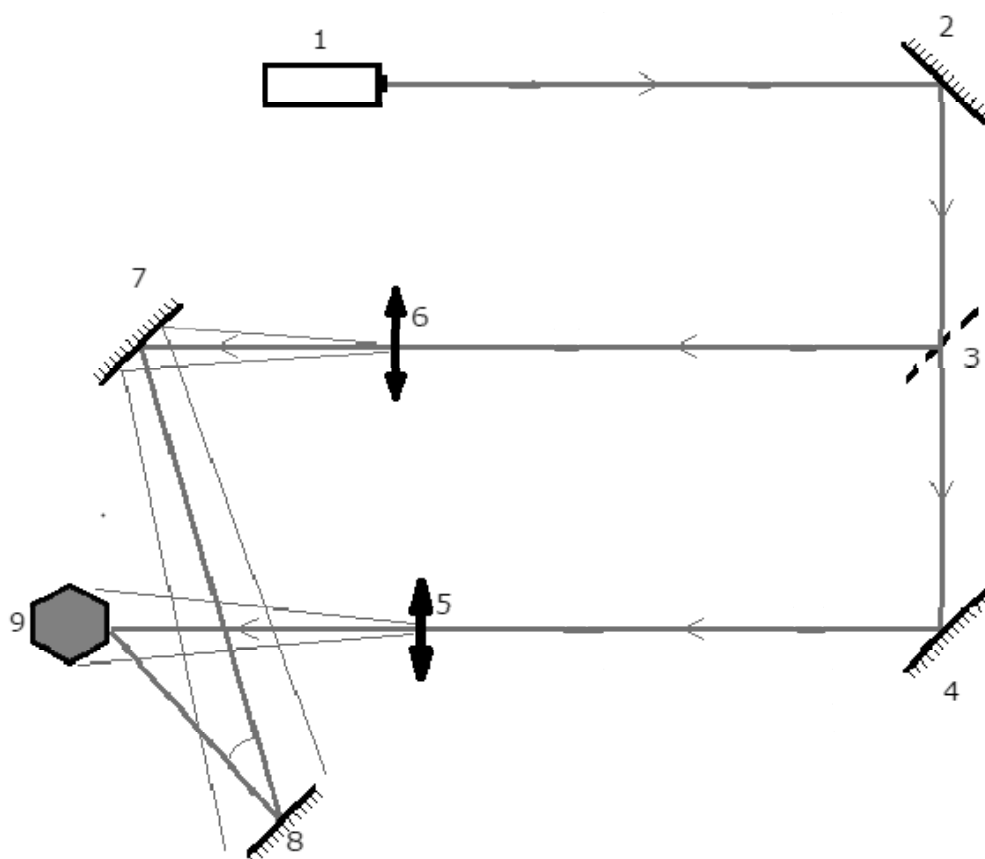


Рис. 1. Схема записи голограммы:

1 — лазер; 2, 4, 7 — отражающие зеркала; 3 — делитель светового пучка; 5, 6 — расширители пучка; 8 — фотопластинка; 9 — объект

Пучок от лазера 1 с помощью полупрозрачного зеркала 3 делится на два пучка, первый из которых после расширителя 5 выступает в качестве опорной волны, а второй, пройдя расширитель 6, формирует волну, освещающую объект 9. Результат интерференции волнового поля, отраженного от объекта, и опорного пучка регистрируется на фотопластинке 8.

Записывались четыре голограммы объекта с углами между опорным и объектным пучком 5, 10, 15 и 20 градусов, соответственно.

Модификация оптического микроскопа для регистрации голограмм

Для оцифровки голограмм использовался модифицированный оптический микроскоп – Ломо Метам Р-1 [18]. Модификация микроскопа состояла в установке фотокамеры в качестве окуляра и установке автоматизированного предметного столика для перемещения объекта. Изображение проецируется на матрицу без использования объектива. Кадр изображения передается непосредственно в компьютер.

Поля зрения одного кадра при использовании восьмикратного (8^X) и десятикратного (10^X) микрообъективов составляли соответственно $2,2 \times 1,5$ мм и $1,76 \times 1,18$ мм. С целью расширения поля зрения предметный столик был заменен на моторизованный двухосный линейный транслятор. Движение по осям осуществляется с помощью двух шаговых двигателей. Величина перемещения на один шаг – 2,5 мкм.

Перемещение столика зависит от механической нестабильности установки, поэтому возможны ошибки при сшивке кадров. Требуемая точность сшивки отдельных кадров обеспечивалась с помощью выделения особых точек программным способом. Использование программной сшивки различных кадров позволило отказаться от использования аппаратных измерительных средств контроля при перемещении предметного столика в случае сбоя шаговых двигателей. При сшивке кадров возможна оцифровка голограмм размером до 100×100 мм. Наблюдение и оцифровка голограмм проводилось в проходящем свете.

Разрешение оптических систем определяется критерием Рэля [19]:

$$R = 0,61 \frac{\lambda}{NA^{obj}},$$

где NA^{obj} – числовая апертура, которая зависит от конструкции микрообъектива. При работе в воздухе теоретически максимальное значение числовой апертуры не может превышать единицы.

Размер числовой апертуры, как известно, определяет пространственное разрешение системы. Например, для объектива 8^X ($NA^{obj} = 0,2$) разрешение составляет $R \approx 3\lambda$, а для объектива 10^X ($NA^{obj} = 0,3$) оно порядка $R \approx 2\lambda$. Если выбрать длину волны $\lambda \approx 0,5$ мкм, то для микрообъективов 8^X и 10^X разрешения будут составлять $\approx 1,5$ и 1 мкм соответственно.

На рис. 2 показан результат сшивки 25 кадров (5 по оси X и 5 по оси Y).

Из рисунка видно, что интерференционные полосы на голограмме проследить не удастся. Это связано с образованием спекл-структур, которые маскируют эти полосы. Поэтому интересно, было посмотреть, как действуют способы расшифровки, при разработке которых явление образования спеклов не учитывалось.



Рис. 2. Слева: оцифрованная голограмма размером 25861×11690 точек. Физический размер оцифрованной голограммы – $10,8 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$. Справа: увеличенный участок той же голограммы

Расшифровка голограмм

Для расшифровки голограмм используется преобразование Френеля или Фурье в зависимости от расстояния между объектом и пластинкой, на которой фиксировалась голограмма [20–23]. На рис. 3 показаны восстановленные изображения из голограмм, полученных при разных углах между интерферирующими пучками. Для оцифровки использовался микрообъектив с увеличением $8^{\times}$.

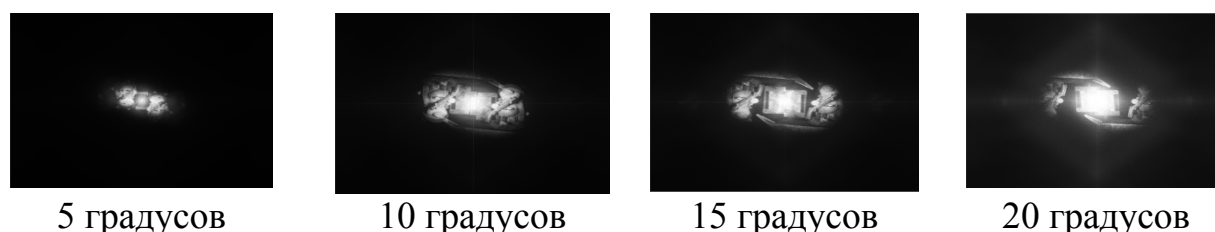


Рис. 3. Восстановленные на компьютере действительное и мнимое изображения объекта при различных углах между опорным и объектным пучками

Видно, что при оцифровке голограмм с углами 15 и 20 градусов, выбранного разрешения уже не хватает. В области высоких пространственных частот из-за недостатка разрешения пропадают детали изображения. Поэтому при больших углах необходимо увеличивать разрешение при оцифровке. Для этого был использован микрообъектив с увеличением $10^{\times}$.

На рис. 4 показаны увеличенные части восстановленного изображения из голограммы, полученной при 15 градусах между опорным и объектным пучками при использовании микрообъективов $8^{\times}$ и $10^{\times}$.

Видно, что правая часть изображения содержит элементы (прорисована левая рука), которые утеряны на изображении на левой части рисунка. Эти элементы соответствуют области высоких пространственных частот.

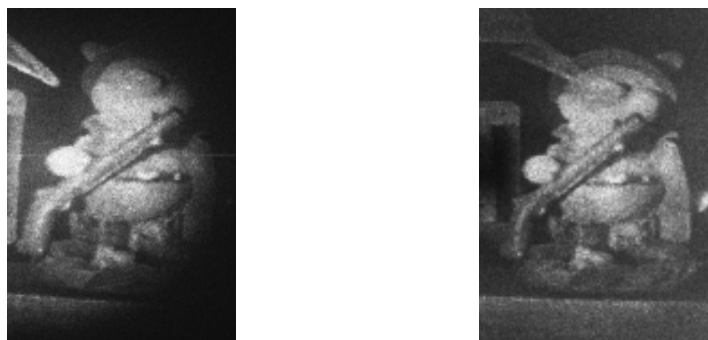


Рис. 4. Увеличенные части действительного изображения, полученные при оцифровке голограмм микрообъективами с восьмикратным и десятикратным увеличением

Заключение

В статье описана система для оцифровки голограмм, зафиксированных на фотопластинках. Приведена схема получения голограмм. Основой системы регистрации является модифицированный оптический микроскоп. Оцифровывались голограммы размером до 100×100 мм и с разрешением менее 1 мкм. Наблюдение и оцифровка голограмм проводилось в проходящем свете. Для восстановления действительного и мнимого изображений используется преобразование Френеля или Фурье. Показана возможность компьютерной расшифровки аналоговых плоских голограмм, полученных на классических оптических установках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка и исследование методов компьютерной голографической интерферометрии объектов сложной формы» (Грант № 18-08-00580).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gabor D. A new microscopic principle // Nature. – 1948. – Vol. 161. – P. 777–778 ; перевод на рус. яз. : Строук Дж. У. Введение когерентную оптику и голографию. – М. : Мир, 1967, С. 262–301.
2. Козачок А. Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике. – М. : Машиностроение, 1984. – 176 с.
3. Bianco V., et al. Clear coherent imaging in turbid microfluidics by multiple holographic acquisitions // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37 (20). – P. 4212–4214.
4. Slaby T., et al. Off-axis setup taking full advantage of incoherent illumination in coherence-controlled holographic microscope // Optics Express. – 2013. – Vol. 21 (12). – P. 14747–14762.
5. Chmelik R., et al. The role of coherence in image formation in holographic microscopy // Progress in Optics. – 2014. – Vol. 59 (1). – P. 267–336.
6. Kolman P., Chmelik R. Coherence-controlled holographic microscope // Optics Express. – 2010. – Vol. 18 (21). – P. 21990–22003.

7. Balvan J., et al. Multimodal holographic microscopy: distinction between apoptosis and oncosis // PLoS One. – 2015. – Vol. 10 (3). – P. 0121674.
8. Recording and Reconstruction of Holograms. URL: https://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/2_6_03.pdf.
9. Fontecchio A. K. Multiplexing Studies of Holographically-formed Polymer Dispersed Liquid Crystals Dissertation, Degree of Doctor, Brown University, Providence, Rhode Island. – May 2003.
10. Wynne Davis. Recording Components and Applied Principles of Holograms. – New York : Research Press, 2015. – 400 p.
11. Nehmetallah G., Banerjee P. P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging // Advances in Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 4 (4). – P. 472–553.
12. Nehmetallah Georges T., Aylo Rola, Williams Logan A. Analog and digital holography with MATLAB. – Bellingham, Washington : SPIE Press, 2015. – 528 p.
13. Nehmetallah G., Banerjee P. P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging // Advances in Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 4 (4). – P. 472–553.
14. Williams L., Nehmetallah G., Banerjee P. P. Digital tomographic compressive holographic reconstruction of three-dimensional objects in transmissive and reflective geometries // Applied Optics. – 2008. – Vol. 52 (8). – P. 1702–1710.
15. Banerjee P. P., Nehmetallah G., Kukhtarev N., Praharaj S. C. Determination of model airplane attitudes using dynamic holographic interferometry // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47 (21). – P. 3877–3885.
16. Holographic Materials and Optical Systems. – Edited by Izabela Naydenova, Dimana Nazarova and Tsvetanka Babeva. – InTech, 2017. – 516 p.
17. Leith E. N., Upatnieks J. Wavefront reconstruction and communications theory // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.
18. Модификация оптических микроскопов / В. И. Гужов, Д. В. Ильтимиров, Д. С. Хайдуков, О. В. Чернов, С. Л. Полубинский // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 2 (16). – С. 71–76.
19. Коронкевич В. П. Формирование изображения в оптических системах : учеб. пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2005. – 76 с.
20. Область возможного применения дискретных преобразований Фурье и Френеля / В. И. Гужов, В. А. Емельянов, Д. С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 1 (15). – С. 97–103.
21. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография. – М. : Наука, 1982. – 219 с.
22. Kim M. K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Reviews. – 2010. – Vol. 1. – P. 018005-1–018005-50.
23. Представление преобразования Френеля в дискретном виде / В. И. Гужов, Р. Б. Несин, В. А. Емельянов // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 1 (15). – С. 91–96.
24. Гужов В. И. Математические методы цифровой голографии : учеб. пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 80 с.

REFERENCES

1. Gabor, D. (1948). A new microscopic principle. *Nature*, 161, 777–778.
2. Kozachok, A. G. (1984). *Golograficheskie metodi issledovaniya v eksperimental'noi mekhanike* [Holographic research methods in experimental mechanics]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Bianco, V., et al. (2012). Clear coherent imaging in turbid microfluidics by multiple holographic acquisitions. *Optics Letters*, 37(20), 4212–4214.
4. Slaby, T., et al. (2013). Off-axis setup taking full advantage of incoherent illumination in coherence-controlled holographic microscope. *Optics Express*, 21(12), 14747–14762.

5. Chmelik, R., et al. (2014). The role of coherence in image formation in holographic microscopy. *Progress in Optics*, 59(1), 267–336.
6. Kolman, P., & Chmelik, R. (2010). Coherence-controlled holographic microscope. *Optics Express*, 18(21), 21990–22003.
7. Balvan, J., et al. (2015). Multimodal holographic microscopy: distinction between apoptosis and oncosis. *PLoS One*, 10(3), 0121674.
8. Recording and reconstruction of holograms. URL: https://www.nikhef.nl/~h73/knlc/praktikum/phywe/LEP/Experim/2_6_03.pdf
9. Fontecchio, A. K. (2003). Multiplexing Studies of Holographically-formed Polymer Dispersed Liquid Crystals Dissertation, Degree of Doctor, Brown University, Providence, Rhode Island.
10. Wynne, Davis. (2015). *Recording Components and Applied Principles of Holograms*. New York: Research Press.
11. Nehmetallah, G., & Banerjee, P. P. (2012). Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging. *Advances in Optics and Photonics*, 4(4), 472–553.
12. Nehmetallah, G. T., Aylo, R., & Williams, L. A. (2015). *Analog and digital holography with MATLAB*, Bellingham. Washington: SPIE Press.
13. Nehmetallah, G., & Banerjee, P. P. (2012). Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging. *Advances in Optics and Photonics*, 4(4), 472–553.
14. Williams, L., Nehmetallah, G., & Banerjee, P. P. (2008). Digital tomographic compressive holographic reconstruction of three-dimensional objects in transmissive and reflective geometries. *Applied Optics*, 52(8), 1702–1710.
15. Banerjee, P. P., Nehmetallah, G., Kukhtarev, N., & Praharaj, S. C. (2008). Determination of model airplane attitudes using dynamic holographic interferometry. *Applied Optics*, 47(21), 3877–3885.
16. *Holographic Materials and Optical Systems*. (2017). InTech. ISBN 978-953-51-3038-3. Print ISBN 978-953-51-3037-6.
17. Leith, E. N., & Upatnieks, J. (1962). Wavefront reconstruction and communications theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52, 1123–1130.
18. Guzhov, V. I., Iltimirov, D. V., Hajdukov, D. S., Chernov, O. V., & Polubinskiy, S. L. (2016). Modification of Optical Microscopes. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 2(16), 71–76 [in Russian].
19. Koronkevich, V. P. (2005). *Formirovanie izobrajeniya v opticheskikh sistemah* [Image formation in optical systems]. Novosibirsk: NSTU [in Russian].
20. Guzhov, V. I., Emelyanov, V. A., & Hajdukov, D. S. The Area of Possible Application of Discrete Fourier transform. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 1(15), 97–103 [in Russian].
21. Yaroslavsky, L. P., & Merzlyakov, N. S. (1982). *Tsifrovaya golografiya* [Digital holography]. Moscow: Science [in Russian].
22. Kim, M. K. (2010). Principles and techniques of digital holographic microscopy. *SPIE Reviews*, 1, 018005-1–018005-50.
23. Guzhov, V. I., Nesin, R. B., & Emelyanov, V. A. (2016). Presentation of Fresnel Transform in the Discrete Form. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Engineering], 1(15), 91–96 [In Russian].
24. Guzhov, V. I. (2017). *Matematicheskie metodi tsifrovoi golografii* [Mathematical methods of digital holography]. Novosibirsk: NSTU [in Russian].

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Г. А. Поздняков, 2018

**ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
ГРАДИЕНТНО-АКТИВИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ
НИОБАТА ЛИТИЯ С РАЗВИТОЙ ИЗОМОРФНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Максим Борисович Куксенко

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, студент, e-mail: kuksenkom@mail.ru

Кирилл Викторович Судариков

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, аспирант, e-mail: ksudarikov91m@gmail.com

Елена Валерьевна Строганова

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптоэлектроники, тел. (928)423-12-35, e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

В работе проведены спектральные исследования градиентно-активированных кристаллов ниобата лития околостехиометрического состава $R=0.97$, неоднородно легированных ионами Mg^{2+} и Cr^{3+} в терагерцовой области спектра.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, градиентно-активированный кристалл, ниобат лития, примесные центры, коэффициент поглощения, показатель преломления.

**THz SPECTROSCOPY
OF NON-UNIFORMLY DOPED CRYSTALS OF $LiNbO_3$
WITH HIGHLY-ISOMORPHIC STRUCTURE**

Maxim B. Kuksenko

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Student, e-mail: kuksenkom@mail.ru

Kirill V. Sudarikov

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Ph. D. Student, e-mail: ksudarikov91m@gmail.com

Elena V. Stroganova

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (928)423-12-35, e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Spectroscopic properties of near-stoichiometric ($R=0.97$) non-uniformly doped crystal of $LiNbO_3:Mg^{2+},Cr^{3+}$ in THz spectral range were studied.

Key words: THz spectroscopy, non-uniformly doped crystal, lithium niobate, dopant centers, absorption index, refraction index.

Ниобат лития относится к важнейшим оптическим материалам, который сочетает в себе уникальным образом электрооптические, пироэлектрические,

пьезоэлектрические и нелинейные характеристики, что определяет высокий потенциал его использования в акусто- и оптоэлектронике, оптике, лазерной технике, системах связи и автоматике [1, 2].

Эффективность оптических компонентов, выполненных из ниобата лития, напрямую зависит от свойств и оптического качества монокристалла. Для получения высококачественных монокристаллов LiNbO_3 необходима не только строгая стандартизация в подготовке шихты и соблюдение технологических регламентов выращивания монокристаллов, но и необходимо разрабатывать эффективные методы контроля оптического качества полученных материалов [3].

Монокристаллы ниобата лития характеризуются развитой изоморфной структурой, которая допускает внедрение самых разнообразных ионов. Для высокосоввершенных кристаллов особую роль в формировании оптических характеристик играют дефекты, связанные с особенностями упорядочения катионной подрешетки, обусловленными изменениями отношения $R=\text{Li}/\text{Nb}$, а также присутствием некоторого количества примеси. Примеси в LiNbO_3 способны внедряться в вакантные октаэдрические пустоты, замещать ионы Li^+ и Nb^{5+} , вызывая локальные изменения порядка в расположении катионов вдоль полярной оси. При концентрациях примесей порядка десятых и сотых долей процента могут значительно меняться диэлектрические и оптические свойства кристалла, например, его фоторефракция [4-6].

Присутствие дефектов в монокристалле LiNbO_3 влияет на такие его параметры, как температура Кюри, угол критического фазового синхронизма и температура фазового согласования генерации второй гармоники (ГВГ) лазерного излучения, ширина линий КР, ЯМР, положение фундаментального края оптического поглощения кристалла, фоторефрактивные свойства. С использованием указанных зависимостей разработан ряд методик контроля однородности монокристалла LiNbO_3 [7-12] и отклонения состава R от стехиометрии.

В качестве объектов исследований в данной работе рассматривается ниобат лития околостехиометрического состава ($R=0.97$) с неравномерным распределением примесных центров [13] нефоторефрактивной примеси Mg^{2+} . Как было обнаружено ранее [13–14] в градиентно-активированных кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Cr}$ с неравномерным распределением примесных центров Mg^{2+} вдоль оси роста кристалла (концентрационный профиль ионов Mg^{2+} изменяется от 3 до 1 ат. %) наблюдается зависимость оптических свойств, а именно, трансформация спектров поглощения ионов Cr^{3+} в диапазоне 400 – 900 нм относительно продольной координаты кристалла. Предложенный метод исследования в [14] позволил на основании оптической спектроскопии изучить дефектную структуру градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Cr}$, а также ее динамику от концентрационного профиля нефоторефрактивной примеси Mg^{2+} . Важность понимания процессов формирования дефектов в ниобате лития обусловлена необходимостью создания высокоэффективных PPLN с повышенной лучевой стойкостью к опорному излучению [15–16].

В данной работе предложен оптический метод исследования кристаллов ниобата лития, который позволяет расширить инструментарий изучения дефектной структуры оптических материалов. В современной оптической спектроскопии терагерцовый (THz) диапазон электромагнитного поля занимает особое значение, которое обусловлено наличием в этой спектральной области откликов исследуемых объектов. Спектральный анализ в THz области позволяет получить информацию о строении и составе молекулярной системы. Известно, что в области 1 ТГц кристаллы ниобата лития имеют значительное поглощение порядка $16\text{--}170\text{ см}^{-1}$ [16]. Величина коэффициента поглощения зависит от состава кристаллической матрицы ниобата лития, а также от температуры.

В представленной работе проведены исследования коэффициентов поглощения и показателей преломления градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg,Cr}$, в спектральной области от 0,5 до 3,5 THz. Исследования проводились при помощи терагерцового спектрометра Tera K15. Спектры поглощения и показателя преломления были получены путем сканирования плоскопараллельных кристаллических пластинок исследуемых образцов, вдоль продольной координаты с шагом 1-2 мм. Направление изменения продольной координаты кристаллического образца совпадает с осью роста монокристалла. На рис. 1 приведены результаты исследований спектров поглощения градиентно-активированных кристаллах ниобата лития в области 1 THz, полученные в произвольных координатах исследуемых образцов. На рис. 1 (а, в) показаны зависимости концентрационных профилей примесных центров исследуемых кристаллов от продольной координаты. Как видно из полученных результатов (рис. 1 (б, г)), коэффициенты поглощения имеют зависимость от концентрационного профиля исследуемых образцов.

Широко используемым косвенным методом оценки состава кристаллов ниобата лития по R является изучение спектров поглощения ОН-групп в ИК-области [12]. На рис. 2 представлен результат исследования спектров поглощения градиентно-активированного кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg,Cr}$ в произвольных координатах кристаллической пластинки. Как видно, однозначной оценки по постоянству состава исследуемого образца сделать нельзя.

На рис. 3 представлены результаты исследований зависимостей показателей преломления градиентно-активированных кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg, Cr}$ от продольной координаты исследуемых образцов. Маркерами отмечены значения показателей преломления в THz диапазоне. Как видно из результатов исследований, изменение значений показателя преломления коррелирует с концентрационными профилями нефоторефрактивной примеси Mg^{2+} в исследуемых кристаллах.

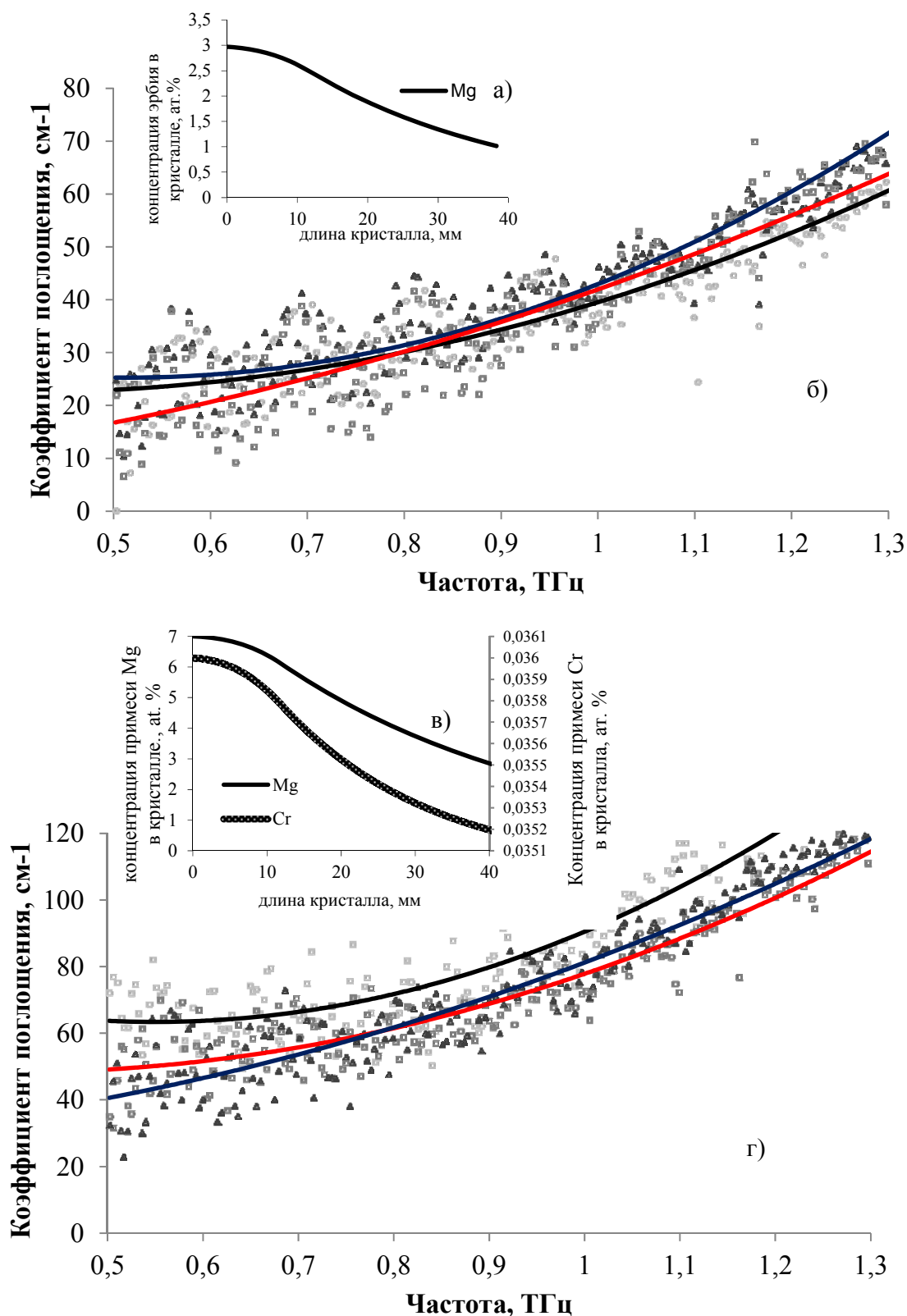


Рис. 1. Спектры поглощения градиентно-активированных кристаллов ниобата лития в произвольных координатах кристаллов:

а) концентрационный профиль Mg, б) спектры поглощения кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg,Cr}$ (концентрация ионов Cr = 0,005 ат. %); в) концентрационные профили ионов Mg^{2+} и Cr^{3+} ; г) спектры поглощения кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg,Cr}$ (с двойным концентрационным профилем)

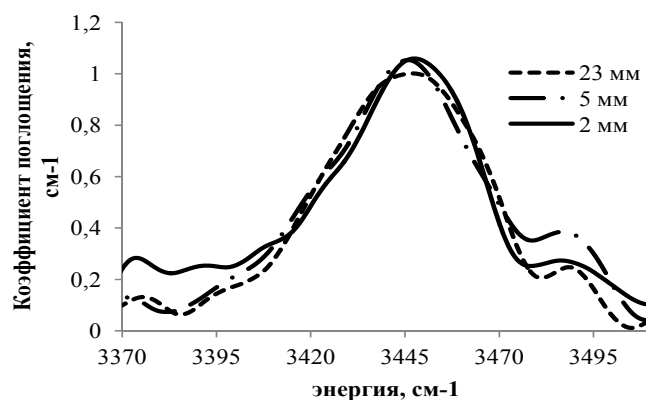


Рис. 2. Спектры поглощения ОН-групп градиентно-активированных кристаллов в ИК спектральном диапазоне, измеренные в произвольных координатах кристаллической пластинки

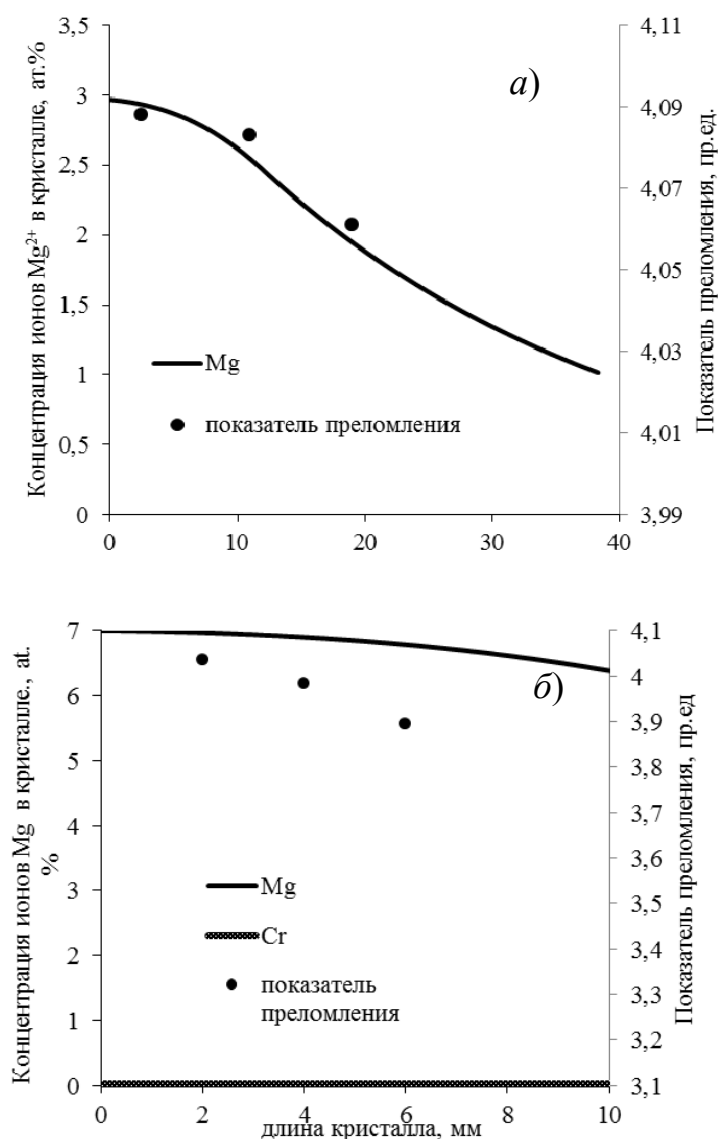


Рис. 3. Корреляция показателя преломления с концентрационными профилями примесных центров в градиентно-активированных кристаллах:
 а) $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Cr}$ (концентрационный профиль ионов Mg^{2+} изменяющийся от 3 до 1 ат.%;
 б) $\text{LiNbO}_3:\text{Mg},\text{Cr}$ (концентрационный профиль ионов Mg^{2+} изменяющийся от 7 до 3 ат.%)

Сопоставляя результаты, полученные разными методами по оценке состава кристаллов, можно сделать заключение о том, что спектроскопия в терагерцовом диапазоне потенциально является информативным методом изучения кристаллов и может быть использована в целях расширения инструментария оценки состава и качества кристаллов ниобата лития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Surface Acoustic Wave (SAW) Devices : Technologies and Global Markets // URL : <http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensor/surface-acoustic-wave-sensors-technology-markets-ias039a.html>.
2. Low-temperature anodic bonding using thin films of lithium-niobate-phosphateglass / S. Woetzel, E. Kessler, M. Diegel, V. Schultze // J. Micromech. Microeng. – 2014. – Vol. 24. – P. 6.
3. Growth of Large Size Lithium Niobate Single Crystals of High Quality by Tilting-mirror-type Floating Zone Method / Abdur Razzaque Sarkera // Materials research. – 2016. – V. 19(3). – P. 505-512.
4. Shandarov S.M., Mandel A.E., Smirnov S.V., Akylbaev T.M., Borodin M.V., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Y. Collinear and iso-tropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate // Ferroelectrics. – 2016. – V. 496. – № 1. – P. 134-142.
5. Mambetova K.M., Smal N.N., Shandarov S.M., Orlikov L.N., Arestov S.I., Smirnov S.V. Formation dynamics of transmission holograms in lithium niobate crystals doped by copper through high-temperature diffusion // Radiophysics and quantum electronics. – 2015. – V. 57. – Issue 8 – 9. – P. 603-609.
6. Volk T.R., Gainutdinov R.V., Bodnarchuk Y.V., Kokhanchik L.S., Shandarov S.M., Borodin M.V., Lavrov S.D., Liu H., Chen F. Microdomain patterns recorded by an electron beam in HE-implemented optical waveguides on X-cut LiNbO₃ crystals // Journal of light wave technology. – 2015. – V. 33. – № 23. – P. 4761-4766.
7. Сидоров Н.В., Телятникова Н.А., Палатников М.Н., Бобрева Л.А. Исследование структурных перестроек водородных связей в кристаллах LiNbO₃: Mg вблизи пороговой концентрации магния // Журнал прикладной спектроскопии. – 2017. – Т. 84, № 4. – С. 521-526.
8. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Яничев А.А., Титов Р.А., Теплякова Н.А. Структурный беспорядок кристаллов LiNbO₃:В и его проявление в спектре комбинационного рассеяния света // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 707-714.
9. Сидоров Н.В., Бобрева Л.А., Палатников М.Н. Концентрационные зависимости спектров ИК поглощения в области валентных колебаний ОН-групп конгруэнтных кристаллов ниобата лития, легированных цинком и магнием // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 123, № 2 (8). – С. 246-252.
10. Подэрни К.Е., Пантелей Е. Спектральное исследование однородности химического состава кристаллов ниобата лития // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2017. – С. 228-230.
11. Сидоров Н.В., Яничев А.А., Палатников М.Н., Габаин А.А., Пикуль О.Ю. Оптическая однородность, дефекты и фоторефрактивные свойства стехиометрического, конгруэнтного и легированных цинком кристаллов ниобата лития // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117, № 1. – С. 76.
12. R. Bhatt, I. Bhaumik, S. Ganesamoorthy, R. Bright, M. Soharab, A. K. Karnal, P. K. Gupta. Control of intrinsic defects in lithium niobate single crystal for optoelectronic applications // Crystals. – 2017. – Vol. 7, № 23. – С.1-20.

13. V.V. Galutskiy, M.I. Vatlina, E.V. Stroganova. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging // *Journal of crystal growth*. – 2009. – Vol. 311, I. 4. – С. 1190-1194.
14. Строганова Е.В., Галуцкий В.В., Судариков К.В., Рассейкин Д.А., Яковенко Н.А. Определение центрального состава градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с примесью магния, хрома // *Автометрия*. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 73-80.
15. Galutskiy V. V., Stroganova E.V., Shmargilov S.A., Yakovenko N.A. Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, № 1. – С. 30-33.
16. [http://www.researchgate.net/publication/226906820_Far_Infrared_Properties_of_Electro-Optic_CrystalsMeasured by THz Time-Domain Spectroscopy/file/79e4150d83b702c7b6.pdf](http://www.researchgate.net/publication/226906820_Far_Infrared_Properties_of_Electro-Optic_CrystalsMeasured_by_THz_Time-Domain_Spectroscopy/file/79e4150d83b702c7b6.pdf)

REFERENCE

1. Surface Acoustic Wave (SAW) Devices : Technologies and Global Markets // URL : <http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensor/surface-acoustic-wave-sensors-technology-markets-ias039a.html>.
2. S. Woetzel, E. Kessler, M. Diegel, V. Schultze. (2014). Low-temperature anodic bonding using thin films of lithium-niobate-phosphateglass. [*J. Micromech. Microeng.*], 24, 6. doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/9/095001>
3. AbdurRazzaqueSarkera. (2016) Growth of Large Size Lithium Niobate Single Crystals of High Quality by Tilting-mirror-type Floating Zone Method.[*Materials Research*], 19(3), 505-512.doi: 10.3390/ma5020227.
4. Shandarov S.M., Mandel A.E., Smirnov S.V., Akylbaev T.M., Borodin M.V., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Y. (2016). Collinear and iso-tropic diffraction of laser beam and incoherent light on periodically poled domain structures in lithium niobate. [*Ferroelectrics*], 496(1), 134-142.doi: <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1157439>
5. Mambetova K.M., Smal N.N., Shandarov S.M., Orlikov L.N., Arestov S.I., Smirnov S.V. (2015). Formation dynamics of transmission holograms in lithium niobate crystals doped by copper through high-temperature diffusion.[*Radiophysics and Quantum Electronics*],57(8 – 9), 603-609.<https://doi.org/10.1007/s11141-015-9545-x>.
6. Volk T.R., Gainutdinov R.V., Bodnarchuk Y.V., Kokhanchik L.S., Shandarov S.M., Borodin M.V., Lavrov S.D., Liu H., Chen F. (2015). Microdomain patterns recorded by an electron beam in HE-implanted optical waveguides on X-cut LiNbO₃ crystals [*Journal of Lightwave Technology*],33(23), 4761-4766.<https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-33-23-4761>
7. Sidorov N. Oh. Telyatnikova N. Ah. Palatnikov M. N., Bobrova L. (2017). A. investigation of structural rearrangements of hydrogen bonds in LiNbO₃:Mg crystals near the threshold concentration of magnesium [*Journal of applied spectroscopy*], 84(4), 521-526.[in Russian].
8. Sidorov N. Oh. Palatnikov M. N., Yanichev A. A., Titov R. A., Teplyakova N. Ah. (2016). The string disorder Of LiNbO₃:b crystals and its manifestation in the Raman spectrum of Raman scattering [*Journal of applied spectroscopy*],83(5), 707-714. [in Russian].
9. Sidorov N. In. Bobrova L. A., Palatnikov M. N. (2017). Concentration dependence of IR-spectra of absorption in the region of stretching vibrations of Oh-groups of the congruent crystal of lithium niobate crystals doped with zinc and magnesium [*Optics and spectroscopy*], 123(2), 246-252. doi: 10.7868/S0030403417080244. [in Russian].
10. Paderni, K. E., Panteley, E. (2017). Spectral investigation of the homogeneity of the chemical composition of lithium niobate crystals [*Actual problems of Radioelectronics and telecommunications*], 228-230.
11. Sidorov N. Oh. Yanichev A. A., Palatnikov M. N., Gabain A. A., Pikul O. Yu. (2014). Optical homogeneity, defects and photorefractive properties of stoichiometric, congruent and zinc doped lithium niobate crystals [*Optics and spectroscopy*], 117(1), 76.doi: 10.7868/S003040341407023X. [in Russian].

12. R. Bhatt, I. Bhaumik, S. Ganesamoorthy, R. Bright, M. Soharab, A. K. Karnal, P. K. Gupta. (2017). Control of Intrinsic Defects in Lithium Niobate Single Crystal for Optoelectronic Applications [Crystals], 7(23), 1-20. doi:10.3390/cryst7020023.
13. V.V. Galutskiy, M.I. Vatlina, E.V. Stroganova. (2009). Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging [Jornal of Crystal Growth], 311(4), 1190-1194, doi:10.1016/j.jcrysgro.2008.11.059.
14. Stroganova E.V., Galutskiy V.V., Sudarikov K.V., Rasseikin D.A., Yakovenko N.A. (2016). The definition of the center of the composition-gradient-activated lithium niobate crystals doped with magnesium, chromium [Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing], 52(2), 73-80. doi: 10.15372/AUT20160209.
15. Galutskiy V. V., Stroganova E.V., Shmargilov S.A., Yakovenko N.A. (2014). Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals [Quantum Electronics], 44(1), 30–33. doi: 10.1070/QE2014v044n01ABEH015289.
16. http://www.researchgate.net/publication/226906820_Far_Infrared_Properties_of_Electro-Optic_Crystals_Measured_by_THz_Time-Domain_Spectroscopy/file/79e4150d83b702c7b6.pdf

© М. Б. Куксенко, К. В. Судариков, Е. В. Строганова, 2018

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Евгений Витальевич Дружкин

ООО «ЛУГГАР», 630120, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 200, генеральный директор, тел. (383)249-63-39, e-mail: 2496339@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье рассматривается проблема сравнительной оценки малогабаритных тепловизионных приборов для стрелкового вооружения. Предлагается комплексный показатель, учитывающий основные характеристики, зависящие от назначения приборов, позволяющий осуществлять ранжирование в анализируемой выборке малогабаритных тепловизионных приборов. Критерий рассматривается на примере разработанных авторами приборов. Обсуждается целесообразность предлагаемого критерия. Тема тезисов представляется актуальной как с практической, так и с теоретической точек зрения. Дальнейшие исследования по данному направлению представляют интерес.

Ключевые слова: тепловизионные приборы, сравнительная оценка приборов, анализ характеристик.

THE COMPARATIVE EVALUATION OF COMPACT INFRARED DEVICES

Evgeniy V. Druzhkin

LUGGAR Co Ltd, 200, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630120, Russia, Director General, phone: (383)249-63-39, e-mail: 2496339@mail.ru

Tatiana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

This article considers a problem of comparative evaluation of compact infrared devices for military equipment. The complex evaluation coefficient for such devices, which considers their main characteristics in relation to the purpose of devices, is proposed. This coefficient is viewed on the examples of devices developed by the authors. The practicability and significance of proposed coefficient is discussed. The topic of the article is relevant from both practical and theoretical points of view. The further study on this direction can have an interest.

Key words: infrared devices, comparative evaluation of devices, analysis of characteristics.

Введение, актуальность, цель статьи

В настоящее время совершенствование оптико-электронных приборов и решение проблемы импортозамещения в области производства этих приборов имеет существенное значение для развития нашей страны. В связи с этим, акту-

альной является разработка, совершенствование и исследование малогабаритных (ручных) тепловизионных приборов и тепловизионных прицелов для стрелкового вооружения.

На сегодняшний день, в России выпускается и разрабатывается большое количество малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания [1].

При наличии большого числа предложений важным является выбор метода сравнительной оценки приборов, зависящий от назначения приборов, поскольку использование одного или несколько показателей прибора не отражают, с одной стороны, сложности разработки прибора, с другой, – создает трудности потребителю при сравнении приборов разных производителей.

Цель работы – сформулировать и предложить «комплексный» показатель для сравнительной оценки малогабаритных тепловизионных приборов, выражаемый количественно, критически рассмотреть сильные стороны и недостатки такого показателя.

Рассматривается целесообразность ввода такого показателя: приборы сейчас сравнивают по целому ряду критериев (дальность, масса, угловое поле, увеличение и др.). Соответственно, имеет ли смысл объединение этих показателей и характеристик в некоторый комплексный показатель? Ответ на этот вопрос является главной целью этих тезисов и предметом для дискуссии по ним.

Выбор показателя для сравнительной оценки малогабаритных тепловизионных приборов

Совокупность критериев, используемых для характеристики тепловизионных приборов, насчитывает несколько десятков показателей, объединяемых в группы: критерии качества изображения, тактико-технические характеристики, показатели эффективности достижения цели, технико-экономические показатели [2]. Большинство работ направлено на измерение и анализ отдельных характеристик и показателей [3, 4]

Предложения создать некий единый (одночисловой) критерий для всего многообразия тепловизионных приборов и систем предлагались неоднократно [5]. Сегодня большинство исследователей считает, что такого единого критерия не существует [2, 6]. Авторы статьи придерживаются такого же мнения.

Как известно, даже при оценке показателей, характеризующих качество изображения разработанной оптической системы тепловизионного прибора, отсутствует единый критерий. Вместе с тем, по мнению [7, с. 183], «проблема возникает не из-за одночисловых характеристик, а из-за их распространения на такие области, где они становятся непригодными. В действительности же подобные характеристики совершенно необходимы, если их применять правильно».

Вместе с тем, в сфере разработки и потребления тепловизионных приборов существует проблема сравнения выборки из нескольких разрабатываемых (или предлагаемых потребителю) тепловизионных приборов одного класса. В данной статье речь идет о классе малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицеливания [1].

На основании опыта проектирования и испытания предлагается гипотеза, что для конкретного класса тепловизионных приборов можно предложить феноменологический комплексный критерий, отражающий как сложность проектирования прибора, так и удобство эксплуатации. Бесспорно, он будет эвристическим. Для его подтверждения или отрицания требуется большая статистика.

В [1] проведено сравнение приборов по коэффициенту «конструктивный объем / дальность обнаружения»: предполагалось, что чем этот коэффициент меньше, тем более совершенно (оптимально) реализовано в приборе сопряжение параметров и характеристик оптики, приемника излучения, модулей электронной обработки изображения, микродисплея и окуляра.

В данной статье предлагается использовать показатель K_1 , учитывающий дальность обнаружения и конструктивный объем прибора в следующем виде:

$$K_1 = \frac{L}{V} / K_{1\max}, \quad (1)$$

где L – дальность обнаружения объекта, м; V – конструктивный объем прибора, см³; $K_{1\max}$ – наибольшее значение коэффициента K_1 для анализируемой выборки приборов.

При необходимости учета при сравнении не только L и V , но и поля зрения в пространстве предметов, увеличения прибора Γ , удаления выходного зрачка $s'_{p'}$, массы m прибора, углового разрешения φ в пространстве предметов, выражение для коэффициента K_2 усложняется:

$$K_2 = K_1 \frac{\Gamma \cdot \omega_z \cdot s'_{p'}}{m \cdot \varphi} / K_{2\max}, \quad (2)$$

где $2\omega_z$ – угловое поле по горизонту (соответствующее большей стороне чувствительной площадки матричного болометрического приемника); $K_{2\max}$ – наибольшее значение коэффициента K_2 для анализируемой выборки приборов.

При этом

$$\varphi = \frac{\delta}{f'_{об}},$$

где δ – шаг пикселей матричного болометрического приемника излучений; $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива тепловизионного прибора.

При необходимости учета при сравнении не только параметров, входящих в (3), но и длины l прибора (вдоль оптической оси объектива), выражение для коэффициента K усложнится:

$$K = \frac{K_2}{l} / K_{\max}, \text{ или } K = \frac{L \cdot \Gamma \cdot \omega_z \cdot s'_{p'}}{V \cdot m \cdot l \cdot \varphi} / K_{\max}, \quad (3)$$

где $K_{\max}$ – наибольшее значение коэффициента K для анализируемой выборки приборов.

Выражения для коэффициентов (1) – (3) построены так, что в числителе указываются показатели (характеристики), увеличение которых рассматривается как достоинство, в знаменателе – показатели, увеличение которых оценивается как недостаток прибора в сравнении с другими приборами рассматриваемой выборки.

Показатели трудоемкости изготовления и стоимости не включены в (1)–(3).

Формулы (1) – (3) включают в себя основные показатели, принимаемые во внимание при сравнительной оценке малогабаритных приборов: дальность обнаружения, угловое поле зрения, увеличение, предел разрешения (дискретность изменения направления визирной оси), удаление выходного зрачка от последней поверхности окуляра, массу прибора, конструктивный объем и длину прибора.

Чем больше значение коэффициента, по которому осуществляется сравнение приборов, тем выше по рангу находится прибор в выборке.

Далее представлены результаты сравнительного анализа группы тепловизионных приборов с использованием коэффициентов (1) – (3).

Результаты сравнительного анализа группы малогабаритных приборов с использованием предлагаемых коэффициентов

Рассматривается группа малогабаритных тепловизионных наблюдательных приборов и прицелов для стрелкового вооружения, разработанная при участии авторов за период, начиная с 2010 г. по настоящее время [1]. В табл. 1 приведена информация по двум типам малогабаритных тепловизионным приборам: двум тепловизионным монокулярам (ПТ2 и ПТ2(М)) и семи прицелам (ПТЗ, ПТЗ-02, ПТ4-01, ПТ5, ПТ7, ПТ8, ПТ9), а на рис. 1 – лепестковая диаграмма, показывающая изменения коэффициентов K_1 , K_2 , K для анализируемой выборки малогабаритных тепловизионных приборов. Кроме характеристик, входящих в формулы (1) – (3), в табл. 1 приведены значения фокусного расстояния и относительного отверстия объективов, количество элементов на приемнике и угловые поля по вертикали. Для всех приборов масса приведена без кронштейна и аккумуляторов, длина – без наглазника.

Для двух монокуляров все характеристики прибора ПТ2(М), кроме удаления выходного зрачка, в сравнении с ПТ2 имеют лучшие (или равные) значения, и сравнение этих двух приборов дает очевидный результат в пользу ПТ2(М), без проведения каких-либо дополнительных оценок и расчетов. Сравнение по любому из коэффициентов K_1 , K_2 , K дает аналогичный результат, что можно рассматривать как проверку адекватности этих коэффициентов.

Результат сравнительной оценки в группе семи малогабаритных тепловизионных прицелов показал следующее:

– выделяется группа из трех приборов ПТ7, ПТ8, ПТ5, для которых коэффициенты K_1 , K_2 , K имеют наибольшие значения;

- выделяется группа из трех приборов ПТЗ, ПТЗ-02 и ПТ4-01, для которой коэффициенты K_1 и K имеют наименьшие значения;
- для прибора ПТ9 коэффициенты K_1 и K выше, чем K_2 ; но по критерию K_2 на четверной позиции находится ПТЗ-02.
- прибор ПТ5 – ни по одной из характеристик, приведенных в табл. 1, не имеет лучший результат, но по коэффициентам K_1 , K_2 , K входит в тройку первых;
- прибор ПТ9 по трем характеристикам, приведенным в табл. 1, имеет лучший результат, но по критерия K_1 , K_2 , K находится на 4-5 месте;
- прибор ПТ8 всего по одной характеристике из приведенных в табл. 1 (по удалению зрачка) имеет лучший результат, а по коэффициенту K_2 находится на третьем месте, по K_1 и K – на втором;
- для анализируемой выборки значения коэффициента K находятся в большем диапазоне, чем K_1 и K_2 .

Таблица 1

Характеристики малогабаритных тепловизионных приборов

Характеристика	Монокуляры		Прицелы						
	ПТ2	ПТ2(М)	ПТЗ	ПТЗ-02	ПТ4-01	ПТ5	ПТ7	ПТ8	ПТ9
Фокусное расстояние объектива, мм	24	20	80	50,8	33,2	50,8	68	50,7	34
Разрешение матрицы (вертикально), элементы	384	640	384	640	384	640	640	640	640
Разрешение матрицы (горизонтально), элементы	288	480	288	480	288	480	480	480	480
Шаг приемника, мкм	25	17	25	17	25	17	17	17	17
Относительное отверстие объектива	1 : 1,2	1 : 0,85	1 : 1,33	1 : 1	1 : 1	1 : 1	1 : 1	1 : 1	1 : 1
Удаление выходного зрачка, мм	18	15	50	50	35	45	50	50	35
Масса изделия, г	372	317	950	820	550	730	800	700	627
Длина изделия, мм	120	90	232	257	198	163	159	142	127
Конструктивный объем, см ³	137,4	123,8	413,9	422,2	191,1	271	263,2	251,7	221,1
Дальность обнаружения, м	550	750	1200	1500	800	1500	1800	1500	1000
Поле зрения по горизонту, градус	26,9	29,8	6,8	12,1	16,4	12,1	9,1	12,1	18
Поле зрения по вертикали, градус	20,4	22,8	5,1	9,1	12,3	9,1	6,8	9,1	13,6
Угловое разрешение, минуты	3,5	2,9	1,1	1,2	2,6	1,2	0,9	1,2	1,7
Увеличение, крат	1,18	1,17	3,93	2,2	1,66	2,80	2,77	2,08	1,56
K_1	0,59	0,89	0,42	0,52	0,61	0,81	1,00	0,87	0,66
K_2	0,14	0,27	0,30	0,40	0,22	0,80	1,00	0,74	0,33
K	0,18	0,48	0,21	0,25	0,18	0,78	1,00	0,83	0,41

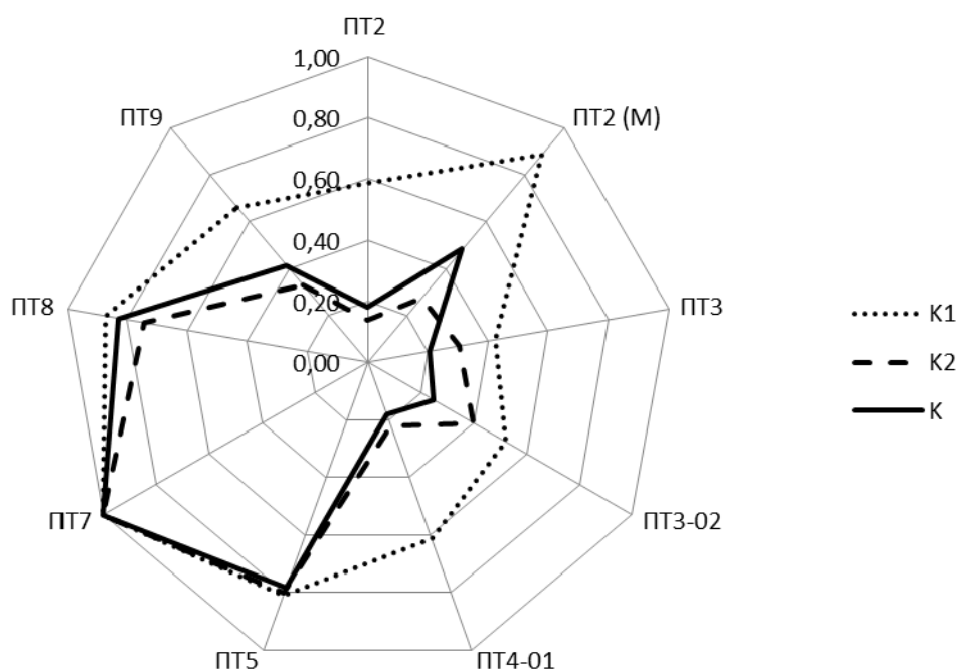


Диаграмма изменения коэффициентов K_1 , K_2 , K для анализируемой выборки малогабаритных тепловизионных приборов

Заключение

Несмотря на то, что выражения для коэффициентов K_1 , K_2 , K предложены феноменологически, они могут быть использованы для анализа выборки из нескольких малогабаритных приборов сходного применения. Пример применения коэффициентов для сравнительного анализа группы малогабаритных тепловизионных прицелов для стрелкового оружия демонстрирует возможность их применения.

По мнению авторов, предлагаемые коэффициенты K_1 , K_2 , K и им подобные могут быть полезны при проведении сравнительного анализа выборки из нескольких малогабаритных тепловизионных приборов, при этом коэффициент K имеет больший диапазон изменения, облегчающий ранжирование приборов в выборке. Коэффициенты позволяют в анализируемой выборке выявить приборы, при создании которых достигнуты лучшие инженерные решения по оптимизации параметров и характеристик отдельных элементов и модулей прибора с целью достижения высоких потребительских характеристик.

Проведение сравнительного анализа на основе предлагаемых коэффициентов K_1 , K_2 , K может быть полезным для разработчиков на этапе концептуального проектирования с целью выявления преимуществ проектируемого прибора в сравнении с имеющимися приборами данной группы.

Проведение сравнительного анализа на основе предлагаемых коэффициентов K_1 , K_2 , K может быть полезным для потребителей с целью выявления конкретных приборов из группы имеющихся приборов одинакового назначения.

Дальнейшие исследования планируется направить на расширение выборки для выявления целесообразности применения предложенных показателей и совершенствования последних.

Во время доклада будут представлены демонстрационные образцы приборов, обладающих высокими значениями предложенных показателей K_1 , K_2 , K .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // Приборы. – 2018. – № 1. – С. 43–50.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». – М. : Логос, 2004. – 444 с.
3. Бугаенко А. Г. Методы и средства контроля характеристик тепловизионных приборов и систем: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: спец. 05.11.07 / Бугаенко Адольф Георгиевич; (Новосиб. гос. техн. ун-т). – Новосибирск : 2005. – 34 с. : ил.; 21 см.
4. Гибин И. С., Колесников Г. В. Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов (обзор) // Успехи прикладной физики. – 2014. – № 3 (2). – С. 293–302.
5. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. – Казань : Казан. Ун-т, 2000. – 252 с.
6. Иванов В. П., Курт В. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань : ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. – 594 с.
7. Проектирование оптических систем: пер. с англ./ под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – М. : Мир, 1983. – 432 с.

REFERENCES

1. Druzhkin, E. V., & Khatsevich, T. N. (2018). Realization of Technical and Special Requirements at the Development of Compact Infrared Devices. Pribory [“Instruments” Journal], 1, 43–50 [in Russian].
2. Tarasov, V. V., & Yakushenkov, Yu. G. (2004). Infekrasnie sistemi “smotryashchego tipa” [Infrared Systems of «Forward Looking Type»]. Moscow: Logos [in Russian].
3. Bugaenko, A. G. (2005). Metodi i sredstva kontrolya harakterisitk teplovizionnih priborov i sistem: avtoref. dis. na coisk. uchen. step. d.t.n.: spec. 05.11.07 [Methods and Tools for Control of Characteristics of Infrared Devices and Systems: Abstract of the Dis. for the Degree Doctor of Sciences: 05.11.07]. Novosibirsk: NSTU [in Russian].
4. Gibin, I. S., & Kolesnikov, G. V. (2014). Modern Devices for Measuring Parameters and Complex Testing of Infrared FPUs and Devices (review). Uspekhi Prikladnoi Fiziki [Advances in Applied Physics], 3(2), 293–302 [in Russian].
5. Aleev, R. M., Ivanov, V. P., & Ovsyannikov, V. A. (2000). Osnovi teorii analiza i sinteza vozdushnoi teplovizionnoi apparatury [Fundamentals of the Theory of Analysis and Synthesis of Air Thermal Imaging Equipment]. Kazan: Kazan Federal University [in Russian].
6. Ivanov, V. P., Kurt, V. I., Ovsyannikov, V. A., & Filippov, V. L. (2006). Modelirovanie i ocenka sovremennih teplovizionnih priborov [Modeling and Evaluation of Modern Thermal Imaging Devices]. Kazan: NPO “GIPO” [in Russian].
7. Proektirovanie opticheskikh sistem [Design of Optical Systems]. (1983). Moscow: Mir [in Russian].

© Е. В. Дружкин, Т. Н. Хацевич, 2018

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН, ПОЛУЧАЕМЫХ ВИДЕОКАМЕРАМИ

Владимир Станиславович Корнеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)343-29-33, e-mail: korneyv@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности, тел. (383)343-91-11, e-mail: vreichert@yandex.ru

Дарья Сергеевна Михайлова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ст. преподаватель кафедры физики, тел. (383)343-29-33, e-mail: daria-83@mail.ru

Рассмотрен пример выполнения лабораторной работы по волновой оптике, в которой с помощью пакета программ «MATLAB» и «MS Office Excel» выполняется компьютерная обработка получаемых цифровой видеокамерой изображений дифракционных картин. Подробно описана последовательность компьютерной обработки полученных изображений и показана возможность построения функции распределения интенсивности излучения в пространстве. Основным достоинством компьютерной обработки интерференционных и дифракционных картин, по мнению авторов, является возможность сравнения математических моделей с результатами физических измерений. Компьютерная обработка получаемых изображений может быть использована студентами в последующих курсах изучения специальных дисциплин, при выполнении научно-исследовательских работ, при обработке результатов измерений и построении моделей физических явлений.

Ключевые слова: волновая оптика, интерференционная и дифракционная картины, «MATLAB», «MS Office Excel», цифровые видеокамеры, фотоприемная матрица, функция распределения интенсивности излучения.

COMPUTER PROCESSING OF INTERFERENCE AND DIFFRACTION PICTURES IMAGES OBTAINED BY VIDEO CAMERAS FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Vladimir S. Korneyev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Physics, phone: (383)343-29-33, e-mail: korneyv@mail.ru

Valery A. Reichert

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Information Security, phone: (383)343-91-11, e-mail: vreichert@yandex.ru

Darya S. Mikhailova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Physics, phone: (383)343-29-33, e-mail: daria-83@mail.ru

An example of the laboratory work on wave optics in which the software package “MATLAB” and “MS Office Excel” performs computer processing of the images of diffraction patterns obtained by a digital video camera is considered. The sequence of computer processing of the obtained images is described in detail and the possibility of constructing the distribution function of radiation intensity in space is shown. The main advantage of computer processing of interference and diffraction patterns, according to the authors, is the possibility of comparing mathematical models with the results of physical measurements. Computer processing of obtained images can be used by students in subsequent courses in the study of special disciplines, in the performance of scientific research, in the processing of measurement results and in the construction of models of physical phenomena.

Key words: wave optics, interference and diffraction patterns, “MATLAB”, “MS Office Excel”, digital video cameras, photo-detector array, radiation intensity distribution function.

Введение

Лабораторный практикум является важной составной частью учебного процесса преподавания дисциплины «Физика» в техническом Вузе. Выполнение лабораторного практикума обучающимися решает следующие задачи:

- ознакомление с физическими моделями и принципами работы технических устройств на физической ступени абстракции;
- обучение решению физических задач, использованию современных информационных технологий с целью поиска, приобретения и переработки информации физического содержания и оценки ее достоверности;
- совершенствование навыков планирования, выполнения и обработки результатов физических экспериментов.

Преподавателями и сотрудниками кафедры физики СГУГиТ в лабораторный физический практикум внедряются работы, в которых используется компьютерная обработка цифрового сигнала видеокамеры с помощью пакета программ «MATLAB» [1, 2]. Комплекс лабораторных работ по волновой оптике позволяет выполнять до пяти лабораторных работ и изучать такие явления как интерференция, дифракция, поляризация световых волн. Преимуществами комплекса являются: компактность, повышенная точность измерений, возможность графического представления функции распределения интенсивности излучения в пространстве $I = I(\varphi)$ [3, 4].

Методы и материалы

В качестве примера рассмотрим выполнение лабораторной работы «Изучение дифракции световых волн на щели» [5].

В результате дифракции монохроматической волны, на экране установленным соосно с лазером и спектральной щелью, возникают дифракционные максимумы.

Функция распределения энергии дифрагированной волны выражается в виде:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2; u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi; \quad (1)$$

где a – поперечный размер щели, λ – длина волны лазерного излучения.

Большая доля энергии электромагнитной волны локализована в области центрального дифракционного максимума, положение которого задается выражением

$$\sin \varphi = \pm \lambda / a. \quad (2)$$

Полученная дифракционная картина через объектив фотокамеры проецируется на фотоприемную матрицу (рис. 1).

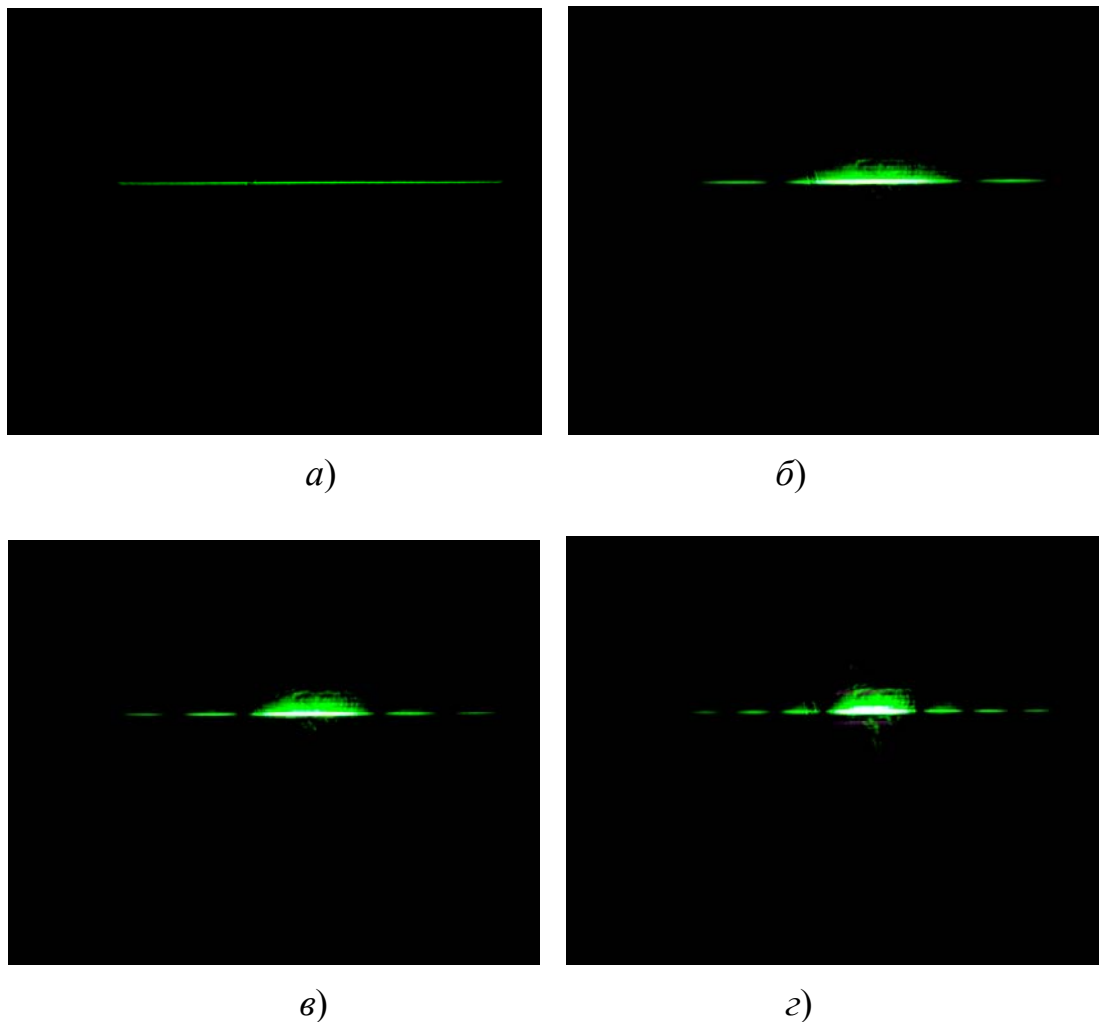


Рис. 1. Фото дифракционных картин полученных с помощью фотокамеры (ширина щели последовательно увеличивается от снимка а) к снимку г)

Полученные изображения дифракционных картин сохраняются в виде файлов и в дальнейшем обрабатываются по следующему алгоритму:

- 1) кадрирование дифракционной картины;
- 2) выбор светового компонента (R; G; B);
- 3) измерение ширины центрального дифракционного максимума;
- 4) построение графика распределения интенсивности по выбранной строке фотоприемной матрицы;
- 5) вывод дискретной информации (№ элемента и значение яркости сигнала изображения) для выбранной строки в файл «data.xls»;
- 6) построение теоретической функции распределения интенсивности дифрагированного излучения (1).

Содержимое файла «data.xls» подвергается средствами MS Office Excel дальнейшей обработке, которая включает следующие действия:

- 1) предварительная оценка пространственной периодичности функции

$$I = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2;$$

- 2) предварительная оценка центра дифракционной картины ($\sin \varphi = 0$);
- 3) предварительная оценка теоретического значения амплитуды ($I = I_0$);
- 4) подстройка в ручном режиме экспериментальных параметров картины с параметрами математической модели.

Основным критерием соответствия экспериментального и теоретического распределения интенсивности дифрагированного излучения является наложение графиков этих распределений и величина среднеквадратичного отклонения (СКО).

Последовательность компьютерной обработки представлена на рис. 2–4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1													Но поправка	0
2													А коэф. поправки	1
3													Т поправка	0
4			сумма интенсивно- сти	Ко ампл. коэф	мин. абс. разность от полюсуммы	Но, смещение центра арифметич- еское	мин. абс. разность от уровня макс./2	То, период	Ноп, смещение элемента с поправкой	Коп ампл. с коэф поправки	Топ, период с поправк ой	коэф. суммы (справочно =	сумма накоплено (справочно)	СКО, дискр
5			132928	255	87	716	0,5	97	716,00	255	97,00	5,46	24353	130,7
6			макс.=	255				поправки →	0,0	1,0	0			
7	№ строки	№ эле- нта	Значение	сумма значения накопительно	абс. Разность				Знач. эп. смещ-ое	Значение	У-аргумент (параметр)	(sin U/U) ²	Max *(sin U/U) ²	(U ²)
8	419	1	0	0	66464	-	127,5	-	-715	0	-23,16	0,00	0	0
9	из	2	0	0	66464	-	127,5	-	-714	0	-23,12	0,00	0	0
10	1280	3	0	0	66464	-	127,5	-	-713	0	-23,09	0,00	0	0
11		4	0	0	66464	-	127,5	-	-712	0	-23,06	0,00	0	0
12	макс. зн.	5	0	0	66464	-	127,5	-	-711	0	-23,03	0,00	0	0
13	255	6	0	0	66464	-	127,5	-	-710	0	-23,00	0,00	0	0
14		7	0	0	66464	-	127,5	-	-709	0	-22,96	0,00	0	0
15		8	0	0	66464	-	127,5	-	-708	0	-22,93	0,00	0	0

Рис. 2. Print Screen Таблицы «MS Office Excel»
с экспериментальными значениями

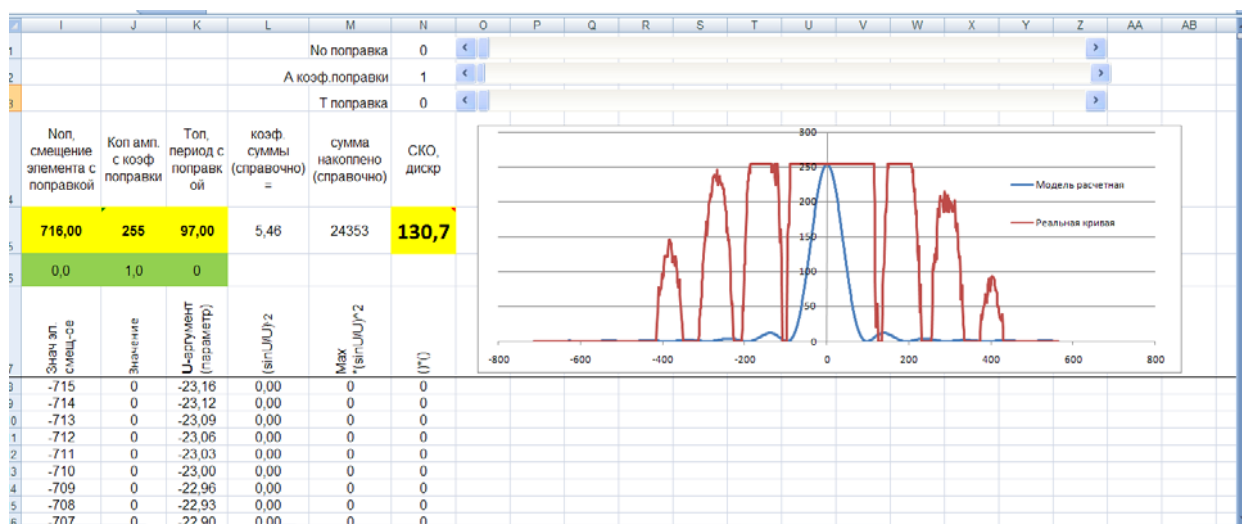


Рис. 3. Графики экспериментальных значений (красный) и теоретической модели (синий) на основе предварительной обработки данных

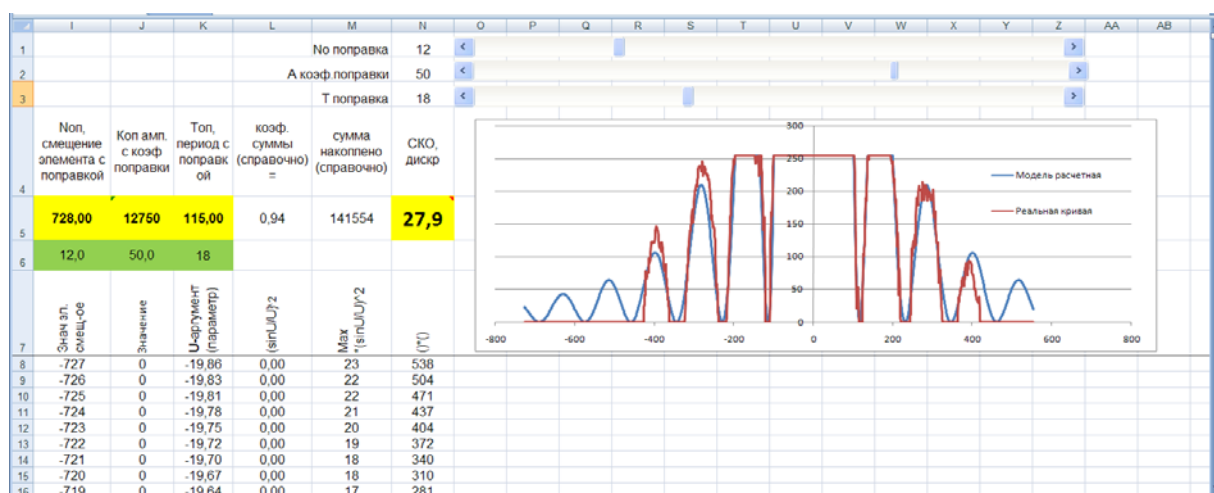


Рис. 4. Графики экспериментальных значений (красный) теоретической модели (синий) и значения параметров соответствия (в таблице выделены желтым цветом)

В ячейке N5 находится значение СКО экспериментальной кривой от математического выражения.

Окончательные значения параметров математического выражения представлены: в ячейке J5 – амплитуда; в ячейке K5 – период функции; в ячейке I5 – центр дифракционной картины.

Окончательные оценки параметров математической модели получены на основе предварительных оценок, поправок и коэффициента поправки.

Используются поправки, находящиеся в ячейки I6, K6 и коэффициент поправки (поправочный множитель) в ячейке J6. Для большего удобства эти попра-

вочные значения формируются движками, и их значения дублируются в ячейках N1, N2, N3. Определение поправочных значений начинается с коэффициента поправки максимального значения амплитуды в математическом выражении. Перемещая движок «K – коэф. поправки», находят такое положение движка, при котором значение СКО минимально. Далее аналогично устанавливают движок «T – поправка». Затем – движок «N – поправка». Для уменьшения СКО итерацию повторяют.

На рис. 4 представлены графики экспериментальных значений и теоретической модели (окончательный) и значения параметров математической модели.

Результаты

Компьютерная обработка видеоизображений, применяемая в лабораторном практикуме по волновой оптике, позволяет решать следующие задачи:

- измерение рабочих характеристик светового поля изображений;
- выявление особенностей структуры поверхностей;
- анализ и устранение шумов источников излучений;
- настройка и юстировка оптических систем и их элементов.
- исследование динамики процессов, связанных с изменением оптических параметров излучения.

Заключение

В научно-технической литературе имеются публикации [6–9] в которых рассмотрены различные аспекты компьютерной обработки видеоизображений:

- для определения физических параметров объекта;
- для улучшения качества видеоизображения;
- для оценки уровня шума изображения на основе анализа спектральной плотности мощности сигнала;
- в том числе, в среде MATLAB.

Отличительной особенностью нашей работы является то, что графики распределения интенсивности излучения, построенные в результате компьютерной обработки видеоизображений, сравниваются с известными математическими моделями, и это дает возможность обучающимся более детально изучить законы волновой оптики и получить начальное представление о «техническом зрении». Практика использования видеокамер и последующая компьютерная обработка изображений может быть успешно распространена на последующие курсы обучения бакалавров и магистрантов по направлениям «Оптотехника» и «Приборостроение», а также использоваться в научно-исследовательской работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Райхерт В. А., Корнеев В. С., Батомункуев Ю. Ц. Возможности применения компьютерных технологий в физическом практикуме по волновой оптике // Сб. трудов XIII Междунар. учебно-методической конф. под ред. Н. В. Калачева и

М. Б. Шапочкина (Новосибирск, 23–25 сентября 2014 г.). – Москва : Издательский дом МФО, 2014. – С. 134–135.

2. Чесноков В. В., Райхерт В. А., Корнеев В. С., Батомункуев Ю. Ц. Особенности использования комплекса лабораторных работ по волновой оптике в процессе изучения курса физики // Сб. материалов Междунар. научно-методической конф. «Современные тенденции формирования образовательной среды технологического университета». – Новосибирск : СГГА, 2014. – Ч. 2. – С. 251–254.

3. Батомункуев Ю. Ц., Корнеев В. С. Пути повышения эффективности научно-исследовательской работы студентов на кафедре физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. // Сб. материалов Междунар. научно-методической конф. «Ведущая роль современного университета в технологической и кадровой модернизации российской экономики». – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Ч. 1. – С. 236–239.

4. Корнеев В. С., Батомункуев Ю. Ц. Современные технологии обработки оптических изображений в лабораторном практикуме по физике // Сб. материалов Междунар. научно-методической конф. «Современные тенденции повышения качества непрерывного образования». – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – Ч. 1. – С. 36–39.

5. Корнеев В. С., Батомункуев Ю. Ц., Райхерт В. А. Волновая оптика : метод. указания. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 43 с.

6. Речкалов В. Г., Ушаков В. Л., Пызин Г. П., Бескачко В. П. Компьютерная обработка изображения в методе определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости по форме поверхности капли // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 30. – С. 83–88.

7. Коровин Я. С., Хисамутдинов М. В. Метод получения незашумленного изображения на основе обработки видеопоследовательности // Компьютерная оптика. – 2014. – № 38 (1). – С. 112–117.

8. Лапшенков Е. М., Неэталонная оценка уровня шума цифрового изображения на основе гармонического анализа // Компьютерная оптика. – 2012. – № 36 (3). – С. 439–447.

9. Куликов А. Ю., Романова В. О. Обработка рентгеновских изображений в среде MATLAB // Молодой ученый. – 2016. – № 8. – С. 251–253.

REFERENCES

1. Chesnokov, V. V., Chesnokov, D. V., Reichert, V. A., Korneyev, V. S., & Batomunkuev Yu. T. (2014). Possibilities of using computer technologies in physical practice on wave optics. *Kollektsiya rabot 13 Mejdunarodnoy uchebno-metodicheskoy konferentsii* [Collection of works of the 13th International Educational and Methodical Conference Ed. N. V. Kalacheva and M. B. Shapochkina]. (p. 134–135). Moscow: Publishing House of the Moscow Physical Society [in Russian].

2. Chesnokov, V. V., Reichert, V. A., Korneyev, V. S., & Batomunkuev, Yu. T. (2014). Features of the use of a set of laboratory works on wave optics in the course of studying the physics course. In *Sbornik materialov Mejdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii “Sovremennye tendentsii formirovaniya obrazovatel’noy sredy tekhnologicheskogo universiteta”*: chast’ 2 [Proceedings of International Scientific and Methodical Conference “Modern trends in the formation of the educational environment of a technological university”: part 2] (pp. 251–254). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

3. Batomunkuev, Yu. T., & Korneyev, V. S. (2015). Ways of increasing the effectiveness of research work of students at the Department of Physics of the Siberian State University of Geosystems and Technologies. In *Sbornik materialov Mejdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii “Vedushchaya rol’ sovremennogo universiteta v tekhnologicheskoi i kadrovoi modernizatsii Rossiiskoy ekonomiki”*: chast’ 1 [Proceedings of International Scientific and Methodical Conference “The leading role of the modern university in the technological and personnel modernization of the Russian economy”: part 1] (pp. 236–239). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].

4. Korneyev, V. S., & Batomunkuev, Yu. T. (2016). Modern technologies of processing optical images in laboratory practical work on physics. In Sbornik materialov Mejdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii "Sovremennye tendentsii povisheniya kachestva nepreryvnogo obrazovaniya": chast' 1 [Proceedings of International Scientific and Methodical Conference "Modern tendencies in improving the quality of continuing education": part 1] (pp. 36–39). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
5. Korneyev, V. S., Batomunkuev, Yu. T., & Reikhert, V. A. (2015). Volnovaya optika: metodicheskie ukazaniya [Wave Optics: Methodical Instructions]. Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
6. Rechkalov, V. G., Ushakov, V. L., Pyzin, G. P., & Beskachko, V. P. (2010). Computer image processing in the method of determining the coefficient of surface tension of a liquid by the shape of the surface of a drop. Vestnik YUrGU [Vestnik SUSU], 30, 83–88 [in Russian].
7. Korovin, Ya. S., & Hisamutdinov, M. V. (2014). The method of obtaining a noiseless image based on the processing of the video sequence. Computer Optics, 38(1), 112–117.
8. Lapshenkov, E. M. (2012). Non-standard estimation of noise level of digital image on the basis of harmonic analysis. Computer Optics, 36(3), 439–447.
9. Kulikov, A. Yu., & Romanova, V. O. (2016). Processing of X-ray images in the MATLAB environment. Young Scientist, 8, 251–253.

© В. С. Корнеев, В. А. Райхерт, Д. С. Михайлова, 2018

СРАВНЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ, ПОСТРОЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ОПТИЧЕСКИМ СХЕМАМ

Игорь Александрович Зарубин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Владимир Александрович Лабусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, зав. лабораторией; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Сергей Александрович Бабин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (383)333-27-79, e-mail: serg_b@vmk.iae.nsk.su

Приведены основные параметры малогабаритных спектрометров, построенных по схеме Черни-Тернера и по схеме с вогнутой дифракционной решеткой с плоским полем, регистрация спектра в которых осуществляется линейками фотодетекторов. Показаны результаты их сравнения по рабочему спектральному диапазону, разрешению и светосиле. Приводятся примеры использования спектрометров.

Ключевые слова: спектрометр, атомно-эмиссионный анализ, схема Черни-Тернера.

COMPARISON OF COMPACT SPECTROMETERS DESIGNED BY DIFFERENT OPTICAL SCHEMES

Igor A. Zarubin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Academician Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Vladimir A. Labusov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of laboratory; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., phone: (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Sergey A. Babin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)333-27-79, e-mail: serg_b@vmk.iae.nsk.su

The main parameters of compact spectrometers constructed according to the Czerny-Turner scheme and according to a scheme with a concave diffraction grating with a flat-field are presented. The results of their comparison are shown. Examples of the use of spectrometers are given.

Key words: spectrometer, atomic-emission analysis, the Czerny-Turner scheme.

Введение

В настоящее время наиболее распространенным диспергирующим элементом в спектральных приборах является отражательная дифракционная решетка. В зависимости от типа используемой решетки спектральные приборы могут быть построены по разным оптическим схемам. По схеме Пашена-Рунге с вогнутой дифракционной решеткой изготовлено большинство спектральных приборов с фокусным расстоянием от 500 мм и больше [1]. Малогабаритные приборы с фокусным расстоянием около 100 мм часто построены по схеме Черни-Тернера с плоской решеткой либо в них используются вогнутые решетки с плоским полем, строящие изображение на плоской поверхности. Схему Черни-Тернера отличает протяженная плоская поверхность регистрации, обеспечивающая одинаковое спектральное разрешение во всем рабочем спектральном диапазоне [2, 3]. Приборы с вогнутой решеткой с плоским полем имеют высокое относительное отверстие, достигающее 1:1,2, обеспечивающее повышенную светосилу [4, 5, 6]. Таким образом, малогабаритные спектрометры с разными оптическими схемами, различаются по характеристикам и, поэтому, по областям применения. Нами был разработан ряд малогабаритных спектрометров, построенных как по схеме Черни-Тернера, так и с использованием вогнутой решетки с плоским полем.

Целью работы является информирование специалистов о характеристиках малогабаритных спектрометров, построенных по схеме Черни-Тернера и по схеме с вогнутой дифракционной решеткой с плоским полем.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектрометр по схеме Черни-Тернера с плоской дифракционной решеткой «Колибри-2» позволяет зарегистрировать любой рабочий спектральный диапазон в интервале от 190 до 1100 нм. Протяженность одновременно регистрируемого диапазона может быть от 70 до 1000 нм, разрешение от 0,1 до 1 нм. Основные параметры спектрометра приведены в табл. 1. Спектрометр герметичен и заполнен инертным газом, что дало возможность установить линейный детектор излучения без покровного стекла, исключив тем самым переотражения на этом стекле.

Как видно из табл. 1 относительное отверстие в спектрометре достигает значения 1:6. Дальнейшее увеличение относительного отверстия приводит к значительному ухудшению качества изображения входной щели как в меридиональной, так и в сагиттальной плоскостях. Спектральное разрешение ухудшается из-за комы и сферической аберрации, а ожидаемое увеличение светосилы спектрометра не происходит из-за астигматизма [7].

Таблица 1

Основные параметры спектрометра «Колибри-2»

Плоская дифракционная решетка	Нарезная					Голографическая	Нарезная	
– номер модификации	1	2	3	4	5	6	7	8
– частота штрихов, штр/мм	300	400	600	600	1200	1440	1500	1800
– направление угла блеска, нм	315	270	300	500	250	240	530	600
– рабочий порядок спектра	первый							
– размер заштрихованной области, мм	15 × 15				12,7 × 12,7		15 × 15	
Рабочий спектральный диапазон, нм	190 ÷ 1100	190 ÷ 940	200 ÷ 670	390 ÷ 860	190 ÷ 430	190 ÷ 360	440 ÷ 600	470 ÷ 590
Спектральное разрешение, нм	1	0,7	0,4		0,25	0,17	0,2	0,1
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	30,9	24	14,4		7,8	7,2	5,3	4,3
Уровень рассеянного света, %	0,05							
Фокусное расстояние, мм	100							
Относительное отверстие	1:6				1:8		1:6	
Динамический диапазон	10 ⁴							

Для создания спектрометра с большей светосилой для решения задач люминесценции и комбинационного рассеяния нами была использована схема с вогнутой решеткой с плоским полем. Как отмечалось выше, такие решетки позволяют работать с большим относительным отверстием без потери качества изображения входной щели. Было изготовлено три варианта с разными рабочими спектральными диапазонами. Основные параметры прибора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры малогабаритных спектрометров с вогнутыми решетками с плоским полем

	№ 1	№ 2	№ 3
Вогнутая дифракционная решетка	голографическая		
Частота штрихов, штр/мм	385	436	1300
Рабочий порядок спектра	первый		
Размер заштрихованной области, мм	Ø 18	Ø 47	Ø 38
Радиус кривизны, мм	40	112	100
Рабочий спектральный диапазон, нм	300÷900	190÷400	530÷700
Спектральное разрешение (при входной щели 50 мкм), нм	4	0,8	0,5
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	64	20	8,4
Относительное отверстие	1:2,1	1:2,3	1:2,9
Динамический диапазон	6×10 ³		
Интерфейс	Ethernet или USB	Ethernet	
Габариты, мм ³	63*68*44	170*130*90	
Вес	0.4 кг	1 кг	

Было проведено экспериментальное сравнение светосилы и спектрального разрешения «Колибри-2» и спектрометров с вогнутыми решетками. Для этого регистрировался линейчатый спектр лампы с полым катодом ЛСП-6Э, включающий линии меди, цинка и неона. Излучение в спектрометры вводилось с помощью волоконно-оптического кабеля с кварцевым световодом, диаметром 1 мм. Спектры нормировались на коэффициент, учитывающий разную ширину входных щелей. Для определения светосилы спектрометров измерялась интенсивность отдельных спектральных линий в диапазоне 200-1000 нм. На рис. 1 приведено отношение спектральных линий, зарегистрированных спектрометрами с вогнутыми решетками, к интенсивностям этих же линий, зарегистрированных спектрометром «Колибри-2».

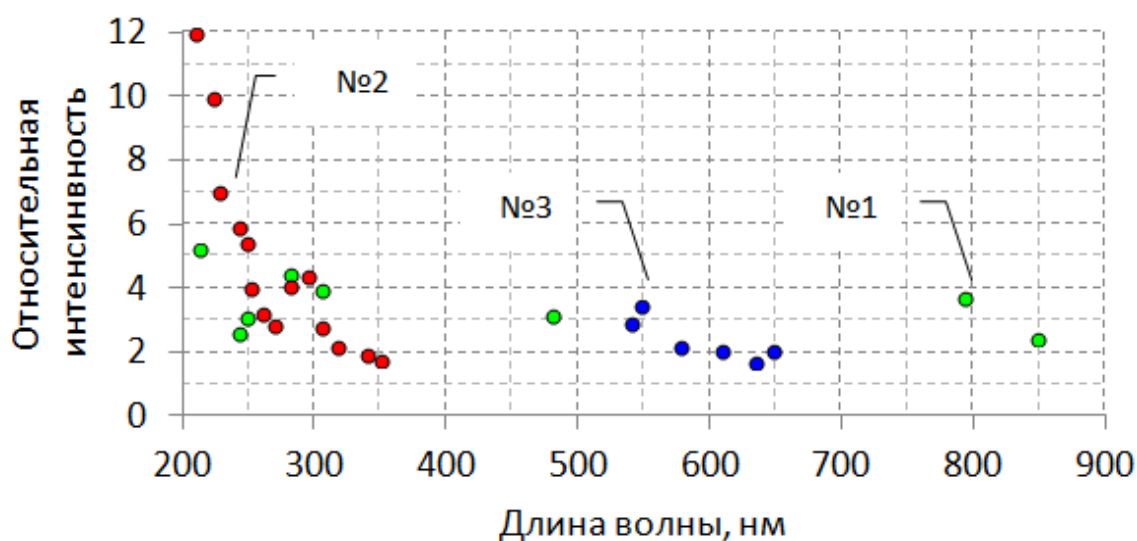


Рис. 1. Отношение интенсивностей спектральных линий спектрометров № 1, 2, 3 (из табл. 2) к спектрометру «Колибри-2»

Из рис. 1 видно, что в спектрометрах с вогнутыми решетками интенсивность зарегистрированного спектра выше. Ожидалось увеличение примерно на порядок, так как относительное отверстие выше в три раза. Меньшее увеличение, вероятно, связано с меньшей дифракционной эффективностью используемых вогнутых решеток, а для спектрометра № 2 также с тем, что в нем была закрыта половина площади решетки для регистрации «узких» спектральных линий. При использовании полной апертуры этой решетки светосила спектрометра возрастает, однако спектральные линии существенно уширяются.

Для сравнения спектрального разрешения была построена зависимость ширины зарегистрированных спектральных линий на полувысоте от длины волны, которая показана на рис. 2. Спектральное разрешение «Колибри-2» приведено для решетки 300 штр/мм.

Рис. 2 подтверждает основное достоинство спектрометров по схеме Черни-Тернера, а именно, одинаковое спектральное разрешение во всем рабочем диапазоне.

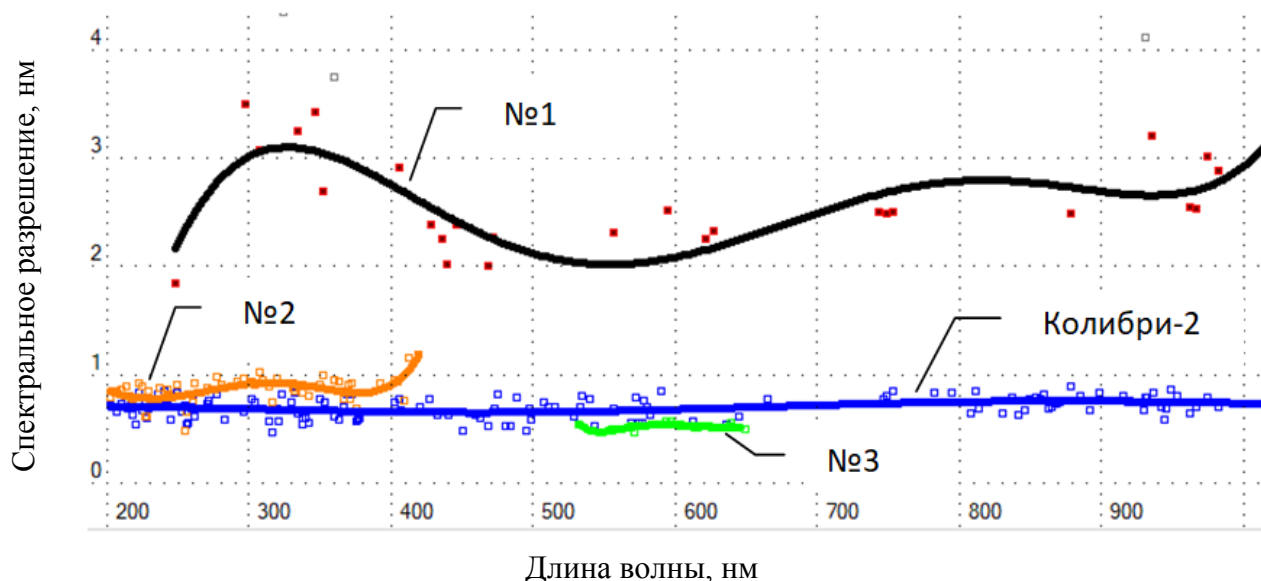


Рис. 2. Спектральное разрешение малогабаритных спектрометров

Применение спектрометров

Представленные малогабаритные спектрометры используются для регистрации спектров эмиссии и абсорбции. Например, спектрометр «Колибри-2» наиболее часто используется в атомно-эмиссионном анализе [3, 8]. С его помощью расширяют спектральный диапазон существующих спектральных комплексов, увеличивая количество определяемых элементов, а также диапазон определения концентрации элементов таблицы Менделеева. Для примера на рис. 3, *а* приведена градуировочная зависимость для серебра: низкие концентрации определяются по аналитической линии $\text{Ag}328.068$, а высокие – по менее чувствительной спектральной линии $\text{Ag}546.55$ нм, регистрируемой «Колибри-2». Таким образом, как видно из рис. 3, *а*, диапазон определяемых концентраций серебра составляет 6 порядков [9].

Спектрометры с вогнутой решеткой, обладая большей светосилой, находят применение в областях, где интенсивность излучения низкая – люминесценция и комбинационное рассеяние. Для примера на рис. 3, *б* приведен спектр комбинационного рассеяния минерала целестина SrSO_4 , возбужденный лазерным излучением 532 нм и зарегистрированный спектрометром № 3. Сравнение полученного спектра с его спектром из базы данных RRUFF [10] показывает возможность использования этого спектрометра для определения минералов.

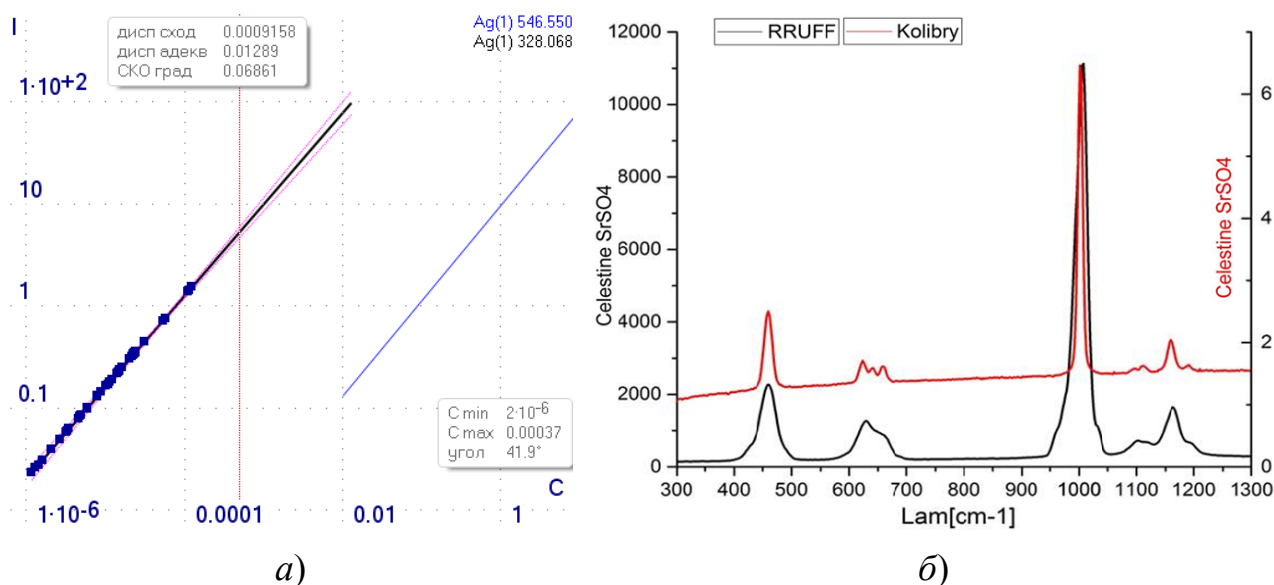


Рис. 3. Применение малогабаритных спектрометров:

а) градуировочная зависимость интенсивности двух линий серебра от концентрации; б) спектр комбинационного рассеяния минерала целестина

Заключение

Таким образом, широкая номенклатура доступных дифракционных решеток позволяет изготавливать малогабаритные спектрометры со значительно различающимися характеристиками. Отличие по светосиле и спектральному разрешению достигает порядка и более. Одновременно регистрируемый диапазон составляет от 70 нм до 1000 нм в интервале 190-1100 нм. Одновременно обеспечить высокую светосилу и разрешение в спектрометрах не позволяют элементы оптической схемы, поэтому схема Черни-Тернера и схема с вогнутой решеткой с плоским полем одинаково востребованы. Если важно иметь хорошее спектральное разрешение в широком диапазоне, например, в атомно-эмиссионном анализе, когда аналитические линии могут быть равномерно распределены по рабочему диапазону спектрометра и нужно зарегистрировать каждую, оптимальной является схема Черни-Тернера. С другой стороны, для спектров люминесценции или рамановского рассеяния на первый план выходит возможность зарегистрировать излучение низкой интенсивности. В этом случае предпочтительнее спектрометр с вогнутой решеткой с плоским полем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лабусов В. А. Приборы и комплексы компании «ВМК-Оптоэлектроника» для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Современное состояние // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1/2. – С. 12–21.

2. Tang Ming, Fan Xianguang, Wang Xin, Xu Yingjie, Que Jing, He Jian. General study of asymmetrical crossed Czerny–Turner spectrometer // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54 (33). – С. 9966–9975.
3. Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Саушкин М. С., Зарубин И. А., Селюнин Д. О. Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – Т. 73, № 5. – С. 35–39.
4. Белокопытов А. А., Лукин А. В., Максакова Л. А., Муслимов Э. Р., Саттаров Ф. А., Шигапова Н. М. Светосильные вогнутые голограммные дифракционные решетки с плоским полем для малогабаритных спектрометров // *Голография. Наука и практика: Сборник трудов 12-й Международной конференции «ГолоЭкспо 2015» (Казань, 12–15 октября 2015 г.)*. – Казань : КНИТУ, 2015. – С. 125–127.
5. Palmer C. *Diffraction Grating Handbook* – 7th ed. – New York : Newport Corporation, 2014. – 265 p.
6. Holographic fabrication of large-constant concave gratings for wide-range flat-field spectrometers with the addition of a concave lens / Qian Zhou, Xinghui Li, Kai Ni, Rui Tian, and Jinchao Pang // *Optics Express*. – 2016. – № 24 (2). – P. 732–738.
7. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л. : «Машиностроение», 1975. – 312 с.
8. Путьмаков А. Н., Зарубин И. А., Бурумов И. Д., Селюнин Д. О. Спектрометр «Павлин» для пламенного атомно-эмиссионного спектрального анализа // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2015. – Т. 81, № 1-II. – С. 105–108.
9. Зарубин И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2017. – Т. 83, № 1, ч. 2. – С. 114–117.
10. Estrada C. F. Changing the science of mineralogy: The use of Raman spectroscopy in mineral identification and the RRUFF project // *Outcrop, Newsletter of the Rocky Mountain Association of Geologists*. – 2007. – № 55. – С. 1–8.

REFERENCES

1. Labusov, V. A. (2015). Devices and complexes of the company “VMK-Optoelektronika” for atomic-emission spectral analysis. Current state. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1/2), 12–21 [in Russian].
2. Tang, M., Fan, X., Wang, X., Xu, Y., Que, J., & He, J. (2015). General study of asymmetrical crossed Czerny–Turner spectrometer. *Applied Optics*, 54(33), 9966–9975.
3. Labusov, V. A., Put'makov, A. N., Saushkin, M. S., Zarubin, I. A., & Selyunin, D. O. (2007). Multichannel spectrometer “Kolibri-2” and its use for simultaneous determination of alkaline and alkaline-earth metals by the method of flame photometry. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 73(S), 35–39 [in Russian].
4. Belokopytov, A. A., Lukin, A. V., Maksakova, L. A., Muslimov, E. R., Sattarov, F. A., & Shigapova, N. M. (2015). Fast concave holographic flat-field gratings for small-sized spectrometers. In *Sbornik trudov “GoloEHkspo 2015”: 12-j Mezhdunarodnoj konferencii* [Proceedings of “GoloEHkspo 2015”: 12th International Scientific Conference] (pp. 125–127). Kazan: KNRTU [in Russian].
5. Palmer, C. (2014). *Diffraction Grating Handbook*. New York: Newport Corporation.
6. Zhou, Q., Li, X., Ni, K., Tian, R., & Pang, J. (2016). Holographic fabrication of large-constant concave gratings for wide-range flat-field spectrometers with the addition of a concave lens. *Optics Express*, 24(2), 732–738.
7. Pejsahson, I. V. (1975). *Optika spektral'nyh priborov* [Optics of spectral devices]. L.: «Mashinostroenie» [in Russian].

8. Put'makov, A. N., Zarubin, I. A., Burumov, I. D., & Selyunin, D. O. (2015). Spectrometer “Pavlin” for flame atomic emission spectroscopic analysis. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1-II), 105–108 [in Russian].
9. Zarubin, I. A. (2017). Possibilities of a small-sized “Kolibri-2” spectrometer in atomic emission spectroscopic analysis. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 83(1, part 2), 114–117 [in Russian].
10. Estrada, C. F. (2007). Changing the science of mineralogy: The use of Raman spectroscopy in mineral identification and the RRUFF project. *Outcrop, Newsletter of the Rocky Mountain Association of Geologists*, 55, 1–8.

© И. А. Зарубин, В. А. Лабусов, С. А. Бабин, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ТРАССАХ ОБСЕРВАТОРИИ «КАЙТАНАК» В РЕСПУБЛИКЕ АЛТАЙ

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, старший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Ирина Сергеевна Месензова

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, инженер, тел. (383)330-71-20, e-mail: mesenzova.i@yandex.ru

Никита Алексеевич Павлов

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, инженер, тел. (383)330-71-20, e-mail: pna1994@mail.ru

Арсений Викторович Повазжаев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, младший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Проведено исследование оптических характеристик многолучевой УФ излучателя на матрице 3×3 УФ светодиодов с углом расходимости луча 0,33 градуса и углом расходимости всех лучей 6 градусов в условиях высокогорной атмосферы. Распределение УФ импульсов при закрытой трассе показала их близость к логнормальному распределению. Эксперименты показали, что при увеличении высоты подъема трассы связи увеличивается уровень прямого УФ сигнала, а уровень рассеянного УФ сигнала уменьшается.

Ключевые слова: оптическая антенна, рассеяние, лазерная линия, светодиод, нормальное распределение, угол расходимости.

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF ULTRAVIOLET MULTILAYER SIGNALS DISTRIBUTION ON THE TRAILS OF KAITANAK OBSERVATORY IN THE REPUBLIC OF ALTAI

Alexander V. Britvin

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Irina S. Mesenzova

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)330-71-20, e-mail: mesenzova.i@yandex.ru

Nikita A. Pavlov

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)330-71-20, e-mail: pna1994@mail.ru

Arseniy V. Povazhaev

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

Boris V. Poller

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

The study of optical performance of a multipath UV emitter on a matrix of 3×3 UV LEDs with a beam divergence angle of 0.33 degrees and a divergence angle of all the rays of 6 degrees in a high-altitude atmosphere are investigated. The distribution of UV pulses with a closed track showed their proximity to the lognormal distribution. Experiments have shown that as the elevation of the communication track increases, the level of the direct UV signal increases, and the level of the dispersed UV signal decreases.

Key words: optical antenna, dispersion, laser line, LED, normal distribution, divergence angle.

Введение

Рост потребностей в увеличении объемов и скорости передачи информации в системах мониторинга наземных объектов, в системах управления производством, стимулирует интерес к новым беспроводным оптическим (инфракрасным (ИК) и ультрафиолетовым (УФ)) линиям связи и контроля. ИК линии уже широко применяются при прямой видимости между объектами, но в условиях отсутствия прямой видимости могут применяться уже УФ линии.

Ранее экспериментальные УФ линии на длинах волн 253 нм, 250-330 нм, 338 нм, 365 нм, 385 нм, 405 нм, 450 нм исследовались в работах [1–4].

На лазерной линии на 253 нм в 1998 г. ИЛФ СО РАН совместно с ИХКиГ СО РАН на трассах в Академгородке с превышением над прямым лучом около 100 м получены характеристики ослабления и флуктуации рассеянных сигналов на дальности до 1500 м. На широкополосной УФ линии в области 250–330 нм получена дальность прямой связи до 8 км при отношении сигнал шум более 10. Для этой УФ линии связи с рассеянием в 2002 г. в Академгородке была впервые осуществлена передача речевой информации на расстояние 1 км с хорошим качеством, передача частоты потока импульсов с погрешностью менее 4 %.

На импортных полупроводниковых излучателях 250 нм нами в 2004–2006 гг. получены характеристики ослабления и рассеяния сигналов на трассе до 100 м, на 365 нм прямая связь до 1 км, с рассеянием до 100 м.

Результаты экспериментов, выполненных сотрудниками ИОА СО РАН в 2011 – 2016 гг. по лазерным линиям УФ и видимого диапазонов с рассеянием в атмосфере приведены в публикациях [5–7].

Интенсивные исследования и применение УФ информационных систем проводятся за рубежом, разработаны специализированные излучатели и приемники для УФ диапазона [8–11].

В АО «НИИПП» (г. Томск) совместно с ИЛФ СО РАН и ЗАО «СКБ» созданы экспериментальные образцы УФ светодиодов, на которых был разработан многолучевой передатчик на 365 нм, испытанный на трассах в Академгородке и в Республике Алтай (обсерватория ИЛФ СО РАН «Кайтанак».)

В условиях трасс обсерватории «Кайтанак» на высотах от 1100 до 2100 м в 2012–2017 гг. выполнены исследования характеристик лазерных линий: 0,4; 0,55; 0,802; 1,55 мкм и миллиметровых радиолний на 4,5 мм (75 ГГц), линий на УФ диодах 365 нм.

Отличие трасс «Кайтанак» от трасс Академгородка заключается в том, что они в 3–10 раз выше над уровнем моря, чем трассы Академгородка. Соответственно плотность атмосферы, аэрозольный состав воздуха, оптические фоны существенно иные, что влияет на характеристики линий.

Для определения характеристик распространения УФ сигналов производились измерения ослабления сигналов как на прямых трассах с прямой видимостью, так и на закрытых трассах, без прямой видимости между излучателем и приемником.

Методы и материалы

Для исследований использовались многолучевой УФ излучатель на матрице 3×3 УФ светодиодов с углом расходимости луча 0,33 градуса и углом расходимости всех лучей 6 градусов. Импульсная мощность на длине волны 365 нм от УФ СД около 4,5 Вт.

Также использовался однолучевой излучатель на длине волны 365 нм от УФ СД с импульсной мощностью 0,5 Вт и углом расходимости луча около 0,5°.

Для приема излучения использовались как фотодиодный приемник с чувствительностью не хуже 5 нВт на 365 нм с различными оптическими антеннами (линзы, телескоп ТАЛ-1), так и приемник на ФЭУ с чувствительностью не хуже десятков пВт на 365 нм с кварцевой линзой и фильтром УФС-5. Выходные сигналы регистрировались с помощью осциллографов HantekDSO 1202B. Схема лучей на закрытой трассе и состав оборудования представлены на рис. 1.

Измерения на прямой трассе производились при метеорологической дальности видимости не менее 10 км. Измерения на закрытой трассе для снижения фоновых засветок производились в темное время суток, полученные зависимости от углов поворотов в основном соответствуют ранее полученным данным в условиях трасс Академгородка, за исключением уровней сигнала, так как измерения производились на высотах трасс в пять – шесть раз больше, чем в Академгородке. Осциллограмма сигнала с фотодиодного приемника с оптикой ТАЛ-1 от однолучевого излучателя на прямой трассе представлена на рис. 2.

Распределение амплитуд импульсов представлено на рис. 3, проверка гипотез о распределении показала близость к нормальному распределению.

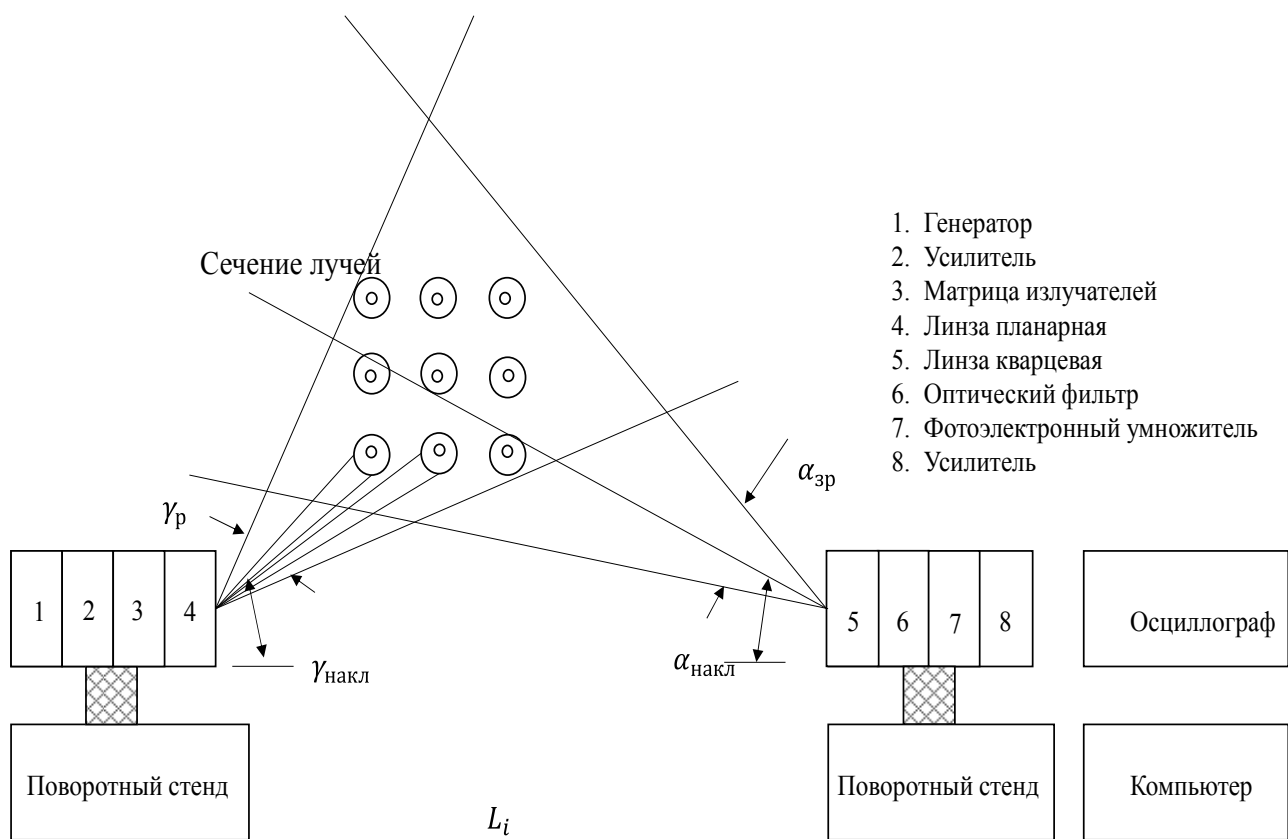


Рис. 1. Схема лучей на закрытой трассе и состав оборудования

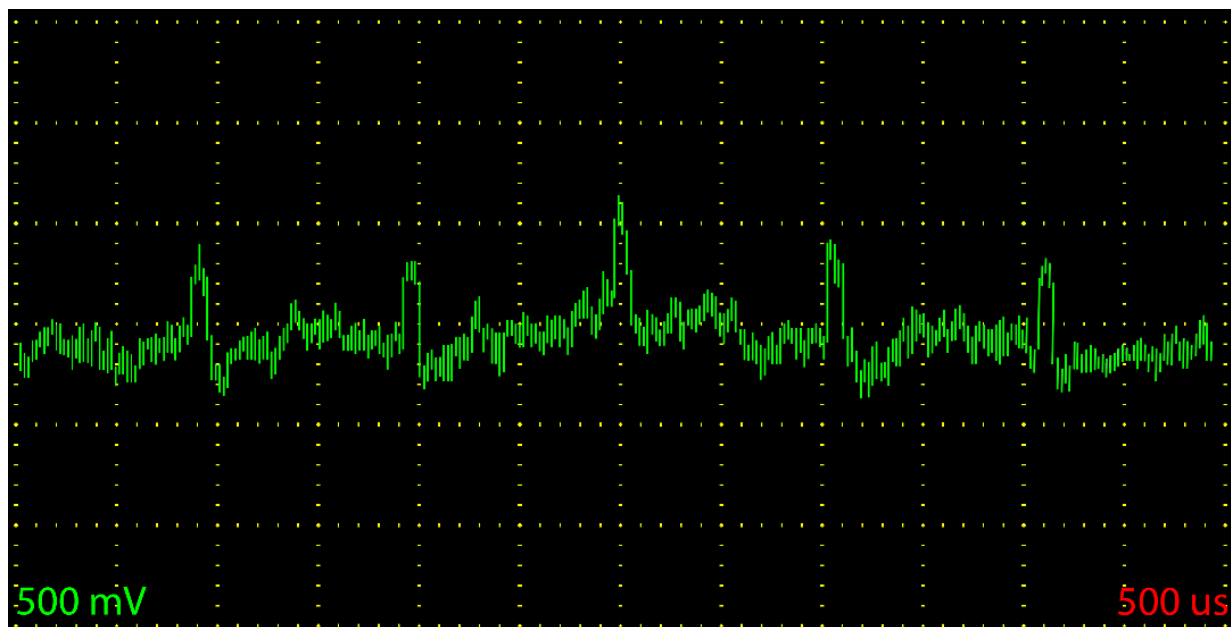


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с фотодиодного приемника с оптикой ТАЛ-1

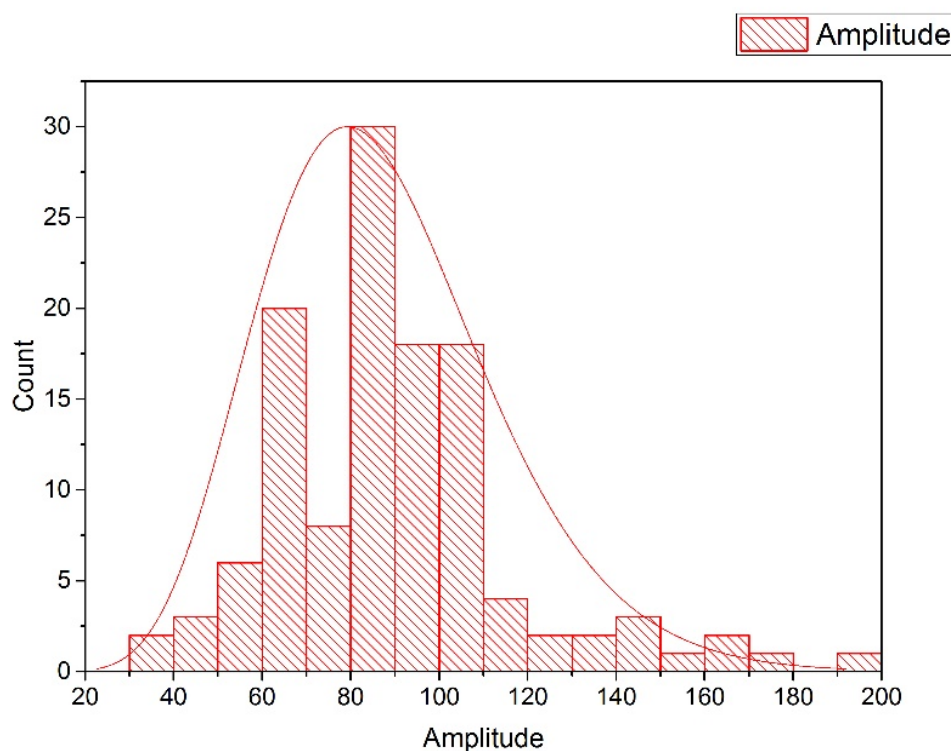


Рис. 3. Гистограмма распределения амплитуд импульсов

Заключение

Распределение УФ импульсов при закрытой трассе показала их близость к логнормальному распределению.

Эксперименты показывают, что при увеличении высоты подъема трассы связи увеличивается уровень прямого УФ сигнала, а уровень рассеянного УФ сигнала уменьшается. Изменение конфигурации УФ пучка путем переключения лучей в матрице 3×3 позволяет реагировать на пространственную неоднородность атмосферы по трассе распространения и также создавать рассредоточенные зоны связи и мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пожидаев В. Н. Выбор длины волны для систем загоризонтной связи / Радиотехника и электроника. – 1977. – № 11. – С. 2265–2271.
2. Поллер Б. В., Щетинин Ю. И., Коняев С. И. и др. Характеристики атмосферного оптического канала связи с рассеянием // 8-ая Междунар. научн.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь»: сб. докладов в 3 т. (Воронеж, 23–25 апреля 2002 г.). – Воронеж, Россия, 2002. Т. 1. – С. 735–745.
3. Поллер Б. В. Ультрафиолетовые лазерные информационные системы. Состояние и перспективы развития // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 6. – С. 21–24.
4. Поллер Б. В., Щетинин Ю. И. Телекоммуникационные технологии на основе ультрафиолетового канала связи с рассеянием // Межд. научн.-практ. конф. ПФИС-2006:

сб. материалов конф. (Новосибирск, 31 июля – 3 августа 2006 г.). – Новосибирск : ИВМиМГ СО РАН, 2006. – С. 229–233.

5. Поллер Б. В., Бритвин А. В., Кусакина А. Е. Экспериментальные характеристики распространения лазерных сигналов на горизонтальной и наклонной трассах на горном Алтае // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 5. – С. 108–110.

6. Белов В. В., Абрамочкин В. Н., Гриднев Ю. В. и др. Бистатическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – № 2. – С. 111–114.

7. Тарасенков М. В., Белов В. В., Познахарев Е. С. Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – № 5. – С. 10–15.

8. Shaw Gari A., Siegel Andrew M., Nischan Melissa L. Demonstration system and applications for compact wireless ultraviolet communications // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5071. – P. 241–252.

9. Haipeng D., Chen G., Arun K., Sadler B. M., Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2009. – Vol. 27 (9). – P. 1535–1544.

10. Han D., Liu Y., Zhang K., Luo P., Zhang M. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system // Optics Express. – 2012. – Vol. 20 (14). – P. 15833–15842.

11. Elshimy M. A., Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28 (3). – P. 420–428.

REFERENCES

1. Pozhidayev, V. N. (1977). The choice of wavelength for the systems of over-the-horizon communication. Radiotekhnika i elektronika [Radio Engineering and Electronic Physics], 11, 2265–2271 [in Russian].

2. Poller, B. V., Shchetinin, Yu. I., Konyaev, S. I., et al. (2002). Characteristics of an atmospheric optical communication channel with dispersion. In Sbornik dokladov: 8-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Radiolokaciya, navigaciya, svyaz” [Proceedings of 8th International Scientific and Technical Conference “Radiolocation, Navigation, Communication”: Vol. 1] (pp. 735–745). Voronezh, Russia [in Russian].

3. Poller, B. V. (2005). Ultra-violet laser information systems. State and prospects of development. In Sbornik materialov Geo-Sibir'-2005: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 6 [Proceedings of GEO-Siberia-2005: International Scientific Conference: Vol. 6] (pp. 21–24). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

4. Poller, B. V., & Shchetinin, Yu. I. (2006). Telecommunication technologies on the basis of an ultra-violet communication channel with dispersion. In Sbornik materialov konferentsii: Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii PFIS-2006 [Proceedings of International scientific and practical conference PFIS-2006] (pp. 229–233). Novosibirsk: ICM&MG SB RAS [in Russian].

5. Poller, B. V., Britvin, A. V., & Kusakina, A. E. (2013). Experimental characteristics of distribution of laser signals on horizontal and inclined routes in mountain Altai. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2013: IX Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa i vystavki: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 5(3). SibOptika-2013 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 5(3) SibOptics-2013] (pp. 108–110). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

6. Belov, V. V., Abramochkin, V. N., Gridnev, Yu. V., et al. (2017). Bistatic optical-electronic communication in the UF-range of lengths of waves. Field experiments in 2016. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 2, 111–114 [in Russian].
7. Tarasenkova, M. V., Belov, V. V., & Poznakharev, E. S. (2017). Modeling of process of information transfer through atmospheric channels of distribution of scattered laser radiation. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics], 5, 10–15 [in Russian].
8. Shaw, G. A., Siegel, A. M., & Nischan, M. L. (2003). Demonstration system and applications for compact wireless ultraviolet communications. *Proceedings of SPIE*, 5071, 241–252.
9. Haipeng, D., Chen, G., Arun, K., Sadler, B. M., & Xu, Z. (2009). Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27(9), 1535–1544.
10. Han, D., Liu, Y., Zhang, K., Luo, P., & Zhang, M. (2012). Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system. *Optics Express*, 20(14), 15833–15842.
11. Elshimy, M. A., & Hranilovic, S. (2011). Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries. *Journal of the Optical Society of America A*, 28(3), 420–428.

© А. В. Бритвин, И. С. Месенцова, Н. А. Павлов,
А. В. Поважаев, Б. В. Поллер, 2018

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ АНЕМОМЕТРИЯ

Владимир Генриевич Меледин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (913)939-19-59, e-mail: meledin@itp.nsc.ru; ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1-321, генеральный директор, тел. (383)330-87-82, e-mail: director@ioit.ru

Работа посвящена развитию методов лазерной доплеровской полупроводниковой анемометрии и систем на ее основе для научных исследований, инновационных и импортозамещающих промышленных технологий, широко используемых на крупнейших предприятиях России.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные информационные системы, обработка сигналов.

LASER DOPPLER SEMICONDUCTOR ANEMOMETRY

Vladimir G. Meledin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, phone: (913)939-19-59, e-mail: meledin@itp.nsc.ru; Institute of Optic-Electronic Information Technologies. Public corporation, 1-321, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Director General, phone: (383)330-87-82, e-mail: director@ioit.ru

The work is devoted to the development of Laser Doppler Semiconductor Anemometry methods and systems for scientific researches, innovative and the industrial import-substitution technologies that widely used at the largest enterprises of Russia.

Key words: laser Doppler anemometry, semiconductor lasers, optoelectronic information systems, processing of signals.

Введение

Развитие физических основ многих эффективных технологий связано с необходимостью проведения экспериментальных исследований течений жидкостей и газов [1, 2]. Актуальность подобных работ обусловлена необходимостью верификации компьютерных моделей, кодов и симуляций [3]. Особенно важны на сегодня подобные исследования для наукоемких и сложных в реализации областей, связанных с аэрокосмическими, ядерными и химическими технологиями, нефтегазовой промышленностью и металлургией [4-12]. Развитие фотоники, электроники, компьютеров и новой элементной базы стимулировало появление и новых и эффективных методов экспериментальной диагностики.

Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) – метод бесконтактного измерения скорости движения потоков – в настоящее время широко используется в научных исследованиях и технических приложениях. Информация о скорости

получается при измерении доплеровского сдвига частоты лазерного света, рассеянного взвешенными в потоке и движущимися вместе с ним малыми частицами и фазовыми неоднородностями. Лазерные доплеровские анемометры, выполненные на основе современных достижений фотоники и электроники, обеспечивают необходимый уровень чувствительности, точности и воспроизводимости показаний. Они существенно наукоемки, их структура комплексна, а реализация требует решения проблем из различных областей науки и техники (оптика, лазерная физика, обработка информации, статистическая радиофизика и т.д.).

Со времен первой публикации по лазерной доплеровской анемометрии (Yeh Y., Commins H.Z., 1964) прошло полвека. За это время в нашей стране тематика развивалась различными научными коллективами, особенно значительный вклад внесли, кроме автора, Ю.Н. Дубнищев, В.С. Соболев, П.Я. Белоусов и В.А. Павлов (Новосибирск), а также Б.С. Ринкевичус (Москва). Сегодня лидером в данной области является коллектив, руководимый автором настоящей работы, создающий лазерные доплеровские полупроводниковые анемометры для науки и промышленности. Значительный научный задел при поддержке программы импортозамещения СО РАН обусловил создание отечественных серийных полупроводниковых ЛДА на три года раньше появления лучшего мирового аналога (Dantec) [1]. Ниже представлены результаты работ по лазерной доплеровской полупроводниковой анемометрии.

Методы и материалы

Полупроводниковые инжекционные лазеры видимого диапазона с требуемой для интерферометрии когерентностью при комнатной температуре появились в 80-х годах прошлого века благодаря работам нобелевского лауреата Ж.И. Алферова. Они отличались компактностью, механической прочностью, высоким КПД, низким уровнем шумов и значительной мощностью выходного излучения, превышающей мощность излучения гелий-неоновых лазеров. За прошедшие десятилетия прогресс лазерных диодов был связан с повышением их надежности, замедлением деградации, уменьшением длины волны. Значительное развитие полупроводниковые лазеры получили благодаря многомиллиардным инвестициям со стороны производителей CD, DVD и Blue-ray накопителей информации. Во многом ориентированные на накопители информации, современные полупроводниковые лазеры на основе резонаторов Фабри-Перо имеют некоторые свойства, затрудняющие их непосредственное применение в интерферометрии и доплеровской анемометрии. К ним относятся: диаграмма направленности лазерного пучка, требующая анаморфотных оптических систем; сильная зависимость модового состава и спектральной полосы излучения от тока накачки и температуры; узкий рабочий диапазон тока накачки; значительный разброс параметров полупроводниковых лазерных диодов даже внутри одной партии.

В большинстве известных лазерных доплеровских анемометров пространственный период зондирующего оптического поля определяется длиной волны лазерного излучателя. Поэтому к стабильности длины волны лазерного излучателя предъявляются жесткие требования. Измерительные схемы рассчитаны на работу с высококачественными лазерами, когерентность излучения которых высока, либо с дорогостоящими полупроводниковыми лазерами, имеющими внешние резонаторы, в том числе, волоконные.

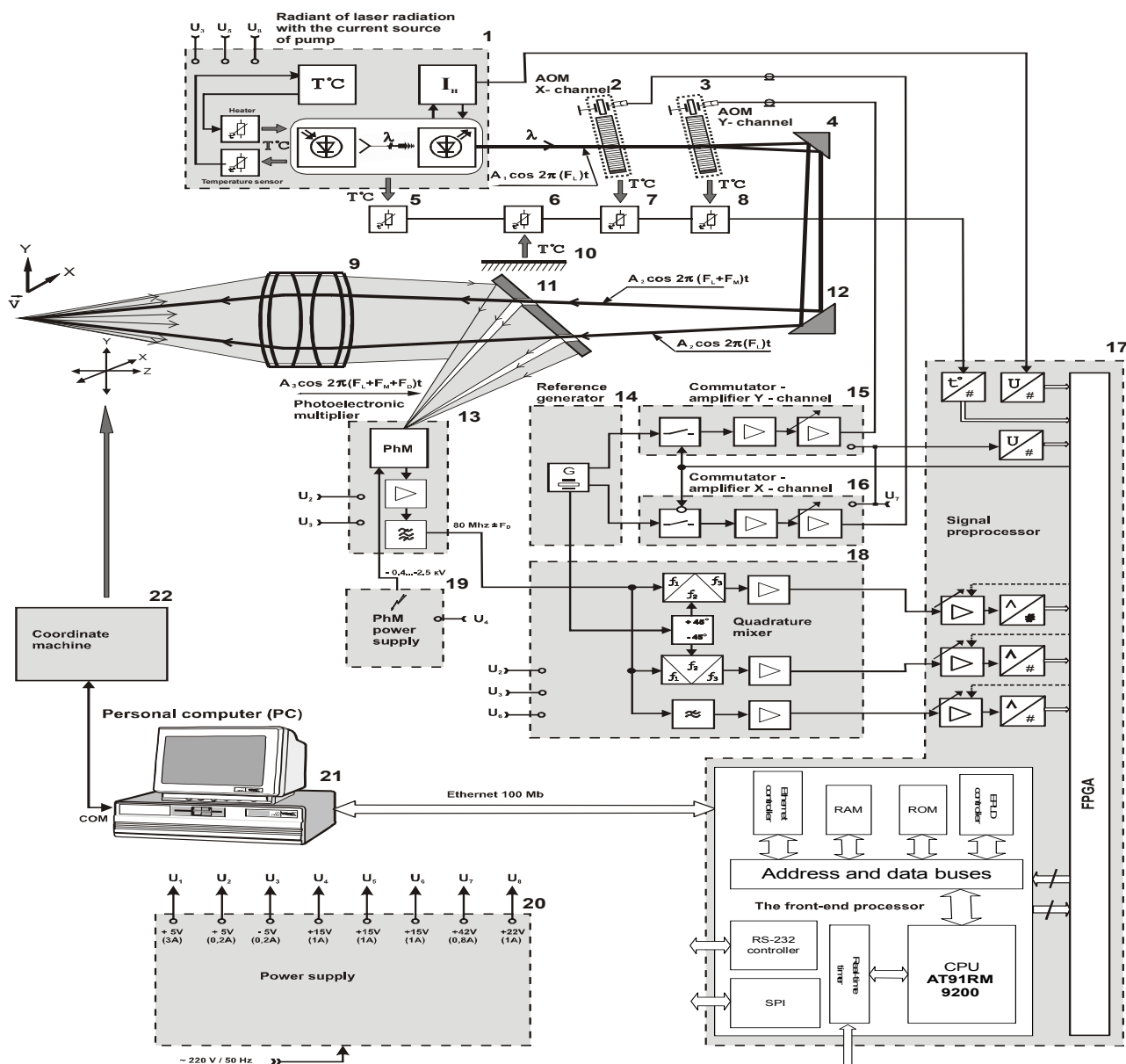
Для полупроводниковых лазерных диодов на основе резонатора Фабри-Перо характерен температурный дрейф длины волны $3 \div 5 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$. Такой же величины скачок может происходить из-за модовой перестройки излучения лазера, например, при повторных включениях, либо при изменениях тока накачки и температуры. При этом вклад нестабильности длины волны (типично $\lambda = 650 \text{ нм}$) в относительную погрешность измерения составит $\delta\lambda/\lambda \approx 0,5\%$, что в несколько раз превышает значение допустимой для экспериментатора погрешности измерения [3]. Оптические схемы лазерных доплеровских полупроводниковых анемометров должны быть построены так, чтобы результат измерений доплеровского сдвига частоты не был критичен к флуктуациям длины волны лазерного излучения.

Результаты

По указанной причине оптическая схема отечественных серийных лазерных доплеровских полупроводниковых анемометров построена на основе комбинации дифракционного лучевого расщепителя и формирующего объектива [1, 3]. Луч лазера после прохождения анаморфотного преобразователя попадает на коммутируемый дифракционный расщепитель. Используется динамическая фазовая дифракционная решетка, реализуемая в акустооптическом модуляторе бегущей волны и явление дифракции лазерного пучка на движущейся фазовой решетке, образованной периодическим изменением показателя преломления фотоупругой среды под действием акустической волны. Дифракционные коммутационные расщепители работают в брэгговском режиме. При этом мощности всех дифрагированных пучков, кроме первого, становятся пренебрежимо малыми, и после фазовой решетки получаются только два пучка: нулевой и первый. При этом угол дифракции Брэгга равен $\Theta = \lambda/(2\Lambda)$, где Λ – период дифракционной решетки. Дифракция Брэгга реализуется при частотах акустической волны порядка $20 \div 100 \text{ МГц}$ (как правило, 80 МГц).

Расщепленные пучки отражаются от локальных зеркальных покрытий на поверхности поворотного зеркала 11 и формирующим объективом направляются на измеряемую светорассеивающую частицу в потоке (рисунок). Когерентное изображение движущейся в зондирующем поле поверхности измеряемой частицы формируется на фотоприемнике 13. Для формирования измерительного объема точка расщепления дифрагированных пучков переносится в исследуемый измерительный объем с угловым увеличением β . Лазерные лучи, соот-

ветствующие первому и нулевому порядкам дифракции, пересекаются в плоскости изображения под углом $2\beta\Theta$. В области пересечения эти лучи образуют интерференционное поле с пространственным периодом $\Lambda_1 = \lambda/(2\beta\Theta)$, причем, подставляя в величину 2Θ , получаем, что $\Lambda_1 = \Lambda/\beta$, и результат измерений не зависит от спектральных параметров излучателя – полупроводникового лазера.



Структура отечественного серийного лазерного доплеровского полупроводникового анемометра серии ЛАД-0**

Пространственный период интерференционной картины, формируемой ахроматическим объективом в измерительном объеме, не зависит от длины волны лазерного излучателя. Он определяется только периодом дифракционной решетки в акустооптическом коммутационном брэгговском расщепителе и угловым увеличением оптической системы (патент РФ №1431498). Оптические

схемы лазерных полупроводниковых доплеровских анемометров на основе комбинации главного объектива с дифракционным лучевым расщепителем существенно снижают спектральные требования к характеристикам лазеров и позволяют использовать в лазерных доплеровских анемометрах массовые надежные и недорогие лазерные диоды.

Лазерные доплеровские полупроводниковые анемометры с дифференциальной конфигурацией зондирующего поля на брэгговской несущей частоте позволяют локально определять ортогональные компоненты вектора скорости исследуемого потока в режиме временного разделения оптико-электронных измерительных каналов.

Луч инжекционного полупроводникового лазера 1 после прохождения согласующих оптических элементов попадает на акустооптические модуляторы 2, 3, бегущие ультразвуковые волны в которых направлены по осям X и Y . На выходах модуляторов, работающих в режиме дифракции Брэгга, формируются три световых пучка, дифрагированных в нулевой, X -минус и Y -минус первый порядки. Расщепленные пучки проходят последовательно через поворотные призмы 4, 12, диэлектрическое зеркало с фасонным покрытием 11 и объективом 9 направляются в локальную исследуемую область, скорость потока в которой необходимо измерить.

Пересекаясь в потоке, лазерные пучки образуют интерференционное поле с заданной периодической структурой. Его изображение в рассеянном свете формируется оптическими элементами на светочувствительной поверхности фотоприемника 13. Размер изображения ограничивается полевой диафрагмой, определяющей параметры пространственной фильтрации в фотоприемном тракте. В качестве излучателя используется серийный инжекционный полупроводниковый лазер Фабри-Перо видимого диапазона на квантоворазмерных структурах, работающий в основной моде с линейной поляризацией выходного когерентно-оптического излучения.

При пересечении светорассеивающей частицей зондирующего оптического поля на выходе фотоприемника появляется радиоимпульс фотоэлектрического сигнала, частота которого есть известная линейная функция доплеровского сдвига частоты, а длительность равна времени прохождения светорассеивателя через интерференционное поле. Усилители-коммутаторы 15 и 16 включают модуляторы 2 и 3, а также синхронно подключают к фотоприемнику 13 квадратурный смеситель 18 и доплеровский сигнальный препроцессор 17 после поступления на его вход радиоимпульсов сигнала.

Переключение оптических каналов коммутируемыми в противофазе акустооптическими брэгговскими модуляторами-расщепителями происходит в моменты времени, когда сигналы стробирования отсутствуют, и накопления информации сигнальный процессор не ведет. Тем самым исключены коммутационные помехи и взаимное влияние оптоэлектронных измерительных каналов. Акустооптические коммутаторы-усилители имеют следующие параметры: коэффициент стоячей волны – 1,1; эффективность – 80%; коэффициент пропуска-

ния 96%; коэффициент контрастности 1000:1; время нарастания импульса лазерного излучения при диаметре падающего пучка 0,2 мм – 40 нс.

Фотопреобразователи ЛДА оптимизированы под измерения в многофазных потоках со значительной концентрацией твердой фазы, имеет защиту от импульсных оптических перегрузок. Используемые при разработке изделия методы параметрической стабилизации характеристик фотоэлектрических преобразователей и схемотехника ориентированы на работу в многоспекловом и счетно-фотонном режимах. Они специально разработаны с учетом специфики доплеровских когерентно-оптических сигналов [1, 2].

Сигнальные процессоры предназначены для комплексной демодуляции доплеровского радиосигнала. В них реализованы метод временной селекции и управление выбором оптического измерительного канала. В сочетании с компьютерным программным сигнальным процессором обеспечивается автоматическая адаптивная коммутация оптических измерительных каналов и измерение ортогональных компонент вектора скорости [4, 13-22].

Обсуждение

В лазерных полупроводниковых анемометрах реализован ряд новых и оригинальных технических решений. В их числе анаморфотные оптические схемы, позволившие применить современные мощные полупроводниковые лазеры с ограниченной степенью пространственной и временной когерентности, новая встроенная система обработки сигнала на основе параллельных программируемых логических структур FPGA, а также новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Оптоэлектронные методы селекции вектора скорости светорассеивателей в малых телесных углах обеспечили существенное увеличение чувствительности и расширение функциональных возможностей. Полупроводниковые анемометры содержат элементы пассивной аэродинамической защиты наружных оптических поверхностей от пыли и атмосферного аэрозоля. Оптические элементы сконструированы с учетом сохранения их параметров при изменении внешних температурных условий и уровней концентрации лучевой энергии. Жесткая фиксация оптических элементов не допускает отклонений при механических воздействиях и температурных перепадах.

Результаты работ по лазерной доплеровской полупроводниковой анемометрии внедрены и успешно используются в энергетике для изучения кавитационных процессов и снижения эрозии в элементах гидроагрегатов, исследования обтекания и оптимизация формы лопаток паровых турбин (ОАО «Силовые машины – ЛМЗ»), диагностики процессов в топочных камерах, горелках (ИТ СО РАН). На транспорте для натурных испытаний авиационных и ракетных двигателей (ФГУП «ВО Внештехника», СГАУ), испытания моделей летательных аппаратов и изделий ракетно-космической техники (КГТУ-КАИ, ИТПМ СО РАН), оптимизации и диагностики топливных форсунок авиационных двигателей, процессов перемешивания в камерах сгорания перспективных авиационных двигателей (ОАО «Авиадвигатель»), изучения потоков теплоносителя в

моделях атомных силовых установок (ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), оптимизации формы подводных лодок (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»), диагностики распространения лесных пожаров и разработки средств пожаротушения (ТПУ, ФГБУ ВНИИПО МЧС России) и др. [1, 2, 4].

Заключение

Разработаны научные основы лазерной доплеровской полупроводниковой анемометрии, на этой базе созданы многие уникальные измерительные системы и технологии прорывного характера, успешно внедренные и эффективно работающие в науке, промышленности и на транспорте, отмеченные Государственными премиями Правительства РФ по науке и технике (2014, 2017). Предложены и практически реализованы принципы построения информационных диагностических доплеровских систем с оптоэлектронной и программной обработкой информации на мощных полупроводниковых лазерах с ограниченной пространственной и временной когерентностью.

Разработаны и реализованы устойчивые методы обработки сложных широкодиапазонных сигналов лазерных доплеровских информационных диагностических систем при обратном светорассеянии естественными взвесями в потоке в условиях фотонного ограничения. Создана линейка отечественных лазерных доплеровских полупроводниковых анемометров для измерений полей физических величин в газожидкостных многофазных потоках серии «ЛАД-0**». Системы внедрены на десятках предприятий и научно-образовательных учреждений и используются в рамках работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, в том числе для повышения безопасности на объектах атомной и гидроэнергетики, космических и транспортных систем. Результаты применения и реакция пользователей подтверждают высокий научно-технический уровень, во многом превосходящий лучшие иностранные аналоги.

Работа выполнялась при частичной поддержке программы импортозамещения СО РАН и гранта РНФ № 14-29-00093.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В. Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии / Отв. редактор член-корр. РАН С. В. Алексеенко. – Новосибирск : Академиздат, 2015. – 173 с.
2. Меледин В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 3–12.
3. Pribaturin N. A., Meledin V. G., Glavny V. G. Measurement of local parameters of a liquid flow using electrical impedance sensors // Eurasian Physical Technical Journal. – 2016. – Vol. 13 (25). – P. 11–16.

4. Meledin V. Optoelectronic measurements in science and innovative industrial technologies // *Optoelectronic Devices and Properties*. – Chapter 18. – Suffolk, UK: INTECH, 2011. – P. 373–399.
5. Kabardin I. K., Meledin V. G., Yavorskiy N. I., Pavlov V. A., Pravdina M. H., Kulikov D. V., Rahmanov V. V. Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square cross-section // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016)*. AIP Conference Proceeding 1770. – P. 030003-1–030003-9.
6. Rakhmanov V., Kulikov D. The analysis of applicability of the refractive-index-matching method for flow investigation by LDA method in models of the fire chambers of complex geometry // *Thermophysical Basis of Energy Technologies, EPJ Web of Conferences*, 2014. – Vol. 76. – 1008-4.
7. Dremov S. V., Shtork S. I., Skripkin S. G., Kabardin I. K. An experimental investigation of the interaction between a pair of precessing vortices in a tangential vortex chamber // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2016. – Vol. 754. – P. 022003.
8. Kabardin I. K., Meledin V. G., Yavorskiy N. I., Pavlov V. A., Pravdina M. H., Kulikov D. V., Rahmanov V. V. Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square cross-section // *XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Perm, Russia, June 27 – July 3, 2016)*. – Perm, 2016. – P. 110–111.
9. Alekseenko S. V., Anufriev, I. S. Glavniy V. G., Krasinsky D. V., Rakhmanov V. V., Salomatov V. V., Shadrin E. Yu. Study of 3D Flow Structure and Heat Transfer in a Vortex Furnace // *Heat Transfer Research*. – 2016. – Vol. 47 (7). – P. 653–667.
10. Кабардин И. К., Меледин В. Г., Яворский Н. И., Павлов В. А., Правдина М. Х., Куликов Д. В. Маловозмущающая температурная диагностика вихревой трубы квадратного сечения // *Труды Пятой Междунар. конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 19–22 октября 2015 г.)*. – Казань, 2015. – С. 78–79.
11. Kabardin I., Meledin V., Yavorsky N., Pavlov V., Pravdina M., Kulikov D., Polyakova V. Comparing Ranque tubes of circular and square cross section // *MATEC Web of Conferences* 115, 02022 (2017).
12. Куликов Д. В., Меледин В. Г., Яворский Н. И., Павлов В. А., Правдина М. Х., Кабардин И. К. Бесконтактная диагностика кинематики потока в вихревой трубе квадратного сечения // *Труды Пятой Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 19–22 октября 2015 г.)*. – Казань, 2015. – С. 80–81.
13. Klimov A. V., Glavnyi V. G., Bakakin G. V., Meledin V. G. Spectral method for processing signals of a high-accuracy laser radar // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2016. – Vol. 52 (5). – P. 1–7.
14. Klimov A., Glavny V., Dvoynishnikov S., Bakakin G., Meledin V. Frequency estimation of noised periodic signal by part of period // *International Conference on Applied Social Science and Information Technology (ASSIT-ICHSS 2016)*. – Thailand, 2016. – P. 227–229.
15. Budko A. Yu., Medvedev M. Yu., et al. Analysis of ion current integral characteristics for estimation of combustion process parameters in internal combustion engines // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2017. – Vol. 6 (3). – P. 188–193.
16. Dvoynishnikov S., Bakakin G., Meledin V., Rahmanov V. Phase images processing using parallel programming // *International Conference on Mechatronics, Control and Automation Engineering (MCAE2016)* (Bangkok, Thailand, July 24–25, 2016). – Bangkok, 2016. – P. 178–181.
17. Климов А. В., Главный В. Г., Рахманов В. В. Об одном подходе к оцениванию частоты синусоидального сигнала с помехами // *Восьмая Междунар. молодежная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, 1–7 сентября, 2016)*. – Новосибирск, 2016. – С. 71.
18. Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Glavnyi V. G., Naumov I. V., Chubov A. S. Estimation of optimal frequency of spatial modulation of the radiation of 3D measurements // *Measurement Techniques*. – 2015. – Vol. 58 (5). – P. 506–511.

19. Dvoynishnikov S., Meledin V., Pavlov V. Integrated assessment method of impulse response in optical system of 3D scanner with phase triangulation / International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015) (Beijing, China, May 17–18, 2015). – Beijing, 2015. – P. 527–531.
20. Kabardin I. K., Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Naumov I. V. The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2016. – № 4. – P. 504–508.
21. Рахманов В. В., Меледин В. Г., Наумов И. В., Куликов Д. В. Пат. 2612202 Российская Федерация, МПК G 01 P 3/36. Способ измерения полного вектора скорости в гидропотоках с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА); патентообладатель ИТ СО РАН. – № 2015148289; заявл. 10.11.2015; опубл. 03.03.2017, Бюл. № 7.
22. Klimov A. V., Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Kulikov D. V., Krotov S. V., Shchepikhin I. V. Determination of the three-dimensional velocity vector using the laser Doppler measurements of unevenly sampled components // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2017. – Vol. 53 (3). – P. 216–222.

REFERENCES

1. Meledin, V. (2015). Information optoelectronic diagnostics. The science and innovative industrial technologies / Novosibirsk: Academizdat. ISBN 978-5-9907241-7-4.
2. Meledin, V. (2014). Optoelectronic information systems for science and industry. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2014 [Proc. of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2014]* (pp. 3–12). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
3. Pribaturin, N. A., Meledin, V. G., & Glavny, V. G. (2016). Measurement of local parameters of a liquid flow using electrical impedance sensors. *Eurasian Physical Technical Journal*, 13(25), 11–16. ISSN 1811-1165.
4. Meledin, V. (2011). Optoelectronic Measurements in Science and Innovative Industrial Technologies / Suffolk, UK: INTECH, 373–399. ISBN 978-953-307-204-3.
5. Kabardin, I., Meledin, V., et al (2016). Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square cross-section. In *International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016)*. AIP Conference Proceeding 1770, 030003-1–030003-9. doi: 10.1063/1.4963945.
6. Rakhmanov, V., & Kulikov, D. (2014). The analysis of applicability of the refractive-index-matching method for flow investigation by LDA method in models of the fire chambers of complex geometry. In *Thermophysical Basis of Energy Technologies*, EPJ Web of Conferences, Vol. 76, 1008-4.
7. Dremov, S., Shtork, S., Skripkin, S., & Kabardin, I. (2016). An experimental investigation of the interaction between a pair of precessing vortices in a tangential vortex chamber. In *Journal of Physics: Conf. Series*. 2016. Vol. 754, 022003. doi:10.1088/1742-6596/754/2/022003.
8. Kabardin, I., Meledin, V., Yavorskiy N., et al. (2016). Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square cross-section. In *XVIII International conference on the methods of aerophysical research*, June 27– July 3, 2016, Perm, Russia (pp. 110–111).
9. Alekseenko, S., Anufriev, I., Glavniy, V., et al. (2016). Study of 3D flow structure and heat transfer in a vortex furnace. *Heat Transfer Research*, 47(7), 653–667. doi: 10.1615/HeatTransRes.2016015721.
10. Kabardin, I., Meledin, V., Javorskiy, N., Pavlov, V., Pravdina, M., & Kulikov, D. (2015). Low revolting temperature diagnostics of vortical pipe of square section. In *Fifth International conference “Heat-mass exchange and hydrodynamics in the twirled streams”*, October, 19–22th, 2015, Kazan (pp. 78–79) [in Russian].
11. Kabardin, I., Meledin, V., Yavorskiy, N., Pavlov, V., Pravdina, M., Kulikov, D., & Polyakova, V. (2017). Comparing Ranque tubes of circular and square cross section. In *MATEC Web of Conferences* 115, 02022 (2017). doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711502022>.

12. Kulikov, D., Meledin, V., Javorskij, N., Pavlov, V., Pravdina, M., & Kabardin, I. (2015). Contactless diagnostics of kinematics of stream in vortical pipe of square section. In Fifth International conference "Heat-mass exchange and hydrodynamics in the twirled streams", October 19–22th, 2015, Kazan (pp. 80–81) [in Russian].
13. Klimov, A. V., Glavnyi, V. G., Bakakin, G. V., & Meledin, V. G. (2016). Spectral method for processing signals of a high-accuracy laser radar. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 52(5), 1–7. ISSN 8756-6990.
14. Klimov, A., Glavny, V., Dvoynishnikov, S., Bakakin, G., & Meledin, V. (2016). Frequency estimation of noised periodic signal by part of period. In *Int. Conf. on Appl. Social Science and Information Technology (ASSIT-ICHSS)*, Thailand (pp. 227–229).
15. Budko, A. Yu., Medvedev, M. Yu., Budko, R. Yu., Ivashin, P. V., Tverdokhlebov, A. Ya., Gerasimov, D. N., & Rakhmanov, V. V. (2017). Analysis of ion current integral characteristics for estimation of combustion process parameters in internal combustion engines. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 6(3), 188–193.
16. Dvoynishnikov, S., Bakakin, G., Meledin, V., & Rahmanov V. (2016). Phase Images Processing using Parallel Programming. In *2016 International Conference on Mechatronics, Control and Automation Engineering (MCAE2016)*, July 24-25, 2016, Bangkok, Thailand (WOS) (pp. 178–181).
17. Klimov, A., Glavnuy, V., & Rahmanov, V. (2016). To one approach to sinusoidal signal with hindrances frequencies estimation. In *8-th international youth scientific school-conference "Theory and numerical methods of the decision of return and incorrect problems"*. Novosibirsk, Academgorodok, September, 1-7st, 2016 (p. 71).
18. Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., Glavnyi, V. G., Naumov, I. V., & Chubov, A. S. (2015). Estimation of optimal frequency of spatial modulation of the radiation of 3D measurements. *Measurement Techniques*, 58(5), 506–511.
19. Dvoynishnikov, S., Meledin, V., & Pavlov, V. (2015). Integrated assessment method of impulse response in optical system of 3D scanner with phase triangulation. In *2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015)*, May 17-18, 2015, Beijing, China (pp. 527–531). ISBN: 978-1-60595-240-6.
20. Kabardin, I. K., Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., & Naumov, I. V. (2016). The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection. *Journal of Engineering Thermophysics*, 4, 504–508.
21. Rahmanov, V., Meledin, V., Naumov, I., & Kulikov, D. (2017). Patent RF No 2612202. The method of measurement of full speed vector in hydrostreams by means of laser Doppler anemometry (LDA), publ. 03.03.2017, Bull. No 7.
22. Klimov, A. V., Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., Kulikov, D. V., Krotov, S. V., & Shchepikhin, I. V. (2017). Determination of the three-dimensional velocity vector using the laser Doppler measurements of unevenly sampled components. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(3), 216–222.

© *В. Г. Меледин*, 2018

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ И СРЕД В ПРИЗЕМНОЙ ЗОНЕ ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, старший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Арсений Викторович Поважжаев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, младший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

Никита Сергеевич Никитенко

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, ведущий инженер, тел. (383)330-71-20, e-mail: rabochnet@mail.ru

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Приведена лазерная система мониторинга запасов снега в бассейнах рек для прогнозирования паводковой ситуации. Приведены результаты расчетов разрешающей способности системы для контроля в ближней зоне, до 40 м, а также оценка разрешающей способности системы на трассе длиной 1600 м, имитирующей размещение оптического зонда в труднодоступной горной местности, для контроля лавин, оползней.

Ключевые слова: лазерный сканатор, угол расходимости, оптическая система.

CHARACTERISTICS OF THE OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR INSPECTION OF MOVING OBJECTS AND ENVIRONMENT IN THE GROUND LASER MONITORING ZONE

Alexander V. Britvin

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Arseniy V. Povazhaev

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: powazhaev@yandex.ru

Nikita S. Nikitenko

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Engineer, phone: (383)330-71-20, e-mail: rabochnet@mail.ru

Boris V. Poller

Institute of Laser Physics SB RAS, 15 B, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

The laser system for monitoring the snow reserves in river basins to forecast the flood situation is provided. The results of calculations of the system resolution for monitoring in the near zone, up to 40 m, as well as the estimation of the system resolution on a 1600 m long track, simulating the placement of the optical probe in a remote mountainous area for monitoring the avalanches and landslides are provided.

Key words: laser scanner, divergence angle, optical system.

Введение

Надежность известных и разрабатываемых моделей прогноза паводковой ситуации напрямую зависит от оперативности и полноты сведений о запасах снега в бассейнах рек, кроме того имеет место быть трудность получения информации о запасах снега в отдаленной и в горной местности [1, 2].

Известные методы оценки запасов снега сводятся к наблюдениям на метеопостах или к выездам групп в отдельные районы для ручного замера уровня снега с помощью снегомерных зондов. Для поведения измерений на метеопостах в г. Томске (Институт мониторинга климатических и экологических СО РАН) разработан метод измерения уровня снега на основе электронных интегральных датчиков температуры, размещенных на зонде, с возможностью беспроводной передачи информации, получаемой с датчиков [3]. Однако этот метод требует размещения электронных устройств и источников питания на зонде и зависит от теплопроводности несущей конструкции зонда и окружающей среды.

Методы и материалы

Развиваемый метод лазерного мониторинга основан на использовании лазерного сканирования заданной зоны площадью S , на которой размещены на определенных расстояниях L_i N вешек высотой F с установленными на них k сегментированными отражателями с определенными размерами и площадью b . В такой конфигурации уровень снега $H_{i\text{сн}}$ определяется по величине отраженного лазерного сигнала $P_{i\text{отр}}$ от не засыпанных снегом отражателей $k_{\text{чист}}$:

$$P_{i\text{отр}} = WP_0 (bk_{\text{чист}})$$

где W – оператор, учитывающий характеристики распространения и отражения лазерного сигнала P_0 в определенных погодных условиях на трассе R_i от вешки до лазерного излучателя.

При использовании системы сканирования с многоэлементным фотоприемным устройством уровень снега будет равен:

$$H_{i\text{сн}} = k - k_{\text{чист}}$$

При этом точность измерения уровня снега будет зависеть от соотношения количества отражателей k к высоте F . Чем больше это соотношение, тем выше точность определения уровня снега.

Средний уровень снега в локальной зоне S будет составлять:

$$H_{сн} = (1/N) \sum H_{iсн}$$

Оперативное размещение вешек в зоне и затем лазерный мониторинг могут производиться с использованием БПЛА, как это показано на рис. 1.

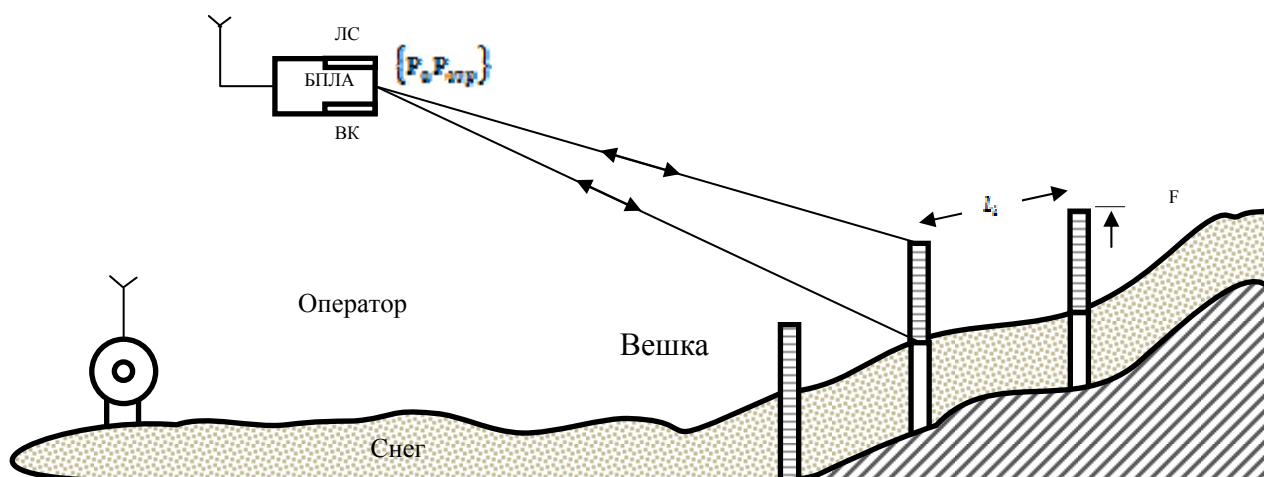


Рис. 1. Лазерный мониторинг уровня снега с БПЛА:

ЛС – лазерный сканатор; ВК – видеокамера

При этом мониторинг может идти, как по видеоканалу оператором путем считывания отметок с вешек, так и путем лазерного сканирования зоны с вешками и накоплением данных в памяти сканатора, либо с передачей данных оператору по беспроводному каналу связи. При необходимости, для подсветки вешек, БПЛА может быть оснащен управляемым отражателем лазерного луча от излучателя, находящегося у оператора. Лазерный приемник может располагаться на БПЛА.

Вполне очевидно, что такой метод дает возможность оценивать средний уровень снега в труднодоступных местах и, например, в лавиноопасных местах в горной местности.

Для уточнения требований к лазерным устройствам мониторинга уровня снега и интенсивности таяния снегов на территории обсерватории «Кайтанак» в августе 2017 г. был установлен испытательный стенд, состоящий из 9 вешек с сегментированными отражателями для проведения контроля в зоне 40 м, а также сегментированный отражатель повышенной площади для контроля в зоне 1600 м. С помощью лазерной аппаратуры «STABILA» в зоне 40 м была выставлена с точностью до 1 см лазерная плоскость параллельно земле с неровным рельефом, и относительно плоскости были размещены вешки с сегментированными отражателями, что позволило оценивать уровень снега данным методом на неровном рельефе. Контроль уровня снега производится

как визуально, так и с помощью цифровых фотографий и лазерного фотоприемника, построенного на базе многоэлементного фотоприемного устройства S11638 японской компании «Hamamatsu». Снятие данных с фотоприемника и передача их в персональный компьютер производились при помощи разработанного блока управления фотолинейкой. На персональном компьютере была запущена управляющая программа, при помощи которой производилось построение теневой диаграммы фотолинейки и велась непрерывная запись данных в файл.

Основные технические характеристики лазерного фотоприемника:

- 1) напряжение питания, В – 5;
- 2) общий потребляемый ток, мА – 80;
- 3) частота опроса фотолинейки, Гц – 4800;
- 4) количество фотоэлементов – 2048;
- 5) размер одного фотоэлемента, мкм – 14×42 .

В качестве БИ использовался полупроводниковый лазер АТС8000 со схемой накачки, обладающей следующими параметрами:

- 1) напряжение питания, В – 12;
- 2) потребляемый средний ток, мА – 200;
- 3) длительность излучаемых импульсов, мкс – 50;
- 4) частота излучаемых импульсов, Гц – 1000;
- 5) импульсный ток лазера, А – 7,8.

Испытания такого приемника на обсерватории «Кайтанак» в 2016 г. показали возможность оценивать размеры объектов на расстоянии 40 м с точностью около 1 мм.

Схема расположения вешек с сегментированными отражателями в области 40 м показана на рис. 2. Все вешки ориентированы сегментированными отражателями на максимальное отражение лазерного луча подсветки сканатора.

На рис. 3 изображены сегментированные отражатели, которые используются для измерения уровня снега на полигоне в зоне 40 м (а) и для экспериментальной оценки энергетики мониторинга на расстоянии 1 600 м (б).

Суммарная площадь отражателя, предназначенного для работы на 1600 м, составила около 450 см^2 , отношение размера отражателя к длине трассы составило $1,875 \cdot 10^{-4}$, угол наклона трассы $3,6^\circ$.

Функциональная схема определения разрешающей способности для данной трассы изображена на рис. 4.

При такой схеме, зная, что фокусное расстояние телескопа ТАЛ1-М составляет 808 мм, получаем, что угол поля зрения будет равен $1,02^\circ$.

На расстоянии 1600 м, характерный размер зоны сканирования будет составлять:

$$X = 2 \times L \times \operatorname{tg}(\alpha) = 2 \times 1600 \times \operatorname{tg}(1,02) = 56 \text{ м}$$

Тогда разрешающая способность такой системы окажется равной 27 мм.

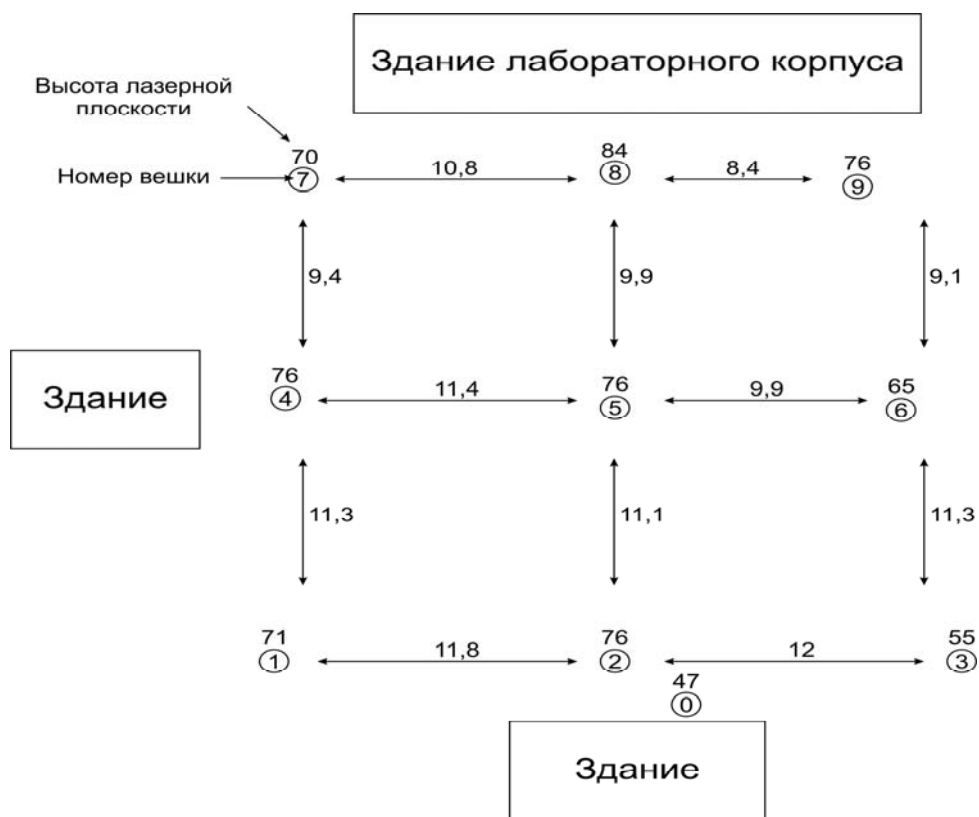


Рис. 2. Схема расположения вешек на полигоне «Кайтанак» для контроля зоны 40 м

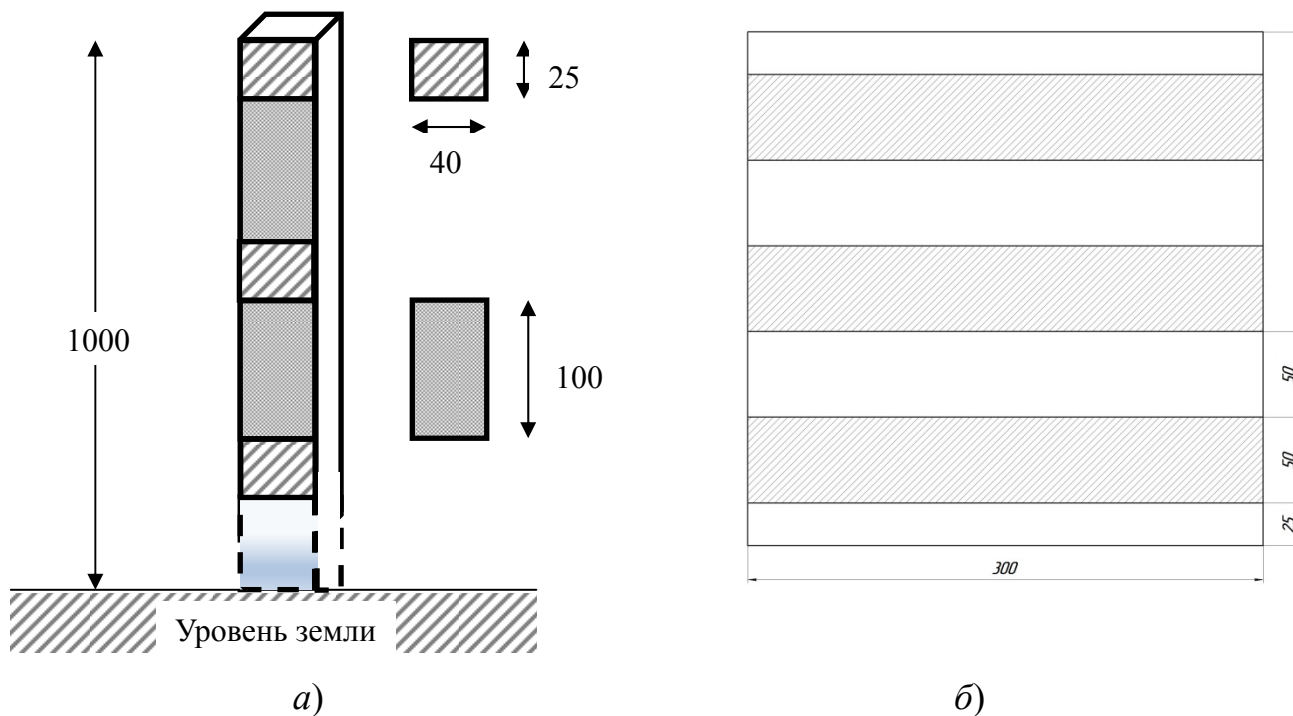


Рис. 3. Сегментированные отражатели:

а) для контроля уровня снега в зоне 40 м; б) для экспериментальной оценки энергетики мониторинга на расстоянии 1 600 м

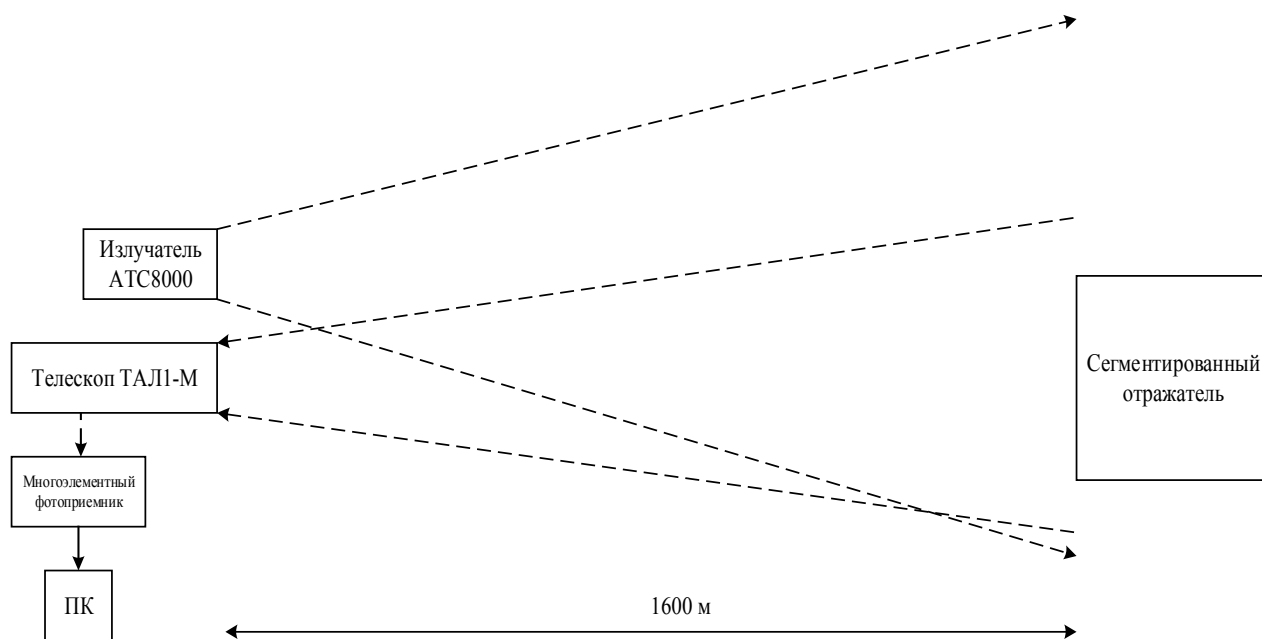


Рис. 4. Функциональная схема определения разрешающей способности фотоприемника для трассы 1600 м

Заключение

Таким образом, показано, что использование разработанного многоэлементного фотоприемника, позволяет достичь разрешающей способности в несколько десятков миллиметров на трассах длиной вплоть до нескольких километров.

Данное техническое решение может использоваться для дистанционного мониторинга уровня снега в труднодоступных местах, в лавиноопасных областях и в зонах оползней. Результаты измерений, могут быть использованы для создания методов прогнозирования паводковой ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимир В. А., Козубай М. П., Прокошев В. Г. и др. Прогнозирование уровня весенних паводков и мониторинг зон затопления на основе ГИС-технологий и систем искусственного интеллекта (ЦСИ ГЗ МЧС) // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 519–540.
2. Ромасько В. Ю., Бураков Д. А. Мониторинг снежного покрова речных бассейнов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 6. – С. 704–713.
3. Кураков С. А. Пат. 2617146 Российская Федерация, МПК G01W1/14. Датчик уровня высоты снежного покрова для оценки лавинной опасности; патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН). – № 2015144845; заявл. 19.10.2015; опубл. 21.04.2017, Бюл. № 12.

REFERENCES

1. Vladimirov, V. A., Kozubay, M. P., Prokoshev, V. G., et al. (2012). Prognostication the level of spring floods and monitoring flood zones based on GIS-technologies and artificial Intelligence systems. *Strategiya grajdanskoi zachshity: problemy i issledovaniya* [Civil Defense Strategy: Problems and Research], 2(2), 519–540 [in Russian].
2. Romasko, V. U., & Burakov, D. A. (2017). Monitoring of the snow cover of river basins. *Jurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii* [Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology], 10(6), 704–713 [in Russian].
3. Kurakov, S. A. (2017). Patent RF No 2617146. Tomsk: IP Russian Federation.

© *А. В. Бритвин, А. В. Поважаев, Н. С. Никитенко, Б. В. Поллер, 2018*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АЗОТНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ОБРАЗОВАННОЙ В РЕЗОНАТОРАХ С МОДАМИ H_{10} И H_{011}

Олег Владимирович Пелипасов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (383)330-22-52, e-mail: pelipasov@gmail.com

Олег Владимирович Комин

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (383)330-22-52, e-mail: kominoleg97@mail.ru

В статье приводятся результаты определения температуры азотной микроволновой плазмы атмосферного давления методом относительных интенсивностей спектральных линий для двух типов СВЧ резонаторов: для прямоугольного резонатора с модой H_{10} и цилиндрического резонатора с модой H_{011} . Микроволновая азотная плазма, возбуждаемая в резонаторах СВЧ полем с частотой 2,5 ГГц, находится в состоянии локального термодинамического равновесия. Приведено сравнение полученных результатов с другими источниками возбуждения спектров: ICP, MWP, TIA.

Ключевые слова: температура плазмы, атомно-эмиссионный спектральный анализ, микроволновая плазма, индуктивно-связанная плазма, источник возбуждения спектров, локальное термодинамическое равновесие.

DETERMINATION OF ATMOSPHERIC PRESSURE NITROGEN MICROWAVE PLASMA TEMPERATURE IN H_{10} AND H_{011} RESONATORS

Oleg V. Pelipasov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer; LLC «VMK-Optoelektronika» 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)330-22-52, e-mail: pelipasov@gmail.com

Oleg V. Komin

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student; Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)330-22-52 e-mail: kominoleg97@mail.ru

The results of the temperature determination of the atmospheric pressure nitrogen plasma by the method of relative intensities of spectral lines for two types of microwave resonators (in a rectangular resonator with the mode H_{10} and a cylindrical resonator with the mode H_{011}) are presented. The microwave nitrogen plasma excited in resonators by a microwave field with a frequency of 2.5 GHz is in a state of local thermodynamic equilibrium. Comparison of the results with other sources of spectra excitation (ICP, MWP, TIA) is given.

Key words: plasma temperature, atomic emission spectral analysis, microwave plasma, inductively coupled plasma, source of spectra excitation, local thermodynamic equilibrium.

Введение

В течение многих лет наблюдается постоянный интерес к микроволновой плазме (МП), работающей на частоте 2,5 ГГц, как к источнику возбуждения спектров эмиссии растворов. Существующие конструкции источников возбуждения спектров с использованием микроволновой плазмы на сегодняшний день уступают по своим аналитическим характеристикам источникам с индуктивно-связанной плазмой ввиду меньшей температуры плазмы и высоких матричных эффектов [1]. При разработке новых типов источников возбуждения спектров с использованием МП необходимо знать некоторые параметры плазмы, к которым относятся ее объем, пространственное распределение температуры и концентрация электронов. Известно, что проводимость плазмы связана с ее температурой [2], следовательно, зная температуру плазмы и ее распределение можно решить задачу расчета и конструирования источника МП с «оптимальными» параметрами для возбуждения растворов разного состава, которые изложены в работе [3].

Эксперименты

Спектроскопические методы позволяют измерять температуру плазмы [4], концентрацию электронов [5], пространственное распределение плазмы в объеме и определять ее химический состав [6].

Измерив интенсивность линии и зная вероятность перехода или силу осциллятора, можно определить температуру электронов по методу относительных интенсивностей линий, сравнивая между собой интенсивности двух или более числа линий, принадлежащим одному сорту атомов [7–9]:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{g_2}{g_1} \frac{f_2}{f_1} \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT_e}\right), \quad (1)$$

здесь I – измеренная интенсивность спектральной линии, g – статистический вес уровня, f – сила осциллятора, ω – частота перехода, ΔE – разность энергий возбуждения исследуемых линий, k – постоянная Больцмана T_e – температура электронов. Недостатком этого метода является то, что случайная погрешность измерения интенсивности одной из линий приводит к грубым ошибкам определения температуры, а также отсутствует контроль за выполнением больцмановского распределения атомов по возбужденным уровням (локальное термодинамическое равновесие), что является главным условием применимости метода. Для контроля выполнения условия существования локального термодинамического равновесия (ЛТР) [10] в плазме строили график зависимости $\log(\Lambda^3/gf)$ от E для каждого источника возбуждения спектров и затем использовали метод относительных интенсивностей для оперативного контроля изменения температуры в зависимости от рабочих условий эксперимента.

Свет от микроволновой плазмы фокусировался на входной щели полихроматора «Гранд» [11] с дифракционной решеткой 2400 шт/мм с помощью однолинзовой схемы освещения с $f = 110$ мм с проекцией изображения 1:1. Полихроматор имеет разрешение 0,012 нм в области 190–350 нм. Регистрация спектра осуществлялась многоканальным фотодетектором [12]. Для создания и поддержания МП использовали стандартную горелку от ИСП спектрометра ML128050 компании Meinhard, а для создания и введения мелкодисперсного аэрозоля – однопроходную распылительную камеру ML180021 и концентрический распылитель TR-30-A1. Поджиг плазмы осуществлялся при введении через промежуточный канал горелки аргона с помощью высоковольтной искры, после чего в горелку подавался азот. Конструкция микроволнового плазмотрона с модой H_{10} приведена в работах [13–15]. Отметим, что в резонаторе с модой H_{10} создается шнуорообразная форма плазмы (рис. 1, б) [16], обусловленная структурой поля. Для возбуждения моды H_{011} использовался цилиндрический резонатор, связанный с прямоугольным волноводом с модой H_{10} окном связи. Согласование волновода с резонатором осуществлялось с помощью трехшлейфового трансформатора полных сопротивлений и направленного ответвителя [17]. Конфигурация электромагнитного поля в таком резонаторе позволяет возбуждать плазму цилиндрической формы (рис. 1, в), которая требуется для достижения требуемых аналитических характеристик, например, низких пределов обнаружения элементов. Параметры источников возбуждения спектров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры источников возбуждения спектров,
используемых в эксперименте

	МП H_{10}	МП H_{011}
Мощность, Вт	1000	1000
Поток газа азот, л/мин		
– охлаждающий	18	9
– промежуточный	0,2	0,2
– распылителя	1,2	0,6
Обзор плазмы	Аксиальный	
Скорость перистальтический насоса	10 об/мин	
Туманная камера	Стеклянная однопроходная	
Распылитель	Концентрический 1мл/мин при 350 кПа	
Время измерения спектра	10 сек	
Время стабилизации плазмы до измерения	10 минут	

На рис. 1 представлены фотографии аксиального (осевого) и радиального обзора аргоновой ИСП плазмы – рис. 1, *а*, азотной микроволновой плазмы в резонаторе с модой H_{10} – рис. 1, *б* и микроволновой плазмы в резонаторе с модой H_{011} – рис. 1, *в*, сделанные фотоаппаратом Olympus E-520. На фотографии видно отличие плазмы, получаемой в резонаторе H_{10} от традиционного источника аргоновой ИСП [18] плазмы и сходство плазмы, получаемой в резонаторе H_{011} с ИСП.

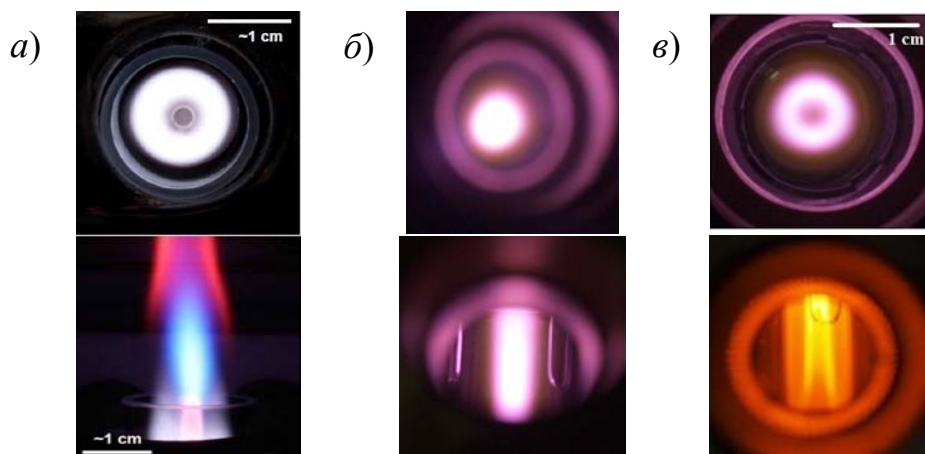


Рис. 1. Фотографии аксиального (верхний ряд) и радиального обзора (нижний ряд) аргоновой ИСП плазмы (*а*), азотной МП в резонаторе с модой H_{10} (*б*) и МП в резонаторе с модой H_{011} (*в*)

Обсуждение

Определение температуры плазмы проводилось по группам линий $Ni(I)$ и $Co(I)$. Значения вероятностей переходов и силы осцилляторов взяты в [10]. На рис. 2 показан график зависимости $\log(\Lambda^3/gf)$ от E для группы линий $Ni(I)$, измеренных для варианта микроволновой плазмы H_{011} (рис. 2, *а*), и для группы линий $Co(I)$ для варианта микроволновой плазмы H_{10} (рис. 2, *б*). Из графиков видно, что условие ЛТР в плазме обоих источников выполняется, следовательно, можно говорить о применимости метода определения температуры плазмы по относительным интенсивностям спектральных линий.

Распределение температуры плазмы перпендикулярно оптической оси спектрометра измерялось в диапазоне ± 2 мм (рис. 3) по паре линий для Ni $\lambda_1 = 231,10$ нм и $\lambda_2 = 344,62$ нм, а для Co $\lambda_1 = 240,725$ нм и $\lambda_2 = 345,35$ нм. Отметим, что погрешность измерений температуры составила ± 120 К при использовании как пары линий Ni , так и Co . Для резонатора H_{10} наблюдается неравномерный нагрев пробы с пиком в самом ее центре, где температура достигает около 5200 К. При смещении от центра плазмы температура падает до 4500 К с одной стороны и 3800 К с другой. Неравномерный нагрев вызван несимметричным поглощением электромагнитной волны в прямоугольном волноводе и снижением концентрации пробы к периферии плазмы. Отметим, что сама плазма имеет диаметр около 5 мм.

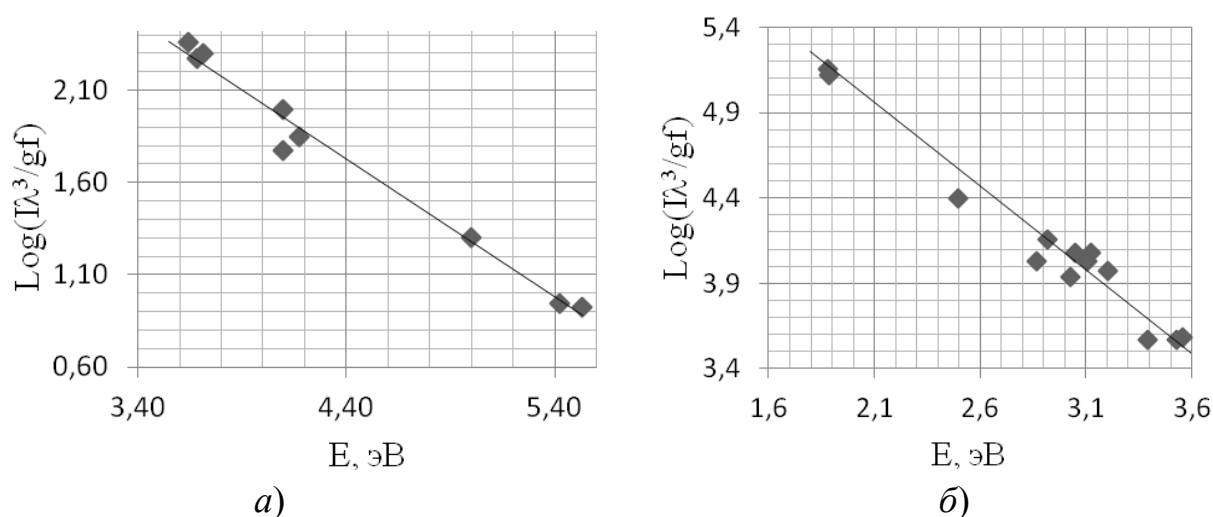


Рис. 2. Зависимость $\log(\Lambda^3/gf)$ от E :

- а) для спектральных линий атомов Ni(I), полученных из спектра плазмы H_{011} ,
 б) для спектральных линий атомов Co(I), полученных из спектра плазмы H_{10}

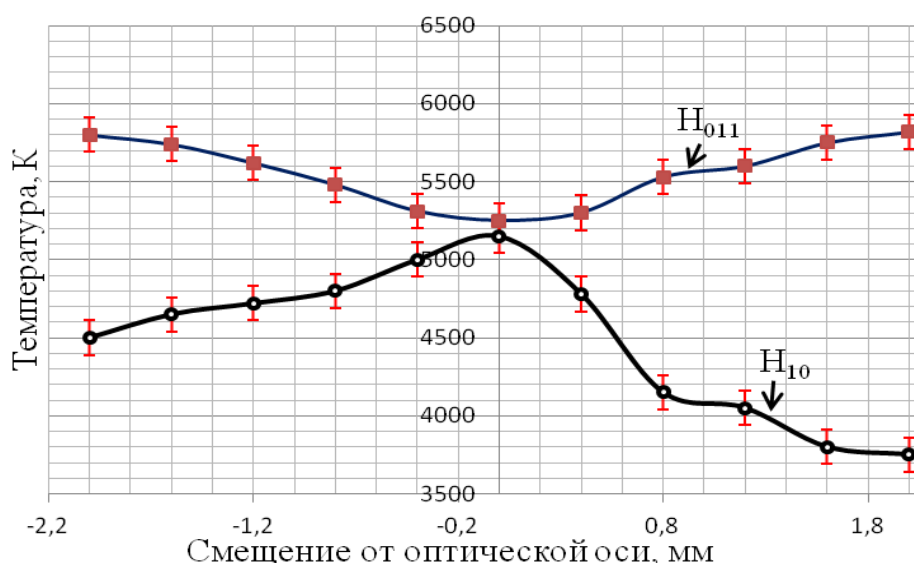


Рис. 3. Распределение температуры микроволновой плазмы для источников возбуждения H_{10} и H_{011}

Для плазмы в резонаторе H_{011} характерно симметричное распределение температуры, вызванное симметричным нагревом (рис. 1, в и рис. 3). В центре плазмы температура достигает 5300 К и растет до 5800 К периферии плазмы, где сигнал пробы падает до нуля, а сигнал фона плазмы растет. Высокая температура способствует смещению ионизационного равновесия в плазме в пользу возрастания концентрации ионов, что наблюдается и для ИСП плазмы.

Известно, что спектр ИСП плазмы, где температура в центре плазмы доходит до 8000 К [19], состоит в основном из сплошного фона и спектральных линий, принадлежащих ионам элементов таблицы Менделеева, тогда как спектры микроволновых источников возбуждения состоят из атомных линий и молекулярных полос, что свидетельствует о недостаточной энергии для ионизации атомов и диссоциации молекул.

При сравнении полученных значений температур МП с другими наиболее распространенными источниками возбуждения спектров (табл. 2) видно, что наиболее высокую температуру можно получить в резонаторе с модой H_{011} . МП в таком резонаторе имеет схожий с ИСП зоны нагрева плазмы и пробы, следовательно можно ожидать, что для этого типа плазмы матричные влияния будут ниже, чем для известных плазмотронов МП, но выше чем для ИСП.

Таблица 2

Сравнение температуры МП, получаемой
в разных конструкциях резонаторов с ИСП плазмой

	Температура, К	Мощность, Вт	Степень ионизации	Скин-слой, мм
ИСП [19]	5000-8000	600-1800	II	2
H_{10}	3800-5200	700-1000	I,II	н.д
H_{011}	5300-5800	700-1200	I,II	0,1
MWP [20]	2000-4000	200-1000	II	0,1
TIA [21]	1000-4000	300-2000	I	0,1

Заключение

Показана возможность определения температуры азотной микроволновой плазмы атмосферного давления, возбуждаемой в двух типах СВЧ резонаторов – прямоугольном с модой H_{10} и цилиндрическом с модой H_{011} , методом относительных интенсивностей спектральных линий с использованием модели локального термодинамического равновесия в плазме. Использование этого метода определения температуры позволило построить распределение зон нагрева плазмы и образца в двух случаях: с введением водного аэрозоля и без, что в дальнейшем поможет оптимизировать параметры резонатора, сократить его габариты и повысить КПД.

Показано, что нагрев плазмы в прямоугольном резонаторе H_{10} носит несимметричный характер ввиду распространяющихся в резонаторе бегущих волн и поглощению энергии плазмой преимущественно с одной стороны. Нагрев плазмы в резонаторе H_{011} происходит симметрично относительно центра плазмы из-за симметричной структуры поля H_{011} . Использование такого типа волны позволяет наращивать напряженность электрического поля в резонаторе и несколько повысить температуру плазмы.

Температура плазмы в резонаторе H_{011} является максимальной среди известных источников МП, применяемых в спектральном анализе, что должно снизить матричные эффекты и повысить аналитические характеристики метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hill Steve J. Inductively Coupled Plasma Spectrometry and its Applications – 2nd ed. – UK : Wiley-Blackwell, 2007. – 448 p.
2. Райзер Ю. П. Высокочастотный индукционный разряд высокого давления и безэлектродный плазмотрон // Успехи физических наук. – 1969. – № 99. – С. 687–712.
3. Чудинов Э. Г. Атомно-эмиссионный анализ с индукционной плазмой. Итоги науки и техники. Серия: Аналитическая химия. – М. : ВИНТИ, 1990, Т. 2. – 255 с.
4. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. Перевод с англ. под ред. С. Ю. Лукьянова. – М. : Мир, 1971. – 550 с.
5. Yubero C., García M. C., Calzada M. D. On the use of the $H\alpha$ spectral line to determine the electron density in a microwave (2.45GHz) plasma torch at atmospheric pressure // Spectrochimica Acta Part B. – 2006. – Vol. 61 (5). – P. 540–544.
6. Очкин. В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – М. : Физматлит, 2006. – 472 с.
7. Fundamental studies of an atmospheric-pressure microwave plasma sustained in nitrogen for atomic emission spectrometry / Nahid Chalyavi, Peter S. Doidge, Richard J. S. Morrison, B. Guthrie // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2017. – Vol. 32. – P. 1988–2002.
8. Ohata Masaki, Furuta Naoki. Spatial Characterization of Emission Intensities and Temperatures of a High Power Nitrogen Microwave-induced Plasma // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 1997. – Vol. 12. – P. 341–347.
9. Ogura K. Excitation Temperature in High-Power Nitrogen Microwave-Induced Plasma at Atmospheric Pressure // Journal of Applied Spectroscopy. – 1997. – Vol. 51 (10). – P. 1496–1499.
10. Corliss C. H., Bozman W. R. Experimental transition probabilities for spectral lines of seventy elements. – Washington : National Bureau of Standards, 1962. – 562 с.
11. Лабузов В. А., Гаранин В. Г., Зарубин И. А. Новые спектральные комплексы на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 1(II). – С. 15–20.
12. Лабузов В. А., Гаранин В. Г., Шелпакова И. Р. Многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров. Современное состояние и аналитические возможности // Журнал аналитической химии. – 2012. – Т. 67, № 7. – С. 697–707.
13. Pelipasov O. V., Labusov V. A. Measurement of microwave plasma parameters // Book of abstracts : ICPAT-9: 9th International Conference on Plasma Assisted Technologies. – 2014. – Vol. 1. – P. 20–22.
14. Разработка источника микроволновой плазмы для атомно-эмиссионного спектрального анализа растворов / А. Н. Путьмаков, О. В. Пелипасов, А. Ю. Максимов, В. М. Боровиков, К. Н. Чернов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 81, № 1(II). – С. 117–121.
15. Пелипасов О. В., Путьмаков А. Н., Чернов К. Н. и др. Спектрометр с источником микроволновой плазмы для одновременного многоэлементного атомно-эмиссионного анализа растворов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 1(II). – С. 108–114.
16. Jankowski Krzysztof J., Reszke Edward. Microwave Induced Plasma Analytical Spectrometry. – UK : RSC Analytical Spectroscopy, 2010. – 248 p.
17. Pozar D. M. Microwave Engineering. – 4th ed. – UK : Wiley-Blackwell, 2011. – 752 p.

18. New inductively coupled plasma for atomic spectrometry: the microwave-sustained, inductively coupled, atmospheric-pressure plasma (MICAP) / Andrew J. Schwartz, Yan Cheung, Jovan Jevtic and other // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. – 2016. – Vol. 31. – P. 440–449.
19. Furuta N. Spatial profile measurement of ionization and excitation temperatures in an inductively coupled plasma // *Spectrochimica Acta Part: Atomic Spectroscopy B*. – 1985. – Vol. 40 (8). – P. 1013–1022.
20. Jin Qinhan, Duan Yixiang, Olivares Jose A. Development and investigation of microwave plasma techniques in analytical atomic spectrometry // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 1997. – Vol. 52 (2). – P. 131–161.
21. Design and modelling of a modified 2.45 GHz coaxial plasma torch for atomic spectrometry / A. M. Bilgic, C. Prokisch, J. A. C. Broekaert, E. Voges // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 1998. – Vol. 53 (5). – P. 773–777.

REFERENCES

1. Hill, S. J. (2007). *Inductively Coupled Plasma Spectrometry and its Applications*. UK: Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9780470988794.
2. Raizer, Y. P. (1969). High-frequency induction discharge and electrodeless plasma torch. *Uspehi fizicheskikh nauk [Advances in Physical Sciences]*, 99, 687–712 [in Russian].
3. Chudinov, E. G. (1990). Atomno-jemissionnyj analiz s indukcionnoj plazmoj [Atomic emission analysis with induction plasma]. Moscow: VINITI, 2 [in Russian].
4. Lochte-Holtgreven, W. (1971). *Metody issledovaniya plazmy. Spektroskopija, lazery, zondy [Methods for investigating plasma. Spectroscopy, lasers, probes]*. Moscow: Mir [in Russian].
5. Yubero, C., García, M. C., & Calzada, M. D. (2006). On the use of the H α spectral line to determine the electron density in a microwave (2.45GHz) plasma torch at atmospheric pressure. *Spectrochimica Acta Part B*, 61(5), 540–544. doi:10.1016/j.sab.2006.03.011.
6. Ochkin, V. N. (2006). *Spektroskopija nizkotemperaturnoj plazmy [Spectroscopy of low-temperature plasma]*. Moscow: Physmathlit [in Russian].
7. Chalyavi, N., Doidge, P. S., Morrison, R. J. S., & Guthrie, B. (2017). Fundamental studies of an atmospheric-pressure microwave plasma sustained in nitrogen for atomic emission spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 32, 1988–2002. doi:10.1039/C7JA00159B.
8. Ohata, M., & Furuta, N. (1997). Spatial Characterization of Emission Intensities and Temperatures of a High Power Nitrogen Microwave-induced Plasma. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12, 341–347. doi:10.1039/A605930I.
9. Ogura, K. (1997). Excitation Temperature in High-Power Nitrogen Microwave-Induced Plasma at Atmospheric Pressure. *Journal of Applied Spectroscopy*, 51(10), 1496–1499. doi:10.1366/0003702971938984.
10. Corliss, C. H., & Bozman, W. R. (1962). *Experimental transition probabilities for spectral lines of seventy elements*. Washington: National Bureau of Standards.
11. Labusov, V. A., Garanin, V. G., & Zarubin, I. A. (2017). New Spectral Systems Based on MAES Analyzers. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov [Industrial Laboratory]*, 83(1-II), 15–20 [in Russian].
12. Labusov, V. A., Garanin, V. G., & Shelpakova, I. R. (2012). Multichannel analyzers of atomic emission spectra. Current state and analytical possibilities. *Zhurnal analiticheskoy himii [Analytical Chemistry]*, 67(7), 697–707 [in Russian].
13. Pelipasov, O. V., & Labusov V. A. (2014). Measurement of microwave plasma parameters. Book of abstracts: 9th International Conference on Plasma Assisted Technologies: Vol. 1. ICPAT-9] (p. 20–22). Saint-Peterburg.
14. Putmakov, A. N., Pelipasov, O. V., Maksimov, A. Y., Borovikov, V. M., & Chernov, K. N. (2016). Development of a source of microwave plasma for atomic emission spectral analysis of solutions. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory]*, 81(1), 117–121 [in Russian].

15. Pelipasov, O. V., Putmakov, A. N., Chernov, K. N., et al. (2017). A spectrometer with a source of microwave plasma for simultaneous multielement atomic emission analysis of solutions. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory], 83(1), 108–114 [in Russian].
16. Jankowski, K. J., & Reszke E. (2010). *Microwave Induced Plasma Analytical Spectrometry*. UK: Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/9781849732147.
17. Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering*. UK: John Wiley & Sons.
18. Schwartz, A. J., Cheung, Y., Jevtic, J., et al. (2016). New inductively coupled plasma for atomic spectrometry: the microwave-sustained, inductively coupled, atmospheric-pressure plasma (MICAP). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31, 440–449. doi:10.1039/C5JA00418G.
19. Furuta, N. (1985). Spatial profile measurement of ionization and excitation temperatures in an inductively coupled plasma. *Spectrochimica Acta Part B*, 40(8), 1013–1022. doi:10.1016/0584-8547(85)80045-8.
20. Jin, Q., Duan, Y., & Olivares, J. A. (1997). Development and investigation of microwave plasma techniques in analytical atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 52(2), 131–161. doi:10.1016/S0584-8547(96)01553-4.
21. Bilgic, A. M., Prokisch, C., Broekaert, J. A. C., & Voges, E. (1998). Design and modeling of a modified 2.45 GHz coaxial plasma torch for atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 53(5), 773–777. doi:10.1016/S0584-8547(97)00126-2.

© О. В. Пелипасов, О. В. Комин, 2018

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВЕРДЕ ПРОЗРАЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Анатолий Иванович Пеньковский

АО «Швабе – Технологическая лаборатория», 420075, Россия, г. Казань, ул. Липатова, 37, начальник НПО-430, тел. (843)234-14-91, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Маргарита Васильевна Фаттахова

АО «Швабе – Технологическая лаборатория», 420075, Россия, г. Казань, ул. Липатова, 37, инженер-конструктор, аспирант КНИТУ КАИ им. А. Н. Туполева, тел. (843)234-14-91, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

В работе представлен поляризационный способ измерения постоянной Верде прозрачных веществ и прибор на его основе.

Ключевые слова: постоянная Верде, поляризационный прибор, оптическая активность, эффект Фарадея.

POLARIMETRIC METHOD OF VERDET CONSTANT OF TRANSPARENT SUBSTANCES MEASUREMENT

Anatoly I. Penkovsky

JSC Shvabe – Technological Laboratory, 37, Lipatov St., Kazan, 420075, Russia, Chief of CPD-430, phone: (843)234-14-91, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Margarita V. Fattakhova

JSC Shvabe – Technological Laboratory, 37, Lipatov St., Kazan, 420075, Russia, Engineer-designer, Ph. D. Student of KNRTU KAI named after A. N. Tupolev, phone: (843)234-14-91, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

The paper presents a polarimetric method intended for measuring the Verdet constant of transparent substances and the polarization device based of this method.

Key words: the Verdet constant, polarization device, optical activity, the Faraday effect.

Введение

Целью данной работы являются поиск и реализация нового способа измерения постоянной Верде прозрачных веществ, который отличался бы экспрессностью, а также разработка портативного устройства на основе этого метода, с малым потреблением энергии и одновременно высокой точностью измерений.

Величина, характеризующая магнитное вращение плоскости поляризации света в веществе, называется постоянной Верде или удельным магнитным вращением. Она не одинакова для разных оптических материалов и невелика. Поэтому требуются сильные поля, чтобы эффект был значителен. Обычно в качестве вращающего вещества используют специальные сорта стекла (например,

тяжелый флинт). Постоянная Верде зависит от длины волны исследуемого света, поэтому для количественных измерений нужно монохроматизировать излучение источника с помощью какого-нибудь фильтра [1]. По найденной величине постоянной Верде V можно идентифицировать анализируемое вещество или найти концентрацию растворенного вещества в растворителе, если заведомо известна разница постоянной Верде растворителя и растворенного вещества. Так можно определить, например, долю ароматических составляющих в светлых нефтепродуктах.

Таким образом, измерение постоянной Верде (удельного магнитного вращения) V является такой же важной и актуальной задачей, как и измерение удельного вращения плоскости поляризации света $[\alpha]_D$ оптически активных веществ [2].

Визуальные полярископы являются грубыми приборами: погрешность измерения угла α находится в пределах от $\pm 0,05^\circ$ до $\pm 0,5^\circ$. Существует множество фотоэлектрических поляриметров, с помощью которых можно измерять угол поворота плоскости поляризации α с погрешностью всего $\pm 0,001^\circ$ [3]. Так, например, известен фотоэлектрический метод и прибор для измерения постоянной Верде стекла и кристаллов [4].

Некоторые оптические методы измерения постоянной Верде были представлены в литературе, например, объединенное измерение переменного и постоянного тока с использованием небольшого по величине переменного магнитного поля и синхронизирующего усилителя, пошаговый поляризационный метод и фазосдвигающая интерферометрия, фазочувствительная низкокогерентная интерферометрия и анализ параметров Стокса и т. д. [5-10].

Вещество, помещенное в продольное магнитное поле, поворачивает плоскость поляризации света, распространяющегося вдоль магнитного поля, на угол

$$\alpha = V \cdot H \cdot L \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

где V – постоянная Верде (удельное магнитное вращение) в [рад./э·см]; H – напряженность магнитного поля в эрстедах; L – длина пути света в веществе в [см]; β – угол между направлением лучей света и вектором напряженности магнитного поля.

Из уравнения (1) видно, что если производить измерения угла α поворота плоскости поляризации света, прошедшего известный путь L в прозрачном веществе при известных значениях напряженности магнитного поля H и угла β , то можно найти величину постоянной Верде по формуле

$$V = \alpha / (H \cdot L \cdot \cos \beta) = \alpha / M, \quad (2)$$

где α – угол поворота плоскости поляризации света веществом; $M = H \cdot L \cdot \cos \beta$ – конструктивный коэффициент, характеризующий воздействие магнитного поля H на вещество при длине пути света L в веществе и при угле β .

Методы и материалы

В работе по поиску и реализации нового экспрессного способа измерения постоянной Верде прозрачных веществ были использованы методы теоретического моделирования и макетного проектирования, включающего разработку конструкции портативного поляриметра, трассировку печатных плат, программирование контроллера. Для реализации задач настоящего исследования были применены следующие оптические материалы: призма Волластона, поляризационные пластины.

Описание поляризационного устройства

Предлагаемый поляриметр содержит источник монохроматического коллимированного пучка света и установленные по ходу лучей первый линейный поляризатор, кювету с исследуемым веществом, второй линейный поляризатор, плоскость пропускания которого составляет угол $\pm 45^\circ$ по отношению к плоскости пропускания первого поляризатора, фотоприемники, усилители, электронный блок с вычислителем отношения разности сигналов фотоприемников к их сумме и индикатор результатов измерений.

В качестве первого линейного поляризатора установлена призма Волластона, пропускающая в горизонтальной плоскости отдельно два пучка света, плоскость поляризации одного пучка горизонтальна, а другого – вертикальна. Кювета с исследуемым веществом установлена в центре набора кольцеобразных постоянных магнитов с коаксиальным направлением вектора напряженности магнитного поля. После кюветы установлено зеркало нормально к осевой линии кюветы.

Падающие на зеркало лучи наклонены в вертикальной плоскости под углом не менее $\varepsilon = 0,5 \cdot \arctg(D/l)$, где D – диаметр пучка света; l – расстояние от призмы Волластона до зеркала.

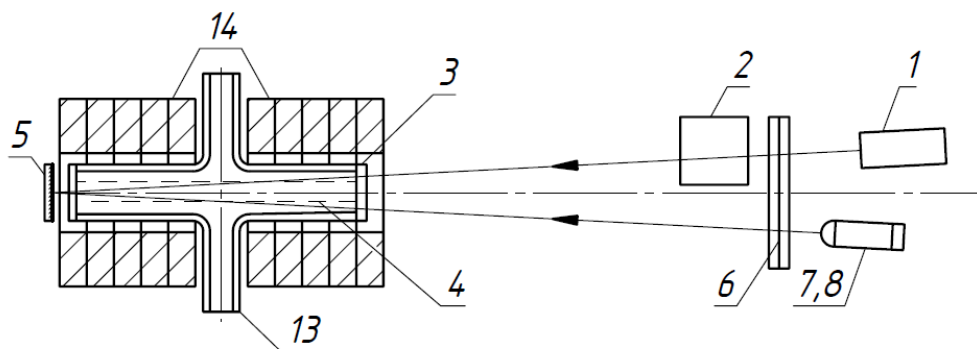
Второй простой линейный поляризатор установлен непосредственно перед фотоприемниками так, что одновременно он находится как в падающем на призму Волластона пучке света, так и в отраженных от зеркала и прошедших повторно через кювету двух пучках света.

На рисунке представлена структурная схема предлагаемого поляриметра для измерения постоянной Верде прозрачных веществ: а) вид сбоку; б) вид сверху.

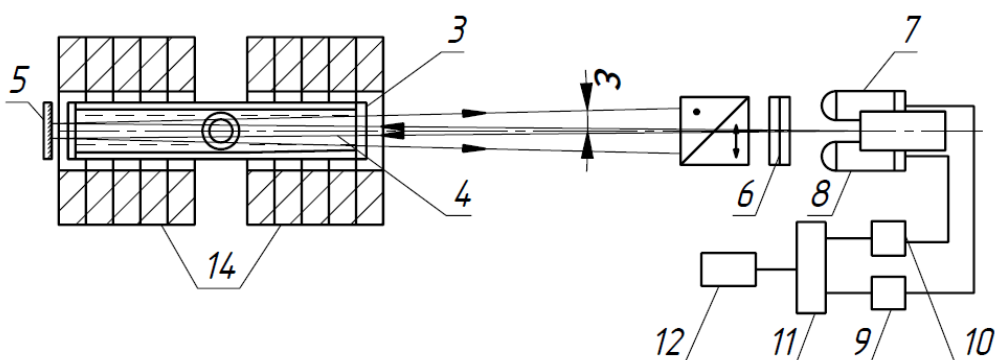
Предлагаемый поляриметр для измерения постоянной Верде прозрачных веществ работает следующим образом.

Монохроматический, коллимированный, частично поляризованный пучок света от полупроводникового лазерного модуля 1 проходит поляризатор 6, становится линейно поляризованным с азимутом поляризации $+45^\circ$ (или -45°), проходит призму Волластона 2, разделяется призмой в горизонтальной плоскости на два линейно поляризованных пучка света одинаковой интенсивности с взаимно ортогональными азимутами поляризации, которые проходят кюве-

ту 3 с исследуемым веществом 4, отражаются от зеркала 5 под углом ϵ в вертикальной плоскости, повторно проходят исследуемое вещество 4 и поляризатор 6, затем воспринимаются фотоприемниками 9.



а)



б)

Структурная схема поляриметра для измерения постоянной Верде прозрачных веществ, вид сбоку (а); вид сверху (б):

1 – источник монохроматического коллимированного пучка света; 2 – призма Волластона; 3 – кювета с исследуемым веществом; 4 – исследуемое вещество; 5 – зеркало; 6 – простой поляризатор; 7, 8 – два фотоприемника; 9, 10 – два линейных усилителя; 11 – электронный блок; 12 – индикатор результатов измерений; 13 – патрубки для подачи и эвакуации испытуемого вещества, 14 – набор постоянных магнитов

Под воздействием продольного магнитного поля набора постоянных магнитов 14 в кювете 3 длиной L с исследуемым веществом происходит эффект поворота плоскости поляризации линейно поляризованного света в каждом пучке на угол

$$\alpha = H \cdot V \cdot 2L, \quad (3)$$

где H – напряженность магнитного поля; V – постоянная Верде исследуемого вещества; $2L$ – путь, пройденный светом в исследуемом веществе в кювете длиной L .

Зависимость интенсивностей света I_1 и I_2 , воспринимаемых фотоприемниками 7 и 8, от угла поворота плоскости поляризации α исследуемым веществом можно найти по первому параметру вектора Стокса ($\vec{V}_s$) после перемножения матриц Мюллера, характеризующих воздействие каждого элемента оптики на поляризованный свет.

Фотоприемники воспринимают интенсивности света, характеризующиеся первым параметром вектора Стокса, то есть:

$$I_1 = 0,125 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma) \cdot (1 - \sin 4\alpha), \quad (4)$$

$$I_2 = 0,125 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma) \cdot (1 + \sin 4\alpha). \quad (5)$$

Разность интенсивностей света составит:

$$I_2 - I_1 = 0,25 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma) \cdot \sin 4\alpha. \quad (6)$$

Сумма интенсивностей света составит:

$$I_2 + I_1 = 0,25 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma). \quad (7)$$

Усилители 9 и 10 работают в линейном режиме, поэтому на их выходах потенциалы сигналов U_1 и U_2 пропорциональны интенсивностям света I_1 и I_2 .

В электронном блоке 11 вычисляется отношение разности к сумме этих сигналов по следующей формуле:

$$Q = (U_1 - U_2) / (U_1 + U_2) = (0,25 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma) \cdot \sin 4\alpha) / (0,25 \cdot I_0 \cdot (1 + p \cdot \cos 2\gamma)) = \sin 4\alpha \quad (8)$$

а также искомый угол поворота плоскости поляризации

$$\alpha = 0,25 \cdot \arcsin Q. \quad (9)$$

Электронный блок вычисляет постоянную Верде V согласно формуле (2) по найденному углу поворота плоскости поляризации α . Результат измерений постоянной Верде индицируется на четырехразрядном индикаторе в единицах измерений $[\text{минут/эрстед.см}] \cdot 10^4$. Результаты измерений постоянной Верде также могут быть представлены в относительных единицах.

Результаты

Благодаря тому, что после кюветы установлено зеркало, линейно поляризованные пучки света после призмы Волластона проходят исследуемое вещество дважды: в прямом и обратном направлениях. Такая конструкция предлагаемого поляриметра позволяет полностью нейтрализовать влияние естественной оптической активности на результаты измерений постоянной Верде при обрат-

ном ходе лучей, при этом позволяет удвоить оптическую активность, наведенную магнитным полем. Это одно из главных преимуществ предлагаемого устройства. Другим его существенным преимуществом является портативность и рекордно малое потребление энергии (не более 8 ВА). Использование набора мощных постоянных неодимовых магнитов позволило достичь напряженности продольного магнитного поля в кювете с веществом в несколько тысяч Гаусс без затраты электрической энергии.

Выводы

В результате проведенных исследований по поиску метода и устройства для измерения постоянной Верде прозрачных веществ был разработан поляриметр, который относится к большому классу поляризационных приборов, предназначенных для измерения угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего исследуемое прозрачное вещество с естественной оптической активностью, например, раствор сахара, или с наведенной оптической активностью, когда на изотропное вещество воздействуют продольным магнитным полем (эффект Фарадея) [1]. Прибор особенно удобен для определения ароматических составляющих в светлых нефтепродуктах, например, в моторных топливах, как в процессе контроля их качества в лабораториях, так и в технологическом процессе их изготовления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калитеевский Н. И. Волновая оптика : учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1995. – С. 161.
2. Волкова Е. А. Поляризационные измерения. – М. : Издательство стандартов, 1974. – С. 57.
3. Ванюрихин А. И., Герчановская В. П. Оптико-электронные, поляризационные устройства. – Киев : Техника, 1984. – С. 94–108.
4. Бужинский А. Н., Заводчиков Г. И., Клейман В. А. и др. Метод и прибор для измерения постоянной Верде прозрачных сред // Оптико-механическая промышленность. – 1971. – № 3. – С. 27–29.
5. Turvey K. Determination of Verdet constant from combined ac and dc measurements // Review of Scientific Instruments. – 1993 – Vol. 64 (6). – P. 1561–1568.
6. Wagreich R. B. and Davis C. C. Accurate magneto-optic sensitivity measurements of some diamagnetic glasses and ferrimagnetic bulk crystals using small applied AC magnetic fields // IEEE Transactions on Magnetism. – 1997 – Vol. 33 (3). – P. 2356–2361.
7. Flores J. L. and Ferrari J. A. Verdet constant dispersion measurement using polarization-stepping techniques // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47 (24). – P. 4396–4399.
8. Al-Qaisi M. K., Wang H., Akkin T. Measurement of Faraday rotation using phase-sensitive low-coherence interferometry // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48 (30). – P. 5829–5833.
9. Chang C. Y., Wang L., Shy J. T., Lin C. E., Chou C. Sensitive Faraday rotation measurement with auto-balanced photodetection // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82 (6). – P. 98–112.
10. Shaheen A., Majeed H., Anwar M. S. Ultralarge magneto-optic rotations and rotary dispersion in terbium gallium garnet single crystal // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54 (17). P. 5549–5554.

11. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. – М. : Наука, 1977. – С. 251.

REFERENCES

1. Kaliteevsky, N. I. (1995). *Volnovaya optika* [Wave optics]. Moscow: Visshaya Shkola [in Russian].
2. Volkova, E.A. (1974). *Polyarisacionniye izmereniya* [Polarization measurements]. Moscow: Izdatelstvo STANDART [in Russian].
3. Vanyurikhin, A. I., & Gerchanovskaya, V. P. (1984). *Optiko-elektronniye polyarisazionniye ustroystva* [Optoelectronic, polarization devices]. Kiev: Technika. [in Russian].
4. Buzhinsky, A. N., Zavodchikov, G. I., & Kleyman, V. A. (1971). The Method and instrument for measuring of the Verdet constant of transparent media. *Optiko-mehanicheskaja promyshlennost'* [Optical and Mechanical Industry], 3, 27–29 [in Russian].
5. Turvey, K. (1993). Determination of Verdet constant from combined ac and dc measurements. *Review of Scientific Instruments*, 64(6), 1561–1568.
6. Wagreich, R. B., & Davis, C. C. (1997). Accurate magneto-optic sensitivity measurements of some diamagnetic glasses and ferrimagnetic bulk crystals using small applied AC magnetic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33(3), 2356–2361.
7. Flores, J. L., & Ferrari, J. A. (2008). Verdet constant dispersion measurement using polarization-stepping techniques. *Applied Optics*, 47(24), 4396–4399.
8. Al-Qaisi, M. K., Wang, H., & Akkin, T. (2009). Measurement of Faraday rotation using phase-sensitive low-coherence interferometry. *Applied Optics*, 48(30), 5829–5833.
9. Chang, C. Y., Wang, L., Shy, J. T., Lin, C. E., & Chou, C. (2011). Sensitive Faraday rotation measurement with auto-balanced photodetection. *Review of Scientific Instruments*, 82(6), 98–112.
10. Shaheen, A., Majeed, H., & Anwar, M. S. (2015). Ultralarge magneto-optic rotations and rotary dispersion in terbium gallium garnet single crystal. *Applied Optics*, 54(17), 5549–5554.
11. Sena, L. A. (1977). *Edinici fizicheskikh velechin i ih razmernosti* [Units of physical quantities and their dimensions]. Moscow: Nauka [in Russian].

© А. И. Пеньковский, М. В. Фаттахова, 2018

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЗС-МАТРИЦ В СОСТАВЕ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Александр Андреевич Голицын

Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, старший инженер-электроник, тел. (383)330-91-88; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, инженер, e-mail: aag-09@yandex.ru

Наталья Андреевна Сейфи

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант кафедры лазерных систем; Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, инженер, e-mail: natalia_nsk@inbox.ru

Описывается возможность применения ПЗС-матриц в составе активно-импульсных приборов наблюдения без использования в их конструкции электронно-оптического преобразователя. Реализация активно-импульсного метода достигается путем использования двухсекционной структуры ПЗС-матрицы со строчным переносом при особом управлении переносом накапливаемых зарядов.

Ключевые слова: активно-импульсное видение, ПЗС-матрица, прибор наблюдения.

THE USE OF CCD IMAGE SENSOR AS A COMPONENT OF A GATED-VIEWING DEVICE

Alexandr A. Golitsyn

Branch ISP SB RAS «TDIAM», 2/1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Electronic Engineer, phone: (383)330-91-88; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Engineer, e-mail: aag-09@yandex.ru

Natalya A. Seyfi

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, Department of Laser Systems; Branch ISP SB RAS «TDIAM», 2/1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: natalia_nsk@inbox.ru

The article describes the opportunity of CCD image sensor use as a component of a gated-viewing device without the application of an image intensifier. The implementation is achieved through the use of two-area structure of the interline transfer CCD with special operation of charges transferring.

Key words: gated viewing, CCD image sensor, surveillance device.

Активно-импульсными приборами наблюдения называются устройства, принцип действия которых основан на методе, предложенном академиком А. А. Лебедевым в 1936 г. [1], в зарубежной литературе называемом «метод стробирования» [2]. Суть метода заключается в том, что фотоприемник начинает получать изображение с некоторой задержкой относительно срабатывания

излучателя, благодаря чему воспринимает свет излучателя, отраженный только от интересующих оператора объектов, отсекая свет, отраженный от объектов, находящихся ближе заданного расстояния, например, от частиц пыли или тумана, расположенных между наблюдателем и интересующим наблюдателя объектом. Такой метод наблюдения применяется в системах дистанционного обнаружения оптических и оптико-электронных устройств, ведущих встречное наблюдение, и в приборах наблюдения в условиях ограниченной видимости [3, 4].

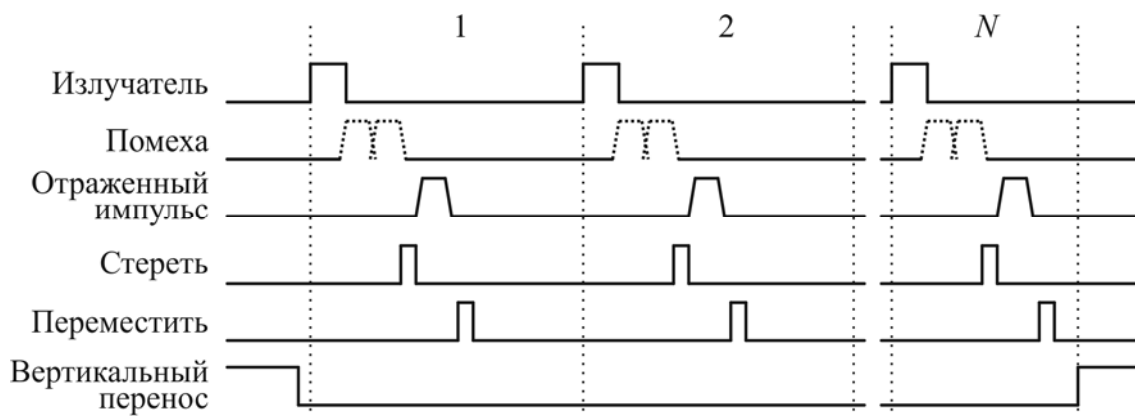
Традиционно в составе подобных приборов используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который выполняет функции быстродействующего затвора и одновременно является усилителем яркости. Вместе с тем существует несколько причин отказаться от использования затвора, реализованного на ЭОП. Среди них главной является необходимость уменьшения массы и габаритных размеров прибора наблюдения, что может быть достигнуто исключением из конструкции прибора как самого ЭОП, так и необходимой для его согласования с фотоприемником проекционной оптической системы. Другие причины – это необходимость увеличения разрешения наблюдаемого изображения, необходимость наблюдения цветного изображения и возможность снижения себестоимости прибора.

Как показано в работе [5], для реализации активно-импульсного видения может быть использована ПЗС-матрица со строчным переносом, управляемая недокументированным способом с учетом особенностей ее конструкции – наличия изолированной секции вертикального переноса зарядов. В работе [6] приведен пример практической реализации активно-импульсной системы без ЭОП на примере ПЗС-матрицы ICX618 производства Sony. Конструктивно ПЗС-матрицы со строчным переносом состоят из двух областей. Одна из них – область накопления, где осуществляется накапливание зарядов в каждом пикселе в моменты поступления света на поверхность фотоприемника. Вторая область – изолированная буферная область, в которой осуществляется перемещение зарядов вниз фотоприемника и на его выход. Эта область закрыта от поверхности и приходящий свет не влияет на заряды в ней. Обе области изолированы друг от друга и функционируют независимо. По завершению накопления зарядов в области накопления заряды из ее пикселей помещаются в соответствующие пиксели буферной области. С этого момента область накопления становится чистой, и в ней начинают накапливаться заряды нового кадра. В это же время происходит перемещение зарядов в буферной области к выходу фотоприемника путем подачи на управляющие входы соответствующей последовательности потенциалов. Этот процесс называется вертикальным переносом. Все заряды перемещаются одновременно, строка за строкой в горизонтальный регистр сдвига, откуда потом последовательно перемещаются на выходные цепи ПЗС-матрицы.

Ключевой особенностью ПЗС-матриц со строчным переносом является то, что заряды из области накопления перемещаются в буферную область одновременно и быстро, что позволяет во время медленного вертикального переноса зарядов в буферной области осуществлять накапливание нового кадра области

накопления. Управление временем экспозиции осуществляется путем подачи сигнала сброса на область накопления. При этом сигнал сброса никак не влияет на заряды, находящиеся в буферной области.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что управление ПЗС-матрицей со строчным переносом осуществляется таким образом, чтобы ее секция вертикального переноса использовалась не только для построочного перемещения зарядов, но и в качестве дополнительной накопительной секции. Синхронизация наблюдения откликов лазерного излучателя реализуется в секции накопления путем своевременной подачи сигналов стирания и перемещения зарядов в секцию вертикального переноса (см. рис. 1). Пользуясь тем, что секция вертикального переноса является изолированной, в ней осуществляется многократное накапливание отдельных кадров изображения, синхронизованных с лазерным излучателем. На выход ПЗС-матрицы выводится итоговый кадр, представляющий их сумму. На рис. 1 обозначены: Помеха – отражение импульса лазерного излучателя, от объектов, находящихся на расстоянии ближе заданного. Стереть – импульс обнуления секции накопления. Переместить – условный сигнал, по которому происходит перемещение зарядов из секции накопления в секцию вертикального переноса. При управлении реальной ПЗС-матрицей перенос зарядов из одной секции в другую осуществляется в момент подачи положительных потенциалов на соответствующие входы матрицы, определяемые производителем. Вертикальный перенос – условный сигнал, показывающий, осуществляется ли вертикальный перенос в данный момент времени или нет. Частота повторения импульсов и их длительности зависят от конкретного лазерного излучателя и от конкретного ПЗС-фотоприемника.



Многократная синхронизация ПЗС-матрицы с излучателем

Экспериментальная проверка работоспособности предложенного метода построения активно-импульсной системы на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом осуществлялась на стенде [7], который представляет собой три платы, закрепленные на жестком основании и соединенных между собой шлейфами. Одна плата аппаратно зависимая, на ней располагается ПЗС-матрица с со-

путствующими электронными компонентами. Вторая плата – аппаратно независимая плата управления на базе сигнального процессора и программируемой логической интегральной схемы, на основе которой реализован весь тракт получения и обработки изображения. На третьей плате располагается лазерный излучатель на основе импульсного полупроводникового лазера. Управление всей системой, а также вывод изображения для его анализа и наблюдения осуществлялся на персональный компьютер по шине HighSpeed USB 2.0 [8]. Способ проверялся на ПЗС-матрицах производства Sony ICX445ALA и ICX618ALA с прогрессивной разверткой и ПЗС-матрицах ICX279AL-E и ICX659ALA с чересстрочной разверткой. В качестве импульсного излучателя был использован полупроводниковый лазер с длиной волны 905 нм, выходной импульсной мощностью 200 Вт при длительности импульса 120...150 нс и частотой повторения импульсов 10...15 кГц.

Способность отсекал свет, отраженный от предметов, находящихся ближе заданного расстояния проверялась следующим образом. В качестве наблюдаемых объектов использовались катафоты, установленные на различных расстояниях от наблюдателя. При наблюдении поочередно устанавливались соответствующие значения минимального расстояния подсветки (времена задержки между срабатыванием излучателя и управляющими сигналами обнуления и считывания) и проверялось, перестанут ли давать блик наблюдаемые мишени, если задать большую дальность, чем расстояние, на котором они находятся от наблюдателя. Для наблюдений в условиях освещенности «солнечный день» на расстоянии 300 метров оказалось достаточно 15...20 импульсов лазерного излучателя, чтобы блики были различимы и не маскировались фоном. Для наблюдения бликов на расстоянии 800 метров в тех же условиях потребовалось 70...90 импульсов. При понижении окружающей освещенности, количество импульсов лазерного излучателя, необходимое для отчетливого наблюдения блика, уменьшается. Кадровая частота для всех ПЗС-матриц (ICX445 с целью увеличения кадровой частоты управлялась в режиме «центрального окна» с разрешением 1280×600 пикселей) составила не менее 25 Гц.

Таким образом, предложенный способ управления ПЗС-матрицей со строчным переносом, позволяет реализовать на ее основе метод стробирования. Экспериментально подтверждена практическая применимость предложенного способа. Данный метод позволяет исключить из конструкции активно-импульсных приборов наблюдения электронно-оптический преобразователь и тем самым уменьшить массу прибора, его габариты и стоимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Академик Александр Алексеевич Лебедев (к 70-летию со дня рождения) // Оптико-механическая промышленность. – 1963. – № 10. – С. 5–6.
2. Neumann D. B. Precision range gated imaging technique // Journal of the SMPTE. – 1965. – Vol. 74. – Pt. 1. – P. 313–319.
3. Голицын А. А., Сейфи Н. А. Активно-импульсные приборы обнаружения потенциальных угроз // Материалы XXIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. – Екатеринбург : АСФ России, 2017. – С. 263.

4. Кирпиченко Ю. Р., Курячий М. И., Пустынский И. Н. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 105–110.
5. Голицын А. А., Сейфи Н. А. Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприемника со строчным переносом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 1040–1047.
6. Голицын А. А., Сейфи Н. А. Реализация активно-импульсного режима на ПЗС-матрице // Прикладная физика. – 2018. – № 1. – С. 78–83.
7. Сейфи Н. А., Голицын А. А. Лабораторный стенд для исследования возможностей ПЗС-фотоприемника по использованию в составе активно-импульсного прибора наблюдения // Интерэкспо Гео-Сибирь-2016. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 105–107.
8. Голицын А. А. Программный комплекс для управления тепловизионными и многоканальными приборами наблюдения по шине USB 2.0 // Аprobация. – 2015. – № 11 (38). – С. 10–12.

REFERENCES

1. Academician Alexander Lebedev (on the occasion of his 70th birthday). (1963). Optiko-mekhanicheskaja promyshlennost' [Optical and Mechanical Industry], 10, 5–6 [in Russian].
2. Neumann, D. B. (1965). Precision range gated imaging technique. Journal of the SMPTE, 74, part 1, 313–319.
3. Golitsyn, A. A., & Seyfi, N. A. (2017). Gated-viewing devices for detecting of potential threats. In Materialy XXIII Vserossijskoj nauchnoj konferentsii studentov-fizikov i molodych uchenych [Proceedings of XXII Russian Scientific Conference of Students-Physicists and Young Scientists] (p. 263). Ekaterinburg: ASF [in Russian].
4. Kirpichenko, Yu. R., Kuryachy, M. I., & Pustynsky, I. N. (2012). Video information systems of supervision and control under difficult visibility conditions. Dolkady TUSUR [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2(26), part 1, 105–110 [in Russian].
5. Golitsyn, A. A., & Seyfi, N. A. (2017). Active-pulse observation method using CCD photodetector with interline transfer. Izvestiya vuzov. Pribirostroenie [Journal of Instrument Engineering], 60(11), 1040–1047 [in Russian]. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1040-1047.
6. Golitsyn, A. A., & Seyfi, N. A. (2018). The implementation of a gated viewing on the CCD matrix. Prikladnaja Fizika [Applied Physics], 1, 78–83 [in Russian].
7. Seyfi, N. A., & Golitsyn, A. A. (2016). Laboratory stand for research of features of the CCD-sensor for use in the composition of the active pulse surveillance device. In Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 5. SibOptika-2016 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 5. SibOptics-2016] (pp. 105–107). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
8. Golitsyn, A. A. (2015). Software for controlling a thermal and multispectral surveillance devices via USB 2.0. Aprobatsiya [Approbation], 11(38), 10–12 [in Russian].

© А. А. Голицын, Н. А. Сейфи, 2018

СИСТЕМА СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Захар Владимирович Семенов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (383)333-27-79, e-mail: zahar@vmk.ru

Владимир Александрович Лабусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, зав. лабораторией; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Игорь Александрович Зарубин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, тел. (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

Проведены исследования влияния параметров системы контроля и условий нанесения на погрешности измерения толщины контролируемого слоя многослойных покрытий путем компьютерного моделирования. Предложен метод контроля с предварительно нанесенным слоем, который позволяет на порядок снизить случайную погрешность определения толщины нанометровых стартовых слоев и в 2-3 раза для слоев TiO_2 и SiO_2 с физическими толщинами менее 140 нм и 230 нм соответственно. Спроектирована и создана система широкополосного контроля напыления многослойных оптических покрытий в реальном времени, поддерживающая работу методами прямого и непрямого контроля по дополнительным контрольным подложкам. На оборудованной системой контроля вакуумной установке получены различные спектральные фильтры (просветляющие покрытия, отрезающие фильтры, зеркала и другие).

Ключевые слова: многослойные покрытия, тонкие пленки, измерение толщины слоев, компьютерное моделирование, широкополосный контроль, не прямой контроль.

BROADBAND MONITORING SYSTEM FOR DEPOSITION OF MULTILAYER OPTICAL COATINGS

Zakhar V. Semenov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Academician Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)333-27-79, e-mail: zahar@vmk.ru

Vladimir A. Labusov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory; Novosibirsk State Technical University, 20, Prosp. K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Academician Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., phone: (383)333-27-79, e-mail: labusov@vmk.ru

Igor A. Zarubin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Academician Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., phone: (383)333-27-79, e-mail: zarubin@vmk.ru

The influence of the monitoring system parameters and deposition conditions on the measurement error of the monitored layer thickness of multilayer coatings by computer simulation is studied. A monitoring method with a preliminarily deposited layer is proposed that allows one to reduce the random error of thickness measurement for nanometer layers by 10 times and by 2-3 times for layers of TiO_2 and SiO_2 with physical thicknesses up to 140 nm and 230 nm respectively. A broadband in situ monitoring system for deposition of multilayer optical coatings that supports direct and indirect monitoring methods has been designed and created. Various spectral filters (anti-reflection coatings, edge filters, mirrors and others) were obtained on the vacuum system equipped with the monitoring system.

Key words: multilayer coatings, thin films, layer thickness measurement, computer simulation, broadband monitoring, indirect monitoring.

Введение

Нанесение многослойных диэлектрических покрытий осуществляют в вакуумной камере путем многократного последовательного напыления слоев из двух или более материалов с различными показателями преломления [1]. Примерами фильтров на основе таких покрытий являются: зеркала, просветляющие покрытия на одной длине волны или в широком спектральном диапазоне, светоделители, узкополосные и отрезающие фильтры, поляризационные фильтры [2] и другие [3, 4]. Для получения требуемого спектра отражения или пропускания покрытия часто необходимо наносить десятки слоев с характерными толщинами от единиц нм до нескольких мм с погрешностями толщин слоев порядка 1 нм и менее. При этом точность контроля толщины оказывает решающее влияние на качество получаемого спектрального фильтра [5, 6], что предъявляет высокие требования к системе контроля нанесения многослойных оптических покрытий.

Среди существующих методов контроля (визуальный [5, 7], по времени, контроль с помощью кварцевого датчика-резонатора [5, 8], оптические [9, 10] и комбинированные [11–13]) для большинства задач наиболее точными являются методы оптического (спектрального) контроля [5, 9, 10], так как в ходе процесса нанесения они измеряют реальную спектральную характеристику покрытия. Суть этих методов заключается в том, что на контрольную подложку с напыляемым покрытием падает излучение от источника, и прошедшее или отраженное от подложки излучение регистрируется и анализируется.

Методы оптического контроля могут быть классифицированы по используемой оптической схеме (контроль по спектрам отражения и пропускания), по области спектрального контроля (монохроматический и широкополосный) и способу контроля толщин (прямой и непрямой).

Наиболее универсальным методом контроля при создании оптических фильтров является метод непрямого контроля, который осуществляется по двум и более контрольным подложкам, на каждую из которых наносится соответствующий материал [14]. При этом методе погрешности измерения толщин слоев не зависят от оптической задачи, и можно измерять все слои многослойного покрытия с высокой фиксированной точностью. Другим важным преимуществом непрямого контроля является отсутствие кумулятивного эффекта накопления ошибок в толщинах слоев [15].

Широкополосный контроль благодаря большому количеству точек в измеряемых спектрах позволяет статистически снизить погрешности измерения толщин слоев, увеличить наглядность и достоверность контроля в сравнении с монохроматическим. Для метода непрямого контроля наименьшая погрешность достигается при контроле по спектрам отражения, поскольку в этом случае более эффективно используется динамический диапазон спектрометра и повышается отношение сигнал/шум в измеряемых спектрах. На основании данных рассуждений и классификации методов оптического контроля наиболее перспективным и точным представляется использование в системе контроля метода широкополосного непрямого контроля по спектрам отражения.

Появление доступных спектрометров с многоэлементными фотоприемниками дало возможность применять широкополосный контроль в лабораторных и промышленных установках нанесения многослойных диэлектрических покрытий. Рост вычислительных мощностей компьютерных систем в последние десятилетия не только позволил вести измерения спектров в широком спектральном диапазоне в реальном времени (десятки измерений в секунду), но и математически обсчитывать эти данные в процессе нанесения с целью определения толщины слоя и момента окончания нанесения. Современные системы широкополосного контроля позволяют существенно повысить качество создаваемых многослойных фильтров и решать новые оптические задачи.

Цель данной работы – теоретическое и экспериментальное исследование методов спектрального широкополосного контроля толщин многослойных оптических покрытий с автоматическим численным решением обратных задач многослойных покрытий. Под обратными задачами понимаются задачи нахождения толщин слоев многослойного покрытия на основании его спектров отражения и/или пропускания.

Компьютерное моделирование

Для нахождения оптимальных параметров системы контроля требовалось исследовать влияние различных характеристик системы контроля и других факторов на итоговые погрешности измерения толщин. Поскольку экспериментальное изменение на установке некоторых параметров является затруднительным или невозможным, то использовалось компьютерное моделирование. На основании априорных знаний из этой области были выявлены основные факторы, влияющие на качество получаемых спектральных фильтров: шумы линейки

фотодетекторов в спектрометре [16], спектральный диапазон широкополосного контроля, количество фотодетекторов в линейке спектрометра, погрешность калибровки спектрометра по длинам волн, дрейф интенсивности источника излучения, погрешности задания показателя преломления материалов (в виде систематического сдвига Δn).

Для моделирования работы системы контроля было разработано программное обеспечение (ПО) «Deposition Control Simulator» [17], работающее в соответствии с блок-схемой моделирования, представленной на рис. 1, где зеленым цветом отмечены входные параметры, а синим – выходной. Решение обратной задачи происходит с помощью библиотеки «OptiReOpt». Для исследования метода непрямого контроля достаточно рассмотреть один слой из одного материала на подложке.

При заданных значениях входных параметров проводятся многократные циклы моделирования, отличающиеся случайными реализациями шума. В приближении нормального распределения получаемой выборки погрешность определения толщины слоя можно разделить на две составляющие – систематическую и случайную погрешности (отклонение математического ожидания измеренной толщины слоя от реальной и среднее квадратическое отклонение результатов измерений соответственно).

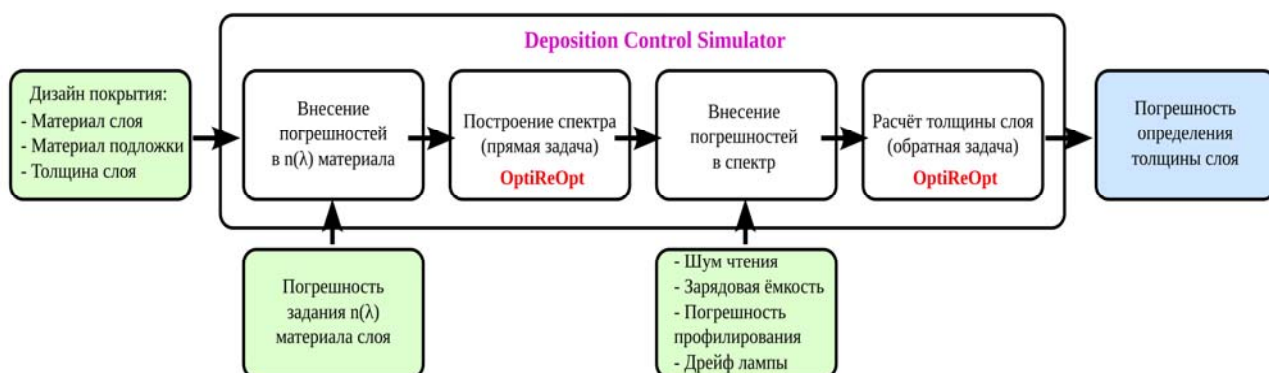


Рис. 1. Блок-схема моделирования системы контроля

В качестве характеристик спектрометра были взяты характеристики малогабаритного спектрометра «Колибри-2» [18] на основе линейки фотодетекторов БЛПП-369: спектральный диапазон контроля 500 – 1000 нм, количество фотоячеек в линейке 2612, погрешность профилирования 0,2 от шага размещения фотоячеек, зарядовая емкость фотоячейки 2 000 000 е, шум чтения 150 е [19]. В качестве характеристик модельного источника использовались характеристики источника Ocean Optics HL-2000-FHSA, на основе галогенной лампы с паспортным дрейфом менее 0,3 %/час [20], цветовой температурой 2800 К и выходной мощностью 6,7 мВт. Рассматривалась погрешность показателя преломления материала слоя 0 % и 0,5 % при смещении интенсивности источника излучения 0,2 %.

Индивидуальное влияние отдельных факторов на итоговую погрешность измерения толщины слоя изложено в [21]. Особый интерес представляет результат моделирования непрямого широкополосного контроля системы контроля с учетом всех рассматриваемых факторов. На рис. 2 представлены полученные зависимости погрешностей от толщины слоя для слоев TiO_2 и SiO_2 с толщинами 1 – 5000 нм. Систематические погрешности показаны графиками, а случайные – доверительными интервалами 3σ , в каждой точке графика проведено 100 циклов моделирования.

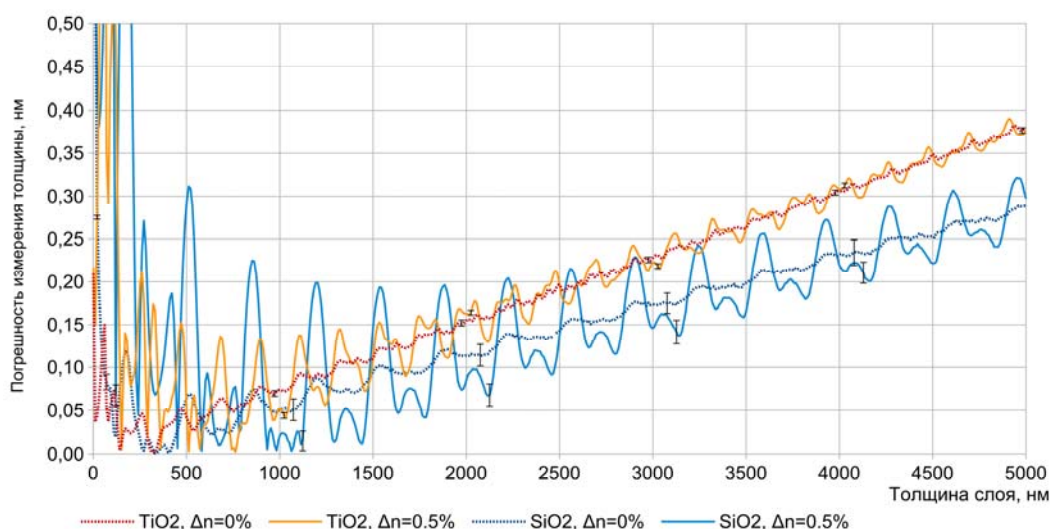


Рис. 2. Зависимость погрешностей измерения толщины слоя от его толщины

Погрешность показателя преломления и дрейф интенсивности источника излучения формируют определяющий вклад в общую погрешность измерения толщины слоя для толщин менее 1000 – 1500 нм. С ростом толщины слоя их вклад в погрешность уменьшается, а определяющую роль начинает играть погрешность профилирования, которая формирует зависимость близкую к линейной [21] (рис. 2). Из рис. 2 можно сделать вывод, что при погрешности задания показателя преломления материалов менее 0,5 % возможно получение погрешности измерения физической толщины, не превышающей 0,2 нм: для материала TiO_2 на подложке BK7 при толщине контролируемого слоя в диапазоне 300 – 2400 нм, для материала SiO_2 на подложке LASF-01 при толщине контролируемого слоя в диапазоне 800 – 2200 нм. На основании данного исследования удалось определить оптимальные толщины слоев для обоих материалов на соответствующих подложках и дать рекомендации для снижения погрешности измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого оптического контроля [21].

В ходе исследования было обнаружено, что погрешности нанесения достаточно тонких стартовых слоев, например, в единицы нанометров, могут быть

соизмеримыми с толщиной самого слоя, что неприемлемо (рис. 2). В ряде коммерческих решений данную проблему решают тем, что в ходе синтеза покрытия вручную исключают конфигурации покрытия с такими стартовыми слоями. Такое решение проблемы кажется неоптимальным поскольку, во-первых, оно ограничивает синтез покрытия, а во-вторых, как было показано в модельных экспериментах, уровень погрешности измерения стартовых слоев даже для «обычных» толщин, характерных для оптического интерференционного фильтра (~ 100 нм), выше в 2–3 раза, чем для других слоев. Для снижения погрешности оптического контроля нанесения стартовых слоев был предложен метод контроля с предварительно нанесенным слоем [22].

На рис. 3 представлено сравнение контроля в случае без и с применением предварительно нанесенного слоя (*а* и *б*, соответственно). Во втором случае на подложке 1 присутствует не только контролируемый слой 2, но и предварительно нанесенный слой 3. Благодаря предварительно нанесенному слою в получаемых коэффициентах отражения или пропускания присутствует экстремумы и точки перегиба (4 на рис. 3, *б*), и определение толщины наносимого слоя происходит с погрешностями аналогичными другим не стартовым и не тонким слоям. Рабочие подложки доступны для напыления на этапе нанесения тонкого слоя, но предварительно нанесенный слой на них отсутствует, и они имеют конфигурацию слоев, соответствующую расчетной.

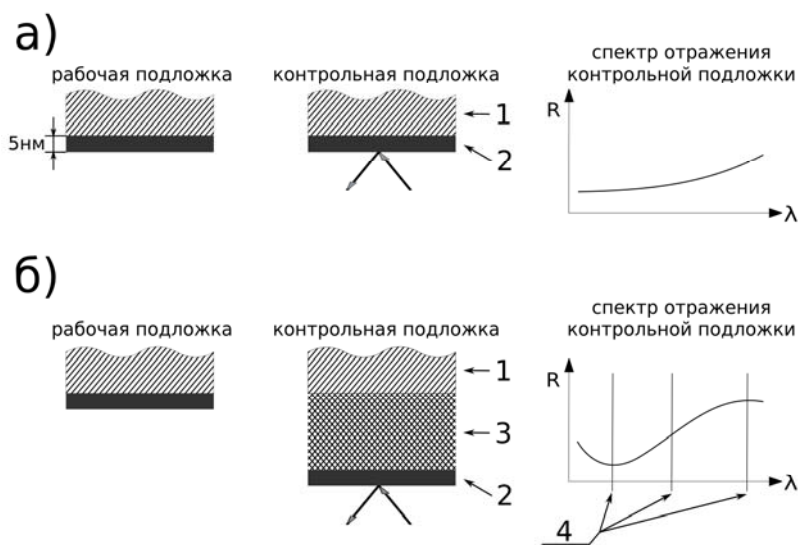


Рис. 3. Применение метода широкополосного контроля с предварительно нанесенным слоем для контроля нанесения слоя 5 нм:

1 – контрольная подложка, 2 – слой толщиной 5 нм; 3 – предварительно нанесенный слой, 4 – экстремумы и точки перегиба в спектре

В таблице представлены систематические и случайные погрешности измерения толщины слоя, полученные в случаях без и с использованием предварительно нанесенного слоя. Видно, что для всех толщин слоев и обоих рассмот-

ренных материалов произошло уменьшение погрешности измерения толщины слоя в 2 – 5 и более раз. В случае материала SiO_2 не прямой контроль стартового слоя толщиной 5 нм через математическую библиотеку «OptiReOpt» оказался фактически невозможен, однако применение предварительно нанесенного слоя позволяет очень точно контролировать такой слой.

Исследование показало, что применение данного метода оправдано и в случае обычных стартовых слоев оптических фильтров, поскольку существенное (в 2–3 раза) уменьшение погрешности измерения толщины слоя происходит для слоев с толщинами менее 140 нм из материала TiO_2 , и менее 230 нм для слоев из материала SiO_2 (например, 100 нм слой в таблице).

Систематические и случайные погрешности измерения толщин стартовых слоев в случае применения метода контроля с предварительно нанесенным слоем (данные моделирования)

Материал слоя и подложка	Физическая толщина слоя, нм	Погрешность измерения физ. толщины, нм			
		Метод непрямого контроля		Метод непрямого контроля с предв. нанес. слоем 1000 нм	
		систем.	случ., 3σ	систем.	случ., 3σ
TiO_2 на подложке BK7	5	0,10	0,008	0,051	0,007
	10	0,14	0,006	0,050	0,007
	50	0,88	0,009	0,061	0,006
	100	0,49	0,006	0,137	0,006
SiO_2 на подложке LASF-01	5	3,5	0,12	0,023	0,021
	10	0,59	0,075	0,024	0,020
	50	0,41	0,019	0,012	0,031
	100	0,91	0,033	0,024	0,024

Система спектрального контроля

Используя выбранный источник и детектор излучения, была разработана система контроля с оптической схемой, представленной на рис. 4. Излучение источника 1 вводится в волоконно-оптический кабель 2, изображение торца которого строится линзой 3 на контрольной подложке 8 внутри вакуумной камеры 6. Отраженное от подложки излучение с помощью линзы 12 и волоконного кабеля 13 подается на вход спектрометра 14. Линзы-ахроматы 3 и 12 и волоконно-оптические кабели 2 и 13 расположены в блоке коллиматоров 15. Ввод и вывод излучения системы контроля осуществлялся через окно 4. Держатель контрольных подложек 7, 8 и 9 обеспечивает их смену при проведении калибровки системы контроля и изменении материала очередного слоя. Материалы наносятся методом электронно-лучевого испарения из тиглей 5 и 11. Управление системой контроля и расчет толщины наносимого слоя осуществлялись с помощью разработанного программного обеспечения «LayerControl» [23], поддерживающего интеграцию с пакетом численного расчета «OptiLayer/OptiReOpt» [24].

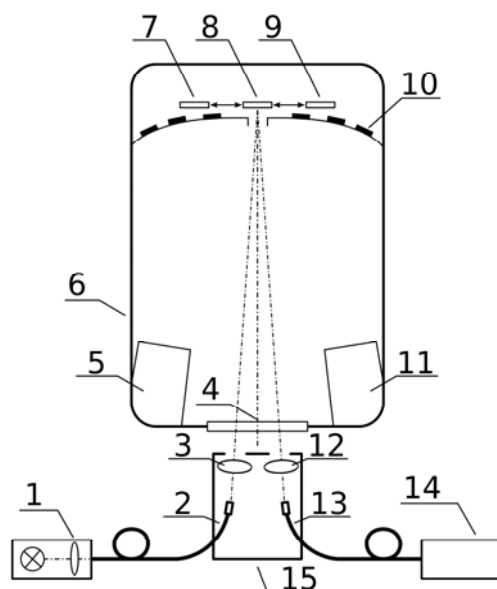


Рис. 4. Оптическая схема системы спектрального контроля:

1 – источник излучения; 2, 13 – волоконно-оптические кабели; 3, 12 – линзы; 4 – оптическое окно вакуумной камеры; 5, 11 – тигли с различными материалами; 6 – вакуумная камера; 7, 9 – скрытые от напыления дополнительные контрольные подложки; 8 – контрольная подложка доступная для напыления; 10 – рабочие подложки, на которые наносится целевое многослойное покрытие; 14 – спектрометр «Колибри-2»; 15 – блок коллиматоров

Система была установлена на модернизированную вакуумную установку для нанесения многослойных покрытий «ВУ-2М», расположенную в Институте лазерной физики (ИЛФ СО РАН) [25]. Для данной установки были получены следующие характеристики контроля: время измерения спектра отражения – от 8 мс и более, время измерения толщины текущего слоя – 0,5 – 1 с, случайная погрешность измерения толщины слоя – 0,02 нм, случайная погрешность напыления слоя – около 1,0 нм. Отметим, что полученная случайная погрешность измерения толщины слоя является величиной, усредненной по размеру светового пятна системы контроля (диаметр 6 мм).

Для демонстрации достоверности измерения коэффициентов отражения на разработанной системе контроля на рис. 5 приведено измерение коэффициента отражения многослойного высококачественного просветляющего покрытия (наиболее сложный случай) для диапазона длин волн 400 – 700 нм. Красному графику соответствует однократное измерение с помощью спектрометра системы контроля «Колибри-2» в реальном времени, а синему – с помощью стационарного спектрометра после извлечения покрытия из камеры. Даже при таких низких коэффициентах отражения (менее 0,3 % во всем диапазоне) и, соответственно максимальном относительном уровне шума, результаты измерения спектров системой контроля являлись достоверными и сопоставимыми с результатами измерения стационарным спектрометром вне установки с большими временами экспозиции.

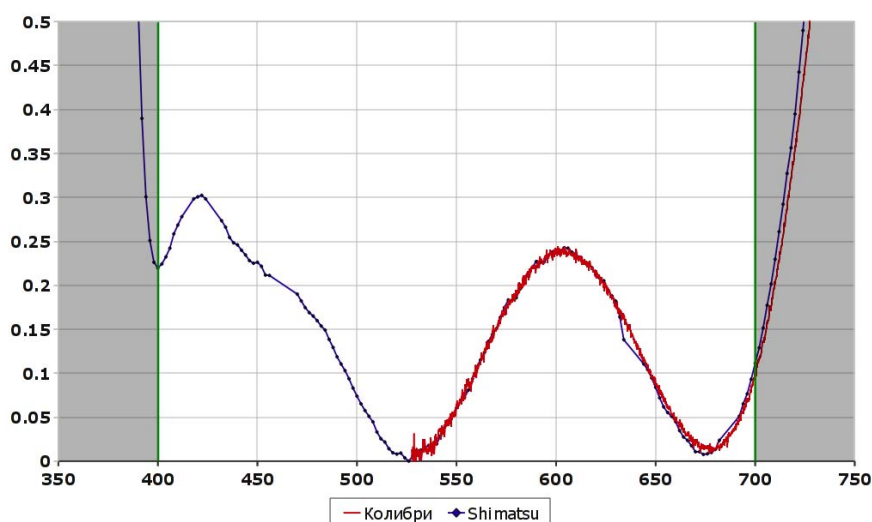


Рис. 5. Коэффициент отражения (в процентах) многослойного просветляющего покрытия для диапазона длин волн 400 – 700 нм:

красный цвет – измеренный спектрометром системы контроля «Колибри-2» (in situ), синий цвет – измеренный стационарным спектрометром «Shimatsu» (вне установки)

На модернизированной вакуумной установке «ВУ-2М», оснащенной разработанной системой контроля, были изготовлены сотни многослойных оптических покрытий: зеркала, отсекающие фильтры, просветляющие покрытия в широком спектральном диапазоне, узкополосные фильтры и другие [25]. В частности была решена задача создания широкополосного просветляющего покрытия для диапазона 400 – 670 нм с максимальным коэффициентом отражения – 0,15 %, интегральным – на уровне 0,09 %. Проведено исследование отечественного и международного рынка серийных промышленных решений и лабораторных (научных) результатов и установлено, что полученное покрытие превосходит результаты промышленных современных образцов просветляющих покрытий, и не уступает мировому научному уровню в данной спектральной области. Кроме того, данное покрытие было получено из распространенных материалов (TiO_2 , SiO_2 , MgF_2), широко применяемых в промышленности, что является достоинством.

Разработанная система контроля в широком спектральном диапазоне 500 – 990 нм также позволяет контролировать создание покрытий, работающих в спектральных диапазонах, не совпадающих и даже не пересекающихся с диапазоном контроля. Так, например, были изготовлены плотные зеркала для инфракрасного диапазона 2600 – 3400 нм. Известно, что в спектрометрах с дифракционными решетками присутствуют спектры различных порядков [26] и для спектрометра «Колибри-2» возможно наложение на первый рабочий порядок дифракционного спектра более высоких нерабочих порядков. Был произведен расчет спектральных отсекающих фильтров для подавления нерабочих

порядков дифракции в спектрометрах и в соответствии с данным расчетом на установке, оснащенной системой контроля, созданы первые экземпляры фильтров нерабочих порядков дифракционного спектра [27].

Заключение

При решении поставленных задач получены следующие новые научно-технические результаты:

1. Для определения оптимальных параметров системы контроля было проведено исследование влияния параметров системы и условий нанесения на погрешности измерения толщины контролируемого слоя путем компьютерного моделирования [21]. Для этого была предложена модель системы контроля в составе вакуумной установки и разработано программное обеспечение для моделирования [17]. По результатам исследования даны рекомендации для снижения погрешности измерения толщины наносимого слоя при использовании метода непрямого оптического контроля.

2. Предложен метод контроля с предварительно нанесенным слоем и показано, что его применение позволяет на порядок снизить случайную погрешность определения толщины нанометровых стартовых слоев и в 2-3 раза для слоев TiO_2 с толщинами менее 140 нм, и для слоев SiO_2 менее 230 нм.

3. Спроектирована и создана система широкополосного контроля напыления многослойных оптических покрытий в реальном времени, поддерживающая работу методами прямого и непрямого контроля по дополнительным контрольным подложкам: рабочий спектральный диапазон 500 – 990 нм, количество каналов – 2612, динамический диапазон 10^4 , время измерения спектров от 8 мс, время измерения толщины текущего слоя – $0,5 \div 1,0$ с, случайная погрешность измерения толщины слоя усредненная по световому пятну – 0,02 нм, случайная погрешность нанесения слоя $\sim 1,0$ нм. На оборудованной системой контроля вакуумной установке получены спектральные фильтры (просветляющие покрытия, отрезающие фильтры, зеркала и другие), которые не уступают мировому уровню в этой области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Netterfield R. Review of thin film deposition techniques // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2001. – P. MA2.
2. Dobrowolski J. A. Review of thin film interference polarizers and polarizing beam splitters for the visible and adjacent spectral regions // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2001. – P. FB1.
3. Macleod A. Future of optical coatings // Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America. – 2004. – P. MA1.
4. Structural properties of antireflection coatings / Tatiana V. Amotchkina, Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Sergey A. Yanshin // Optical Interference Coatings, Optical Society of America. – 2007. – P. WB5.
5. Macleod H. A. Monitoring of optical coatings // Applied Optics. – 1981. – Vol. 20 (1). – P. 82–89.

6. Macleod H. A. Layer uniformity and thickness monitoring. *Thin-Film Optical Filters*. – 3rd ed. – Chap. 11. – P. 488–520.
7. Banning M. Practical methods of making and using multilayer filters // *Journal of the Optical Society of America*. – 1947. – Vol. 37 (10). – P. 792–797.
8. Behrndt K. H. Physics of thin films. Vol. 3. – G. Hass and R. E. Thun, eds. – New York : Academic Press, 1966. – P. 1–59.
9. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., DeBell G. W. On the accuracy of optical thin film parameter determination based on spectrophotometric data // *In Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies*. – 2003. – Vol. 5188. – P. 190–200.
10. Zhu Zhen, Li Wensheng, Hua Yuansen. Monitoring the arbitrary thickness of optical thin films and their error simulation: a method // *Applied Optics*. – 1985. – Vol. 24 (11). – P. 1693–1695.
11. In situ optical characterization and reengineering of interference coatings / Steffen Wilbrandt, Olaf Stenzel, Norbert Kaiser, Michael K. Trubetskov, Alexander V. Tikhonravov // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47 (13) – P. C49–C54.
12. On-line Re-engineering of Interference Coatings / Steffen Wilbrandt, Olaf Stenzel, Norbert Kaiser, Michael K. Trubetskov, Alexander V. Tikhonravov // *Optical Interference Coatings*, Optical Society of America. – 2007. – P. WC10.
13. Direct optical monitoring instrument with a double detection system for the control of multilayer systems from the visible to the near infrared / Markus Tilsch, Volker Scheuer, Josef Staub, Theo T. Tschudi // *Optical Interference Coatings*, International Society for Optics and Photonics. – 1994. – Vol. 2253. – P. 414–423.
14. Macleod H. A. *Thin Film Optical Filters*. – 3rd ed. – CRC Press, 2001. – 640 p.
15. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Amotchkina T. V. Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring // *Applied Optics*. – 2006. – Vol. 45 (27). – P. 7026–7034.
16. Бабин С. А., Лабузов В. А. Оценка оптимальных параметров многоэлементных твердотельных детекторов для сцинтилляционного атомно-эмиссионного спектрального анализа // *Аналитика и контроль*. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 40–49.
17. Семенов З. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612869 от 11.03.2016 г. *Deposition Control Simulator: Программа моделирования работы системы контроля*. – 2016.
18. Зарубин И. А., Гаранин В. Г., Лабузов В. А. Применение малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном анализе // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78, № 1–2. – С. 86–89.
19. Технические параметры малогабаритного многоканального спектрометра «Колибри-2» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vmk.ru/product/spektrometry/kolibri-2_-_malogabaritnyy_mnogokanalnyy_spektrome.html
20. Ocean Optics HL-2000-FHSA Specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oceanoptics.com/product/hl-2000-family/>
21. Семенов З. В., Лабузов В. А. Исследование погрешностей непрямого способа спектрального контроля толщин слоев многослойных оптических покрытий путем компьютерного моделирования // *Автометрия*. – Т. 53, № 6. – 2017. – С. 3–14.
22. Лабузов В. А., Эрг Г. В., Семенов З. В. Пат. 2527670 Российская Федерация. Способ измерения толщин нанометровых слоев многослойного покрытия, проводимого в процессе его напыления. Международная заявка PCT/RU2012/000001, заявл. 10.01.2012, опубл. 10.09.2014.
23. Семенов З. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661646 от 02.11.2015 г. *LayerControl: Программа для контроля толщин слоев многослойных покрытий*. – 2015.
24. Программный пакет “OptiLayer thin film software” [Электронный ресурс] <http://www.optilayer.com/> (дата обращения: 23.05.2013 г.).

25. Лабусов В. А., Семенов З. В., Зарубин И. А., Саушкин М. С., Эрг Г. В., Ковалев С. И. Система спектрального контроля нанесения многослойных диэлектрических покрытий // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 11–14.
26. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л. : «Машиностроение», 1975. – 312 с.
27. Семенов З. В., Лабусов В. А., Зарубин И. А., Эрг Г. В. Применение многослойных диэлектрических покрытий для подавления излучения нерабочих порядков спектра в спектрометрах с дифракционной решеткой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 1–2. – С. 117–122.

REFERENCES

1. Netterfield, R. (2001). Review of thin film deposition techniques. In Optical Interference Coatings. Optical Society of America, p. MA2.
2. Dobrowolski, J. A. (2001). Review of thin film interference polarizers and polarizing beam splitters for the visible and adjacent spectral. In Optical Interference Coatings, Optical Society of America, p. FB1.
3. Macleod, A. (2004). Future of optical coatings. In Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, p. MA1.
4. Amotchkina, T. V., Tikhonravov, A.V., Trubetskov, M. K., & Yanshin, S.A. (2007). Structural properties of antireflection coatings. In Optical Interference Coatings, Optical Society of America, p. WB5.
5. Macleod, H. A. (1981). Monitoring of optical coatings. Applied Optics, 20(1), 82–89.
6. Macleod, H. A. (2001). Layer uniformity and thickness monitoring, Chap. 11, 488–520.
7. Banning, M. (1947). Practical methods of making and using multilayer filters. Journal of the Optical Society of America, 37(10), 792–797.
8. Behrndt, K. H. (1966). Physics of thin films. Vol. 3. New York: Academic Press, (pp. 1–59).
9. Tikhonravov, A. V., Trubetskov, M. K., & DeBell, G. W. (2003). On the accuracy of optical thin film parameter determination based on spectrophotometric data. Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies, Vol. 5188, 190–200.
10. Zhu, Z., Li, W., & Hua, Y. (1985). Monitoring the arbitrary thickness of optical thin films and their error simulation: a method. Applied Optics, 24(11), 1693–1695.
11. Wilbrandt, S., Stenzel, O., Kaiser, N., Trubetskov, M. K., & Tikhonravov, A.V. (2008). In situ optical characterization and reengineering of interference coatings. Applied Optics, 47(13), C49–C54.
12. Wilbrandt, S., Stenzel, O., Kaiser, N., Trubetskov, M. K., & Tikhonravov, A.V. (2007). On-line Re-engineering of Interference Coatings. Optical Interference Coatings, Optical Society of America, WC10.
13. Tilsch, M., Scheuer, V., Staub, J., & Tschudi, T. (1994). Direct optical monitoring instrument with a double detection system for the control of multilayer systems from the visible to the near infrared. Optical Interference Coatings, International Society for Optics and Photonics, 2253, 414–423.
14. Macleod, H. A. (2001). Thin Film Optical Filters. 3rd ed. CRC Press.
15. Tikhonravov, A.V., Trubetskov, M. K., & Amotchkina, T. V. (2006). Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production by broadband optical monitoring. Applied Optics, 45(27), 7026–7034.
16. Babin, S.A., & Labusov, S.A. (2014). Estimation of the optimal parameters of multi-element solid-state detectors for atomic emission spectral scintillation analysis. Analytics and Control, 18(1), 40–49.

17. Semenov, Z. V. (2016). Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2016612869. Deposition Control Simulator: Program for Modeling Operation of the Monitoring System. Publ. 11.03.2016.
18. Zarubin, I. A., Garanin, V. G., & Labusov, V. A. (2012). Application of the Kolibri-2 Small-Size Spectrometer in the Atomic Emission Analysis. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 78(1–2), 86–89 [in Russian].
19. Specifications of compact multichannel spectrometer “Kolibri-2”, URL: <http://www.vmk.ru/en/product/spectrometers/kolibri-2.html>
20. Ocean Optics HL-2000-FHSA Specifications, URL: <http://oceanoptics.com/product/hl-2000-family/>
21. Semenov, Z. V., & Labusov, V. A. (2017). Error Analysis of Indirect Broadband Monitoring of Multilayer Optical Coatings using Computer Simulations. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(6), 537–547.
22. Labusov, V. A., Semenov, Z. V., & Erg, G. V. (2014). Patent RF No. 2527670. Method of Measuring the Thickness of Nanometer Layers of a Multilayer Coating in the Course of its. Publ. 10.09.2014, Bul. No. 25, Russia Federation.
23. Semenov, Z. V. (2015). Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2015661646. LayerControl: Program for Monitoring the Layer Thickness in Multilayer Coatings. Publ. 02.11.2015.
24. OptiLayer Thin Film Software, URL: <http://www.optilayer.com/>
25. Labusov, V. A., Semenov, Z. V., Zarubin, I. A., Saushkin, M. S., Erg, G. V., & Kovalev, S. I. (2014). A System for the Spectral Monitoring of the Deposition of Multilayer Dielectric Coatings. *Measurement Techniques*, 56(12), 1327–1332.
26. Peisakhson, I. V. (1975). *Optika spektral'nih priborov* [Optics of Spectral Devices]. 2nd edition. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
27. Semenov, Z. V., Labusov, V. A., Zarubin, I. A., & Erg, G. V. (2017). Application of Multilayer Dielectric Coatings for Suppression of Non-Working Spectrum Orders in Diffraction Grating Spectrometers. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 83(1–2), 117–122 [in Russian].

© З. В. Семенов, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, 2018

ЛАЗЕРНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОБЛАЧНАЯ ТРИАНГУЛЯЦИЯ С ВИДЕОПОТОКОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Сергей Владимирович Двойнишников

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-82, e-mail: dv.s@mail.ru

Григорий Владимирович Бакакин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-87-82, e-mail: bakakin@itp.nsc.ru

Владимир Генриевич Меледин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-82, e-mail: meledin@itp.nsc.ru

Олег Юрьевич Садбаков

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)330-87-82, e-mail: satpak@mail.ru

Работа посвящена развитию методов лазерной дифференциальной синхронной облачной триангуляции для измерения толщины листового проката в горячей металлургической промышленности. Предложен метод лазерной дифференциальной облачной триангуляции с видеопотоковой синхронизацией, предусматривающий возможность использования широкодоступных и надежных фотоприемников без аппаратной синхронизации. Метод реализован в испытательном макете лазерного радиационно-безопасного измерителя толщины горячего проката и испытан в цехе горячего проката Новосибирского металлургического завода им. Кузмина. В ходе испытаний измерительный комплекс обеспечил погрешность измерений на уровне 0,01% и подтвердил работоспособность в реальных производственных условиях горячей металлургии. Применение предложенного метода обеспечивает существенное снижение стоимости и увеличение надежности современных измерительных систем на основе лазерной дифференциальной облачной триангуляции.

Ключевые слова: лазерная облачная триангуляция, измерение толщины, горячий прокат, видеопотоковая синхронизация, обработка данных.

LASER DIFFERENTIAL CLOUDY TRIANGULATION WITH VIDEO STREAM SYNCHRONIZATION

Sergey V. Dvoynishnikov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Senior Researcher, phone: (383)330-87-82, e-mail: dv.s@mail.ru

Grigoriy V. Bakakin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-87-82, e-mail: bakakin@itp.nsc.ru

Vladimir G. Meledin

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, phone: (383)330-87-82, e-mail: meledin@itp.nsc.ru

Oleg Yu. Satbakov

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-87-82, e-mail: satpak@mail.ru

The paper is devoted to development of laser differential synchronous cloudy triangulation methods for thickness measurements in the hot metallurgical industry. The method of laser differential cloudy triangulation with video stream synchronization is proposed. This method makes it possible to use widely available and very reliable photodetectors without hardware synchronization. The proposed method is implemented in a prototype of a laser radiation-safe hot-rolled meter and tested in the hot-rolled section of Novosibirsk Metallurgical Plant. During tests, the measuring complex provided a measurement error 0.01 % and confirmed its performance in the conditions of hot metallurgy. Application of the proposed method of video stream synchronization of photodetectors allows reducing the cost and increasing the reliability of the modern measuring systems based on laser differential cloudy triangulation.

Key words: laser cloudy triangulation, thickness measurement, hot rolling, video stream synchronization, data processing.

Введение

Оптико-электронные и лазерные методы диагностики и контроля широко используются в металлургии [1, 2], машиностроении [3, 4], энергетике [5, 6], гидродинамических исследованиях [7, 8], оптической промышленности [9] и других научно-технических приложениях. Развитие оптико-электронных методов геометрического контроля для промышленных технологий и научных исследований является важной задачей в свете повышения требований к качеству выпускаемых изделий, роста объема производства и снижения производственных издержек. Наибольший прогресс наблюдается в оптимизации алгоритмов обработки данных [10-12], исследовании новых методов измерений [13-15], измерениях в нестандартных или экстремальных условиях [16, 17], повышении надежности и снижении себестоимости измерительных комплексов [18].

Проблема измерения толщины металлопроката является важной и актуальной из-за высоких требований на допуски выпускаемой продукции и значительных экономических потерь при повторной металлообработке. Ее решают различными методами, начиная от прямых контактных и бесконтактных измерений [19] и заканчивая косвенными измерениями на основе физических моделей, описывающих производственные процессы [20-22].

Методы синхронной дифференциальной облачной триангуляции [1, 16, 23, 24] применяют для измерения толщины динамических объектов в металлургической промышленности. Они основаны на формировании пространственно модулированного излучения, которое рассеивается на поверхности исследуемого объекта и анализируется на фотоприемнике в виде дискретного множества

световых точек. Метод отличается устойчивостью к нестационарным фазовым искажениям средой, в которой распространяются оптические лучи измерительного комплекса, и малой погрешностью измерения. Для реализации дифференциальной схемы измерения используется механизм аппаратной синхронизации лазерных источников и фотоприемников в измерительном комплексе.

На сегодняшний день максимальное распространение получили цифровые фотоприемники, не имеющие режима внешней аппаратной синхронизации. При прочих равных параметрах, стоимость фотоприемника без внешней синхронизации по сравнению с фотоприемником с внешней синхронизацией оказывается в десятки раз меньшей. Это связано с их массовым применением в бытовых веб-камерах, мобильных телефонах и т.д., в отличие от фотоприемников с внешней синхронизацией, спрос на которые среди производителей цифровой и измерительной техники существенно ниже. В связи с этим, разработка метода видеопотоковой синхронизации фотоприемников, не предусматривающего электронную синхронизацию, крайне актуальна для современных измерительных систем на основе лазерной дифференциальной облачной триангуляции.

Описание метода

Принцип видеопотоковой синхронизации, показанный на рис. 1, заключается в следующем. Модуль синхронизации S, подключенный к компьютеру PC, управляет модулями излучения L1 и L2. Модули излучения L1 и L2 работают в двух режимах (рис. 2): в режиме измерения (State M) и в режиме синхронизации (State S). В режиме синхронизации модули излучения формируют оптическое излучение с пространственной модуляцией, отличной от используемой в режиме измерения. Это позволяет обеспечить корректную синхронизацию фотоприемников C1 и C2 в процессе непрерывной работы и исключить влияние кратковременных сбоев на работу комплекса. Сбор и обработку данных от фотоприемников C1 и C2 выполняет компьютер PC.

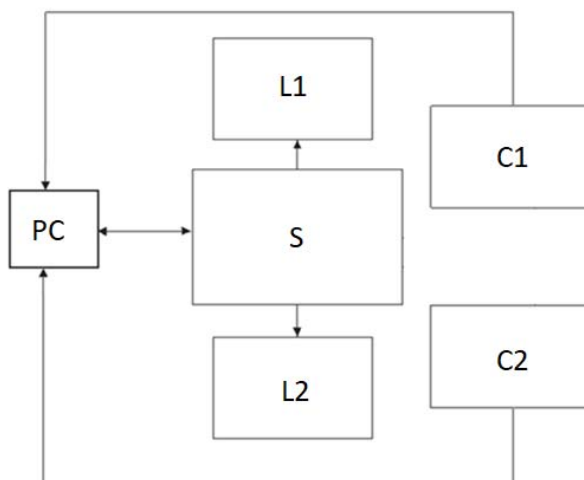


Рис. 1. Метод видеопотоковой синхронизации

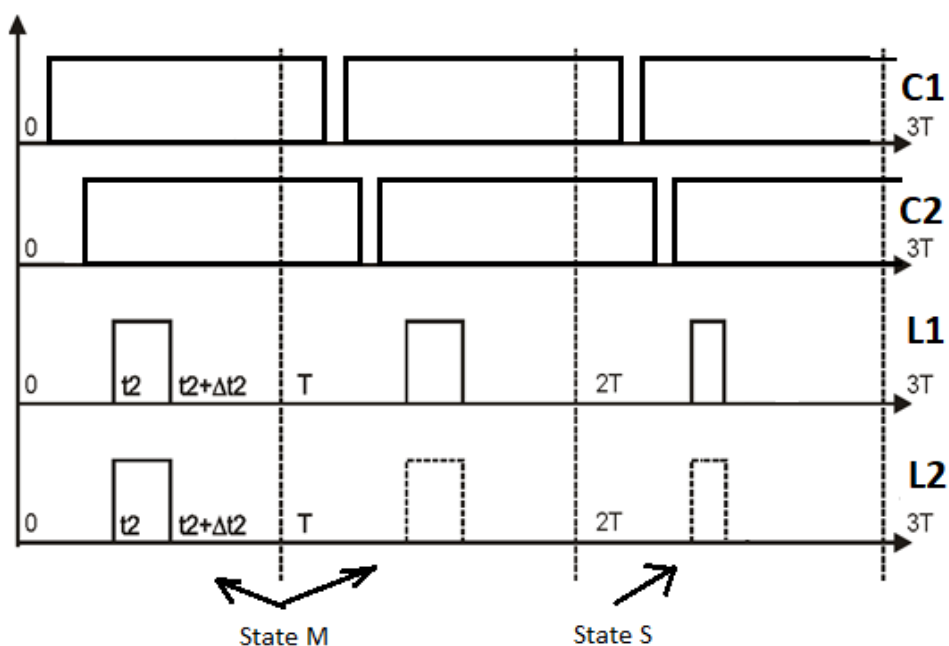


Рис. 2. Диаграмма импульсов при видеопотоковой синхронизации фотоприемников

Обработка данных измерителя, реализующего метод лазерной дифференциальной облачной триангуляции с видеопотоковой синхронизацией, во многом схожа с обработкой данных измерителя, реализующего метод с аппаратной синхронизацией фотоприемников и излучателей. Главное отличие заключается в предварительной обработке изображений и синхронизации кадров видеопотоков.

Особенности применения фотоприемников с прогрессивной разверткой, работающих в режиме непрерывного сбора видеопотока при короткой длительности светового импульса, заключаются в том, что зарегистрированные кадры будут содержать два изображения. При наличии небольшого «темного» времени фотоприемника, соответствующего закрытому затвору, на изображении неизбежно будет присутствовать темный сектор, на котором отсутствует изображение рассеянного объектом излучения. Этот темный сектор соответствует границе, по которой необходимо совместить фрагменты соседних кадров, чтобы восстановить цельное изображение светового импульса.

Алгоритм предварительной обработки видеопотоков (рис. 3) заключается в следующем. Для формирования изображения облачного триангулятора необходимо найти темную зону на изображении, которая разделяет текущий и предыдущий кадры. Далее формируется изображение одного светового импульса: верхняя часть изображения берется из текущего кадра, а нижняя – из предыдущего. В результате формируется новый видеопоток, содержащий изображения одиночных световых импульсов. В случае отсутствия изображения засветки, рассеянной исследуемым объектом (например, когда объекта в зоне измерения

нет), весь кадр будет восприниматься темной зоной и алгоритм обработки данных вернет состояние «отсутствие сигнала». Для синхронизации видеопотоков, полученных от различных фотоприемников, используются кадры, на которых зафиксированы изображения, полученные в режиме синхронизации. Периодическая схема формирования световых импульсов, соответствующих режиму синхронизации, позволяют устойчиво работать измерительной системе в режиме периодических пропаданий сигналов в измерительной схеме. Такой режим соответствует работе на прокатных станах металлургических предприятий.

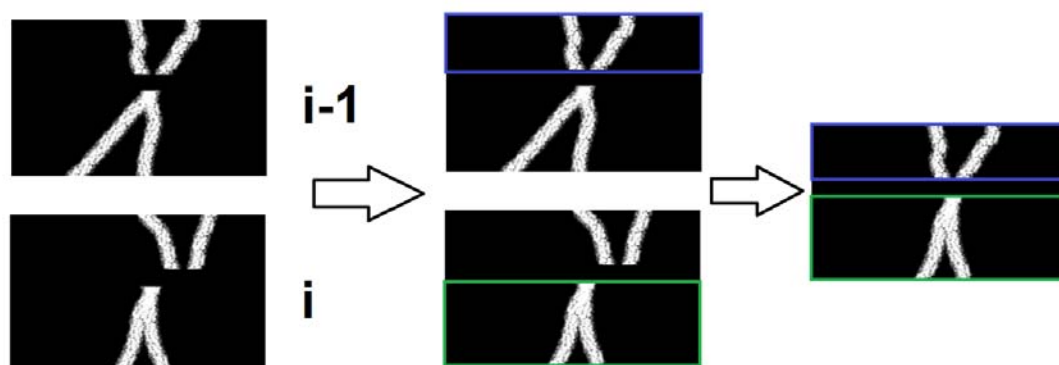


Рис. 3. Алгоритм предварительной обработки изображений на фотоприемниках при видеопотоковой синхронизации

Экспериментальные результаты

Предложенный метод лазерной дифференциальной облачной триангуляции реализован в испытательном макете лазерного измерителя толщины горячего проката. Применена пространственная модуляция излучения в виде двух световых облаков в форме пересекающихся эллипсоидов, вытянутых по одному направлению. В качестве кадра синхронизации применялась модуляция в виде трех эллипсоидов, пересекающихся в одной точке. В качестве фотоприемников использованы фотоприемные модули бытовых веб-камер Logitech c910 Pro, обеспечивающие интерфейс USB взаимодействия с компьютером и программный интерфейс DirectShow.

На рис. 4, *а* представлено изображение, принимаемое с фотоприемника облачного триангулятора при измерении горячего движущегося проката. Кадр содержит две части двух разных кадров. Верхняя часть соответствует режиму измерения, нижняя часть соответствует режиму синхронизации.

На рис. 4, *б* представлено изображение после предобработки, соответствующее режиму измерения. На рис. 4, *в* представлено изображение, соответствующее кадру синхронизации. В данном случае алгоритм селекции по типу кадра выполняет поиск световых линий и по их количеству принимает решение о типе наблюдаемой засветки (2 линии – режим измерения, 3 линии – режим синхронизации).

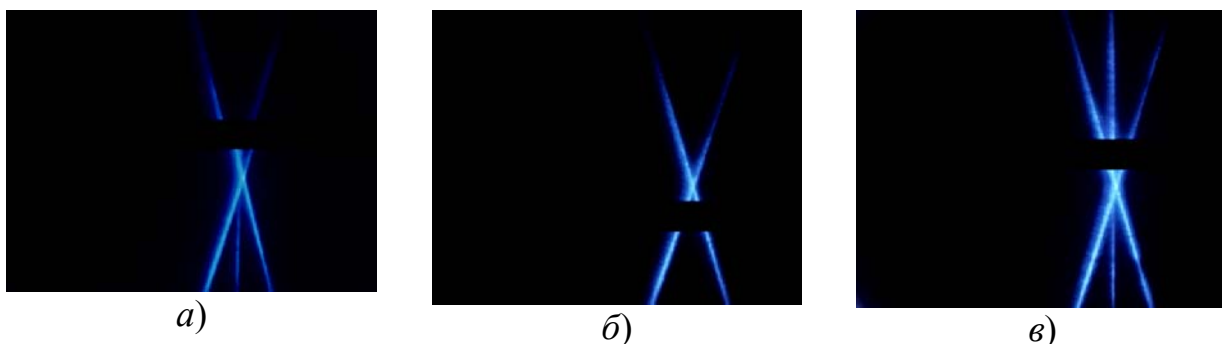


Рис. 4. Изображение, зарегистрированное фотоприемником (а), изображения после предобработки, соответствующие режиму измерения (б) и режиму синхронизации (в)

Изображение измерительного кадра, представленное на рис. 4, в обрабатывают алгоритмами, аналогичными алгоритмам обработки данных измерителя толщины на основе дифференциальной облачной триангуляции с аппаратной синхронизацией. Основное отличие обработки данных в методе лазерной дифференциальной облачной триангуляции с видеопотоковой синхронизацией по сравнению с методом с аппаратной синхронизацией заключается в обязательном присутствии темной полосы, соответствующей «темному» времени на изображении. Положение этой полосы изменяется от кадра к кадру в видеопотоке. В результате постоянное смещение данной полосы отрицательно влияет на погрешность определения характеристических параметров наблюдаемого распределения интенсивности. Это связано с тем, что в итоговом множестве световых точек, по которым выполняют регрессионный анализ при обработке оптоэлектронных сигналов, отсутствуют различные сегменты анализируемого изображения.

Указанный эффект приводит к более высокой погрешности измерения по сравнению с методом лазерной дифференциальной облачной триангуляции с аппаратной синхронизацией фотоприемников. Погрешность измерения толщины горячего проката при использовании аппаратной синхронизации была в среднем три раза меньше, чем при использовании видеопотоковой синхронизации при использовании фотоприемников с одинаковым пространственным разрешением.

Заключение

Предложенный метод лазерной дифференциальной облачной триангуляции с видеопотоковой синхронизацией, предусматривает возможность использования широкодоступных и надежных фотоприемников без аппаратной синхронизации. Метод реализован в макете лазерного радиационно-безопасного измерителя толщины горячего проката и испытан в цехе горячего проката Новосибирского металлургического завода им. Кузьмина. В ходе длительных ис-

пытаний измерительный комплекс обеспечил погрешность измерений на уровне 0,01% и подтвердил работоспособность в условиях горячего металлургического производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-08-00910).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Куликов Д. В., Павлов В. А., Рахманов В. В. Пат. 2574864 Российская Федерация. Способ облачной триангуляции толщины горячего проката; 2016, Бюл. № 4.
2. Двойнишников С. В., Рахманов В. В., Меледин В. Г., Куликов Д. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К. Экспериментальная оценка применимости лазерных триангуляторов для измерений толщины горячего проката // Метрология. – 2014. – № 12. – С. 9–21.
3. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Кабардин И. К., Куликов Д. В., Меледин В. Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 17–22.
4. Dvoynishnikov S., Meledin V., Pavlov V. Integrated Assessment Method of Impulse Response in Optical System of 3D Scanner with Phase Triangulation / International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015) (Beijing, China, May 17–18, 2015). – Beijing, 2015. – P. 527–531.
5. Dvoynishnikov S., Rakhmanov V. Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations // EPJ Web of Conferences. – 2015. – № 82. – P. 01035-3.
6. Kabardin I. K., Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Naumov I. V. The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics. – 2016. – № 4. – P. 504–508.
7. Naumov I. V., Dvoynishnikov S. V., Kabardin I. K., Tsoy M. A. Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections // Physics of Fluids. 2015. Vol. 27 (12). - P.124103.
8. Naumov I. V., Kabardin I. K., Mikkelsen R. F., Okulov V. L., Sørensen J. N. Performance and wake conditions of a rotor located in the wake of an obstacle // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 753. – P. 032051.
9. Qiu L., Guo Y., Zhao W. Lens central thickness measurement by laser reflection-confocal technology // Proc. SPIE 9618 : International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Measurement Technology and Systems 2015: – 2015. – Vol. 9618. – P. 961806.
10. Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Главный В. Г., Наумов И. В., Чубов А. С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника. 2015. – № 5. – С. 24–27.
11. Fay M., Dresel T. Applications of model-based transparent surface films analysis using coherence-scanning interferometry // Optical Engineering. – 2017. – 56 (11). – P. 111708.
12. Двойнишников С. В., Меледин В. Г., Павлов В. А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия. – 2017. – Т. 53 (2). – С. 56–62.
13. Ramamurthy R., Harding K. Measurement of material thickness in the presence of a protective film // Proc. SPIE 10220 : Conference on Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VI, 2017. – 2017. – Vol. 10220. – UNSP 102200J.
14. Kowarsch R., Zhang J., Sguazzo C. Speckle-interferometric measurement system of 3D deformation to obtain thickness changes of thin specimen under tensile loads // Proc. SPIE 10329 : Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, X part of the SPIE Optical Metrology Symposium 2017. – 2017. – Vol. 10329. – UNSP 103291O.

15. Chen Z., Qu X., Geng, X. Apparatus and method of optical marker projection for the three-dimensional shape measurement // Proc. SPIE 9623 : International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Measurement Technology and Systems 2015. – 2015. – Vol. 9623. – P. 96230Z.
16. Dvoynishnikov S., Meledin V., Bakakin G., Kulikov D. Laser Cloudy Triangulation Method for Geometrical Measurements Under the Optical Refraction Conditions // International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015), (Beijing, China, May 17–18, 2015). – Beijing, 2015. – P.532–538.
17. Kim J., Kim K., Pakh H. Thickness Measurement of a Transparent Thin Film Using Phase Change in White-Light Phase-Shift Interferometry // Current Optics and Photonics. – 2017. – 1 (5). – P. 505–513.
18. Dvoynishnikov S., Meledin V., Bakakin G., Rakhmanov V. Phase Images Processing Using Parallel Programming // International Conference on Mechatronics, Control and Automation Engineering (MCAE2016) (Bangkok, Thailand, July 24–25, 2016). – Bangkok, 2016. – P. 178–181.
19. Lee S. H., Park H. B., Park C. J. Technology of Dimensional Control for Different Thickness Strip in Hot Strip Finishing Mills // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. – 2015. – 21 (8). – P.735–741.
20. Ma W., Wang F., Zhang X., Guo W., Liu Z., Tan L. Influence of Rolling Force and Roll Gap on Thickness of Strip // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. – Vol. 239. – P. 012012-4.
21. Jung C., Zaefferer M., Bartz-Beielstein T., Rudolph G. Metamodel-based optimization of hot rolling processes in the metal industry // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 90. – P. 421–435.
22. Koshekov K. T., Klikushin Y. N., Gladkov M. V., Dvoynishnikov S. V., Koshekov A. K. Assessment of thickness effective value of hot-rolled steel sheets on the basis of the identification measurements // 2-nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Dehradun, India, September 15–16, 2016). – Dehradun, 2016.
23. Двойнишников С. В., Бакакин Г. В., Главный В. Г., Кабардин И. К., Меледин В. Г. Пат. 2537522 Российская Федерация. Способ триангуляционного измерения толщины листовых изделий; 10.01.2015, Бюл. № 1.
24. Двойнишников С. В., Аникин Ю. А., Куликов Д. В., Меледин В. Г., Рахманов В. В. Пат. 2610009 Российская Федерация. Триангуляционный способ измерения отклонения объекта и определения его ориентации в пространстве; 07.02.2017, Бюл. № 6.

REFERENCES

1. Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., Kulikov, D. V., Pavlov, V. A., & Rahmanov, V. V. (2016). Patent RF No 2574864. Method of cloud triangulation of hot-rolled products thickness. Novosibirsk: IP Russian Federation.
2. Dvoynishnikov, S. V., Rakhmanov, V. V., Meledin, V. G., Kulikov, D. V., Anikin, Yu. A., & Kabardin, I. K. (2015). Experimental Assessment of the Applicability of Laser Triangulators for Measurements of the Thickness of Hot Rolled Product. *Measurement Techniques*, 57(12), 1378–1385.
3. Dvoynishnikov, S. V., Anikin, Y. A., Kabardin, I. K., Kulikov, D. V., & Meledin, V. G. (2016). An Optoelectronic Method of Contactless Measurement of the Profile of the Surface of Large Complexly Shaped Objects. *Measurement Techniques*, 59(1), 21–27.
4. Dvoynishnikov, S., Meledin, V., & Pavlov, V. (2015). Integrated Assessment Method of Impulse Response in Optical System of 3D Scanner with Phase Triangulation. In 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015), May 17-18, 2015, Beijing, China (pp. 527–531). ISBN: 978-1-60595-240-6.
5. Dvoynishnikov, S., & Rakhmanov, V. (2015). Power installations geometrical parameters optical control method steady against thermal indignations. *EPJ Web of Conferences*, 82, 01035-3.

6. Kabardin, I. K., Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., & Naumov, I. V. (2016). The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection. *Journal of Engineering Thermophysics*, 4, 504–508.
7. Naumov, I. V., Dvoynishnikov, S. V., Kabardin, I. K., & Tsoy, M. A. (2015). Vortex breakdown in closed containers with polygonal cross sections. *Physics of Fluids*, 27(12), 124103.
8. Naumov, I. V., Kabardin, I. K., Mikkelsen, R. F., Okulov, V. L., & Sørensen, J. N. (2016). Performance and wake conditions of a rotor located in the wake of an obstacle. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 032051.
9. Qiu, L., Guo, Y., & Zhao, W. (2015). Lens central thickness measurement by laser reflection-confocal technology. *Proceedings of SPIE 9618, International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Measurement Technology and Systems* (Beijing, China, May 17-19, 2015), Vol. 9618, 961806.
10. Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., Glavnyi, V. G., Naumov, I. V., & Chubov, A. S. (2015). Estimation of Optimal Frequency of Spatial Modulation of the Radiation of 3D Measurements. *Measurement Techniques*, 58(5), 506–511.
11. Fay, M., & Dresel, T. (2017). Applications of model-based transparent surface films analysis using coherence-scanning interferometry. *Optical Engineering*, 56(11), 111708.
12. Dvoynishnikov, S. V., Meledin, V. G., & Pavlov, V. A. (2017). High-speed processing of phase images with parallel computations. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(2), 145–150.
13. Ramamurthy, R., & Harding, K. (2017). Measurement of material thickness in the presence of a protective film. *Proceedings of SPIE 10220, Conference on Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VI* (Anaheim, April 13, 2017), Vol. 10220, UNSP 102200J.
14. Kowarsch, R., Zhang, J., & Sguazzo, C. (2017). Speckle-interferometric measurement system of 3D deformation to obtain thickness changes of thin specimen under tensile loads. *Proceedings of SPIE 10329, Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, X part of the SPIE Optical Metrology Symposium* (Munich, Germany, June 26-29, 2017), Vol. 10329, UNSP 103291O.
15. Chen, Z., Qu, X., & Geng, X. (2015). Apparatus and method of optical marker projection for the three-dimensional shape measurement. *Proceedings of SPIE 9623, International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Measurement Technology and Systems* (Beijing, China, May 17-19, 2015), Vol. 9623, 96230Z.
16. Dvoynishnikov, S., Meledin, V., Bakakin, G., & Kulikov, D. (2015). Laser Cloudy Triangulation Method for Geometrical Measurements under the Optical Refraction Conditions. In *2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE2015)*, May 17-18, 2015, Beijing, China (pp. 532–538). ISBN: 978-1-60595-240-6.
17. Kim, J., Kim, K., & Pahk, H. (2017). Thickness Measurement of a Transparent Thin Film Using Phase Change in White-Light Phase-Shift Interferometry. *Current Optics and Photonics*, 1(5), 505–513.
18. Dvoynishnikov, S., Meledin, V., Bakakin, G., & Rakhmanov, V. (2016). Phase Images Processing Using Parallel Programming. In *2016 International Conference on Mechatronics, Control and Automation Engineering (MCAE 2016)*, July 24-25, 2016, Bangkok, Thailand (pp. 178–180).
19. Lee, S. H., Park, H. B., & Park, C. J. (2015). Technology of Dimensional Control for Different Thickness Strip in Hot Strip Finishing Mills. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 21(8), 735–741.
20. Ma, W., Wang, F., Zhang, X., Guo, W., Liu, Z., & Tan, L. (2017). Influence of Rolling Force and Roll Gap on Thickness of Strip. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 239, 012012-4.

21. Jung, C., Zaefferer, M., Bartz-Beielstein, T., & Rudolph, G. (2017). Metamodel-based optimization of hot rolling processes in the metal industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 421–435.
22. Koshekov, K. T., Klikushin, Y. N., Gladkov, M. V., Dvoynishnikov, S. V., & Koshekov, A. K. (2016). Assessment of thickness effective value of hot-rolled steel sheets on the basis of the identification measurements. 2-nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA), Dehradun, India, September 15-16, 2016.
23. Dvoynishnikov, S. V., Bakakin, G. V., Glavnyj, V. G., Kabardin, I. K., & Meledin, V. G. (2015). Patent RF No 2537522. Method of triangular measurement of thickness of sheet products RU Patent №, 10.01.2015, Bull. No 1.
24. Dvoynishnikov, S. V., Anikin, Yu. A., Kulikov, D. V., Meledin, V. G., & Rahmanov, V. V. Patent RF No2610009. Triangulation method of measurement for deviations of object and determination of its spatial orientation, 07.02.2017, Bull. No 6.

© С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. Г. Меледин, О. Ю. Садбаков, 2018

БАЗА ДАННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С НЕПРЕРЫВНЫМ ИСТОЧНИКОМ СПЕКТРА

Никита Анатольевич Колосов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент; Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (923)248-54-21, e-mail: nikitoz2109@yandex.ru

Светлана Сергеевна Болдова

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер; ООО «ВМК-Оптоэлектроника», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, тел. (953)792-96-94, e-mail: kurilsvet@gmail.com

Работа посвящена созданию базы спектральных линий поглощения элементов таблицы Менделеева, а также сравнению полученной базы со спектрами поглощения элементов на примере никеля.

Ключевые слова: база данных спектральных линий, атомно-абсорбционный спектральный анализ, источник непрерывного спектра, многоэлементный анализ, таблица Менделеева.

DATABASE OF SPECTRAL LINES FOR ATOMIC-ABSORPTION SPECTRAL ANALYSIS WITH CONTINUOUS SPECTRUM SOURCE

Nikita A. Kolosov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student; Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (923)248-54-21, e-mail: nikitoz2109@yandex.ru

Svetlana S. Boldova

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer ; LLC «VMK-Optoelektronika», 1, Prospect Akademik Koptug St., Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (953)792-96-94, e-mail: kurilsvet@gmail.com

The work is devoted to the creation of the database for absorption spectral lines of the Mendeleyev's table elements, and also comparison of the obtained base with absorption spectra of elements on the nickel example.

Key words: spectral lines database, atomic absorption spectroscopic analysis, continuous spectrum source, multi-element analysis, Mendeleyev's table.

Введение

В существующем методе атомно-абсорбционного спектрального анализа [1] определение концентрации элементов в пробе идет последовательно и для каждого элемента используется своя лампа полого катода, излучающая на линиях этого элемента, среди которых наиболее чувствительная спектральная ли-

ния выделяется и регистрируется с помощью монохроматора. Для каждого элемента используется небольшое количество самых чувствительных линий абсорбции.

Развитие метода одновременного атомно-абсорбционного спектрального анализа с использованием источника непрерывного спектра и спектрометра, который регистрирует спектры абсорбции в широком спектральном диапазоне, показало, что ряд элементов имеет достаточно богатый спектр [2–3]. При наличии в пробе нескольких десятков элементов возможны спектральные наложения, которые не позволяют использовать известные линии абсорбции. Для диагностики спектральных наложений и поиска свободных от них линий абсорбции, которые можно использовать для определения концентраций элементов, нужна база данных, которая бы содержала по возможности все спектральные линии абсорбции для элементов таблицы Менделеева.

В настоящее время в отличие от атомно-эмиссионного анализа, в котором существуют достаточно полные базы данных с линиями эмиссии элементов, в свободном доступе не удалось найти литературы, где предоставлялась бы достаточно полная база спектральных линий абсорбции с соответствующими реальностями чувствительностями.

Данная работа посвящена созданию базы аналитических линий для атомно-абсорбционного спектрального анализа с непрерывным источником спектра, сравнению ее с имеющимися базами данных и реализации в ПО «Атом 3.3», а также сравнению этой базы со спектрами поглощения чистых элементов.

Для этого следовало решить следующие задачи:

- в открытых источниках найти все приведенные аналитические линии для элементов таблицы Менделеева,
- пересчитать интенсивность каждой линии по относительной чувствительности для возможности последующего количественного анализа,
- занести полученные данные в базу данных ПО «Атом 3.3»,
- на экспериментальной установке с электротермическим атомизатором зарегистрировать спектры поглощения растворов ряда элементов,
- проверить соответствие спектральных линий в этих спектрах с созданной базой спектральных линий.

Поиск информации об аналитических линиях

В базе данных NIST [4] практически нет информации о чувствительности линий, полученных в поглощении. Поэтому были использованы два источника [5–6], где указаны основные линии элементов, полученные в поглощении с чувствительностями, а также близкие к ним, которые могут давать спектральные наложения. Получается достаточно большой набор линий для каждого элемента. Рассмотрим никель, как элемент с богатым аналитическими линиями спектром. В табл. 1 указаны аналитические линии никеля и мешающие для них. Аналогично и для других элементов, например кобальта, есть мешающие линии никеля (табл. 2).

Таблица 1

Выбранные линии поглощения никеля (отсортированные по их относительной чувствительности) и соответствующие линии элементов с потенциальным риском спектральных наложений

λ element	Rel.		Matrix	Rel.		λ element	Rel.		Matrix	Rel.
/nm	sens.	name	λ /nm	sens.		/nm	sens.	name	λ /nm	sens.
232,003	1	W	231,858	140				PO	231,251	
		V	232,014	300				Fe	231,31	110
		Fe	232,036	74				W	231,317	3,1
		Ni	232,138	7,2				Ni	231,366	5,9
		W	232,163	6,2				Ni	231,398	10
		Ni	232,195	49				W	231,417	42
231,096	1,7	Ti	230,89	130				Ge	231,42	260
		Fe	230,9	180				Ti	231,43	150
		Co	230,901	14		228,998	4,5	Co	228,781	110
		W	230,902	22				Cd	228,802	1
		V	231,017	940				Ni	228,84	240
		NO	231,084					PO	228,983	
		PO	231,102					PO	228,999	
		Co	231,136	930				Fe	229,007	36
		V	231,146	650				PO	229,013	
		Ni	231,234	4,4				In	229,013	5600
		Fe	231,31	110				W	229,095	14
		W	231,317	3,1				Co	229,145	380
234,554	3,5	W	234,374	110		232,58	4,5	V	232,454	820
		NO	234,548					V	232,474	180
		W	234,6	110				Co	232,554	150
		Co	234,616	130				V	232,586	340
		Ni	234,663	77				W	232,656	15
		W	234,669	200				W	232,67	19
		V	234,701	850				Ge	232,792	350
		Ni	234,751	39		341,476	4,8	Co	341,233	47
231,234	4,4	V	231,017	940				Co	341,263	26
		Ni	231,096	1,7				W	341,296	180
		Co	231,136	930				Ni	341,347	240
		V	231,146	650				W	341,353	100
		PO	231,227					Ni	341,394	380
		V	231,24	1400				Co	341,716	240

Таблица 2

Выбранные линии поглощения кобальта (отсортированные по их относительной чувствительности) и соответствующие линии элементов с потенциальным риском спектральных наложений

λ element	Rel.		Matrix	Rel.		λ element	Rel.		Matrix	Rel.
/nm	sens.	name	λ /nm	sens.		/nm	sens.	name	λ /nm	sens.
240,725	1	W	240,558	2,3		252,136	2,7	Ti	251,902	63
		W	240,569	9,9				Si	251,92	4,3
		W	240,618	23				V	251,963	31
		V	240,675	85				Ti	252,054	13
		V	240,79	140				PO	252,121	
		W	240,904	100				W	252,132	14
		W	240,914	170				In	252,137	110
241,162	2,1	Ti	241,137	180				PO	252,153	
		Ti	241,158	180				W	252,216	130
		Pb	241,173	9500				Fe	252,285	1,7
		Ni	241,264	400				In	252,298	710
		V	241,269	66				W	252,341	9,7
		Co	241,276	49		243,221	4,2	W	242,985	70
		V	241,304	91				In	242,986	870
		W	241,378	180				W	243,108	8,5
242,493	2,2	V	242,337	280				V	243,157	750
		Ni	242,403	750				V	243,195	210
		W	242,421	8,3				V	243,202	190
		Ti	242,425	15				PO	243,236	
		PO	242,492					Ti	243,322	59
		V	242,613	940				W	243,398	10

Таким образом, по таблицам всех элементов можно сделать базу для каждого. Чувствительность для каждой линии задается через относительную чувствительность (relative sensitivity, Rel. sens.) в сравнении с главной аналитической линией. При этом главной линии Rel. sens. = 1, а для всех остальных линий приводится значение во сколько раз она слабее основной. Для удобного отображения единиц чувствительности основной линии присваивается значение 10000, тогда для остальных линий этот параметр $\frac{10000}{X}$, где X – относительная чувствительность линии, для которой вычисляется интенсивность. Таким образом, мы получили, что для линии Ni 232,0033 интенсивность в относительных единицах составляет 10000 отн. ед. Для линии Ni 231,0958 (Rel. sens.= 1,7) при этих же условиях интенсивность равняется 5882 отн. ед.

Таким образом линии из [5–6] с были внесены в базу спектральных линий программы «Атом 3.3» и каждой линий поглощения присвоен маркер Р = Поглощение и прописаны значения чувствительности. На рис. 1 представлен вид файла с базой данных спектральных линий. Теперь в настройках параметров базы спектральных линий можно выбрать «Поглощение» и тогда будут отображаться только эти линии с соответствующими чувствительностями (рис. 2).

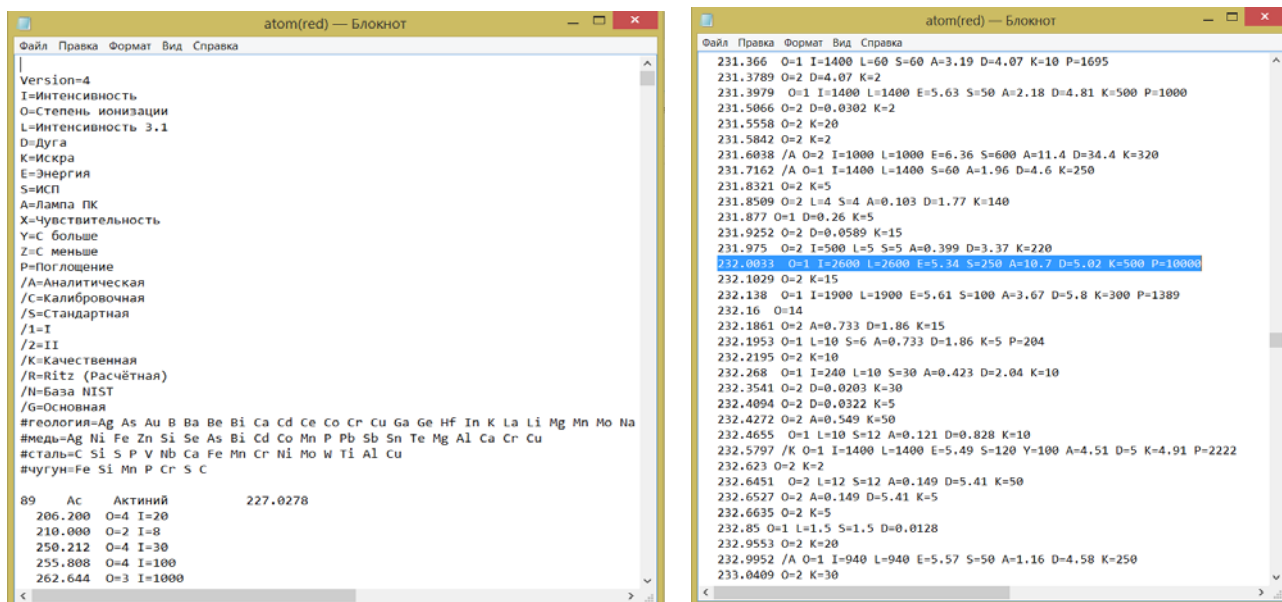


Рис. 1. Вид файла с базой данных спектральных линий

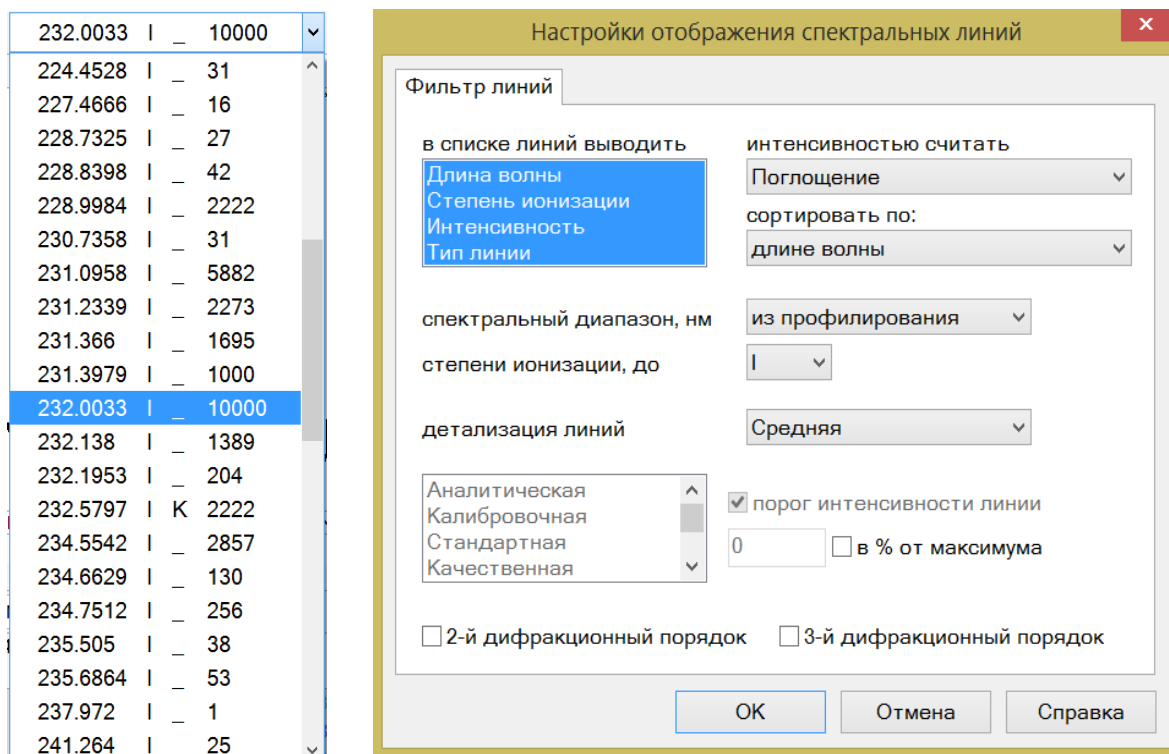


Рис. 2. Настройка параметров базы спектральных линий

После выбора параметров в окне спектра можно наблюдать расположение этих линий относительно друг друга (рис. 3). Теперь следует убедиться, насколько данная база соотносится с реальным спектром. Для этого на экспериментальной установке были сняты спектры никеля.

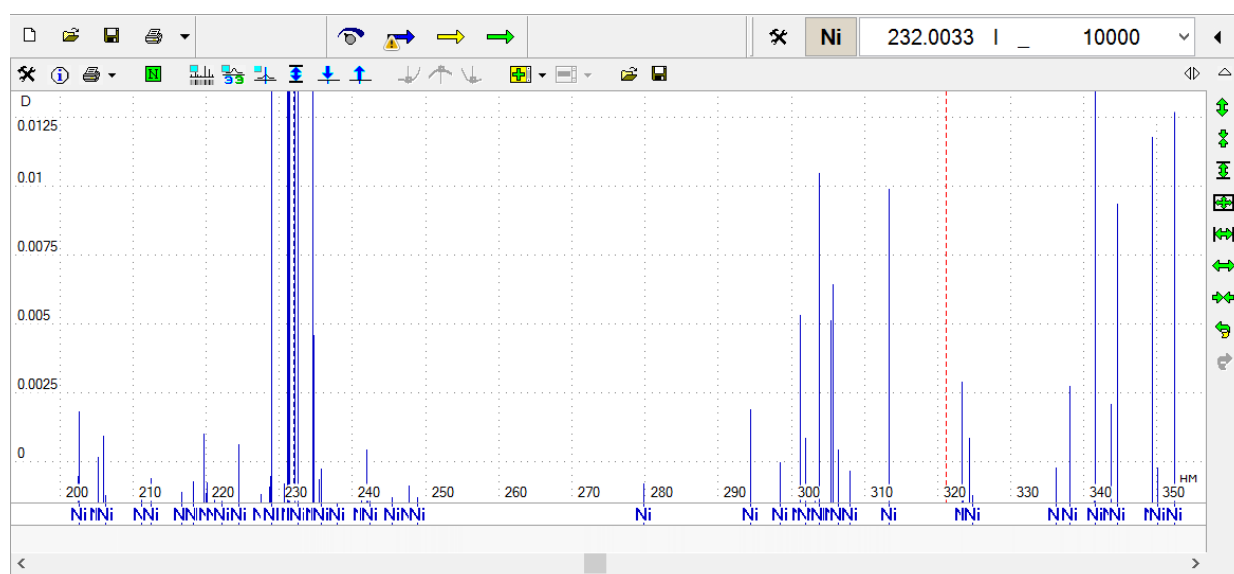


Рис. 3. Расположение спектральных линий поглощения для никеля по длинам волн

Схема установки

Подробно об экспериментальной установке рассказано в статье [7]. Установка включает дейтериевую лампу в качестве источника непрерывного спектра, электротермический атомизатор с печью Varian, и спектрометр «Колибри-2», разрешение которого составляет 0,1 нм при ширине входной щели 7 мкм, а рабочий спектральный диапазон – 190–360 нм. На рис. 4 представлена принципиальная схема прибора. Управление спектрометром и источником питания атомизатора осуществлялось через персональный компьютер с программным обеспечением «Атом 3.3».

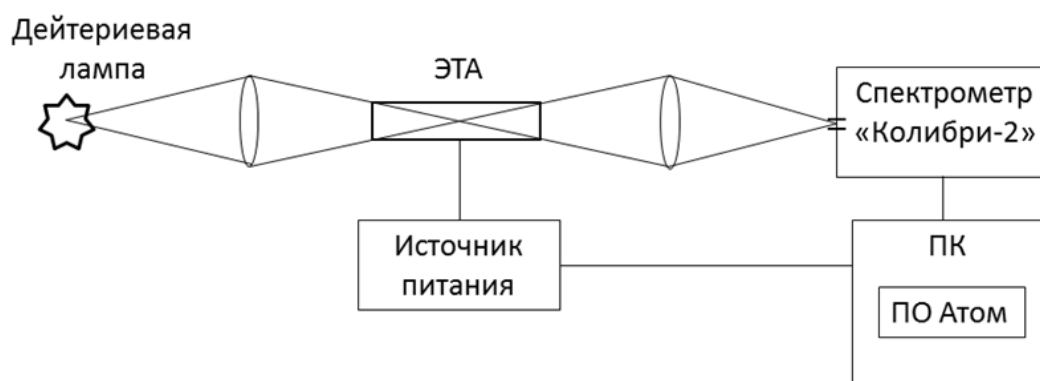


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Измерение и расчет сигналов

Измерительная процедура включала дозирование пробы, проведение температурной программы, запись спектра во время шага атомизации и вычисления.

Температурная программа (табл. 3) включала сушку, пиролиз, атомизацию и очистку печи. На этапе атомизации записывалось 200 спектров за 2 с при базовой экспозиции 5 мс, с усреднением по двум спектрам.

Таблица 3

Температурная программа

Шаг	Время, с	Температура, °C	Газ, л/мин
Сушка	120	90	1-2
Пиролиз	60	500	1-2
Атомизация	2	2400	0
Очистка	2	2500	4

Обработка спектров поглощения подробно описана в статье [8]. На рис. 5 приведен спектр, снятый при концентрации никеля 160 ppb. К этому спектру применена база данных по поглощению. Из рисунка видно, что линий в реальном спектре гораздо больше, чем в составленной нами базе данных. Из этого следует, что полученная база не является полной и требуется ее дополнение.

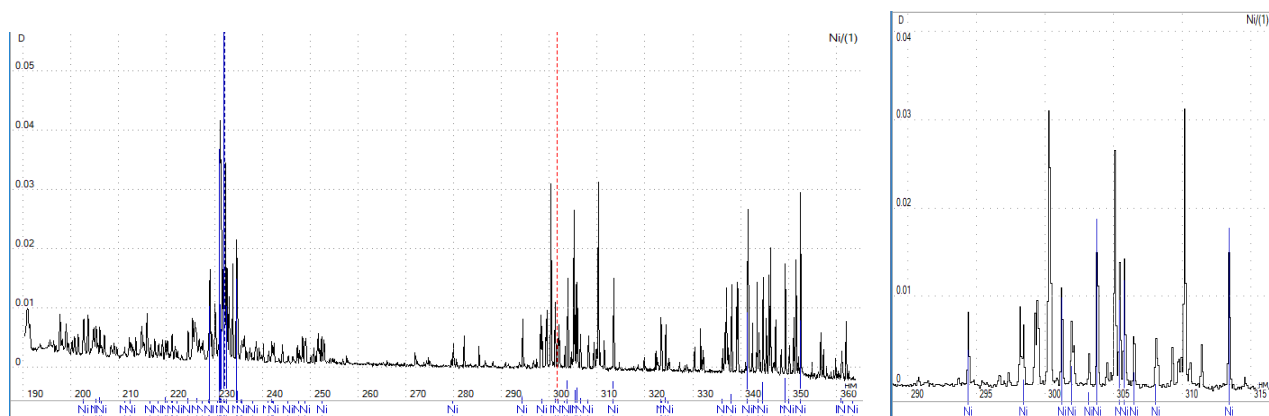


Рис. 5. Спектр никеля при концентрации 160 ppb

Выводы

По литературным данным найдены и внесены в базу данных спектральных линий программы «Атом» линии абсорбции никеля и кобальта с их чувствительностями. Сравнение полученной базы данных и зарегистрированных спек-

тров поглощения одноэлементных растворов никеля и кобальта показало, что все линии в базе соответствуют линиям в спектре по длине волны и чувствительности. Однако есть большое число линий этих элементов, не присутствующих в базе. В дальнейшем планируется создание более полной базы по спектрам поглощения одноэлементных растворов, зарегистрированных на спектрометре высокого разрешения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Львов Б. В. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. – Москва : Наука, 1966. – 392 с.
2. Katskov D. A., Khanye G. E. Simultaneous Multi-Element Electrothermal Atomic Absorption Determination Using a Low Resolution CCD Spectrometer and Continuum Light Source: The Concept and Methodology // The South African Journal of Chemistry. – 2010. – Vol. 63. – P. 45–57.
3. Katskov D. A. Low-resolution continuum source simultaneous multi-element electrothermal atomic absorption spectrometry: Steps into practice // Spectrochimica Acta Part B. – 2015. – Vol. 105. – P. 25–37.
4. Physics Laboratory, NIST. <https://physics.nist.gov> (дата обращения 16.03.2018).
5. Welz B., Becker-Ross H., Florek S., Heitmann U. High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry. – Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. – 295 p.
6. Welz B., Sperling M. Atomic Absorption Spectrometry. – 3rd ed. – Weinheim : Wiley-VCH, 1999.
7. Болдова С. С., Путьмаков А. Н., Лабусов В. А., Боровиков В. М., Селюнин Д. О., Бейзель Н. Ф., Гуськова Е. А. О создании прибора для одновременного многоэлементного атомно-абсорбционного спектрального анализа на основе спектрометра высокой дисперсии и источника непрерывного спектра // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 1-II. – С. 148–153.
8. Ващенко П. В., Болдова С. С., Лабусов В. А. Алгоритм обработки последовательностей атомно-абсорбционных спектров с непрерывным источником излучения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. – Т. 81, № 1-II. – С. 153–157.

REFERENCES

1. Lvov, B. V. (1966). Atomno-absorbicionnyi spektral'nyi analiz [Atomic Absorption Spectral Analysis]. Moscow: Science [in Russian].
2. Katskov, D. A., & Khanye, G. E. (2010). Simultaneous Multi-Element Electrothermal Atomic Absorption Determination Using a Low Resolution CCD Spectrometer and Continuum Light Source: The Concept and Methodology. The South African Journal of Chemistry, 63, 45–57.
3. Katskov, D. A. (2015). Low-resolution continuum source simultaneous multi-element electrothermal atomic absorption spectrometry: Steps into practice. Spectrochimica Acta Part B, 105, 25–37.
4. Physics Laboratory, NIST. <https://physics.nist.gov>
5. Welz, B., Becker-Ross, H., Florek, S., & Heitmann, U. (2005). High-resolution Continuum Source AAS: The Better Way to do Atomic Absorption Spectrometry. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Welz, B., & Sperling, M. (1999). Atomic Absorption Spectrometry. Weinheim: Wiley-VCH, 1999.
7. Boldova, S. S., Putmakov, A. N., Labusov, V. A., Borovikov, V. M., Selyunin, D. O., Beyzel, N. F., & Guskova, Ye. A. (2015). On the creation of a device for simultaneous

multielement atomic absorption spectroscopic analysis based on a high dispersion spectrometer and a continuous spectrum source. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1-II), 148–153 [in Russian].

8. Vashchenko, P. V., Boldova, S. C., & Labusov, V. A. (2015). Algorithm for processing sequences of atomic absorption spectra with a continuous source of radiation. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov* [Industrial Laboratory], 81(1-II), 153–157 [in Russian].

© *H. A. Колосов, С. С. Болдова, 2018*

**ЭНЕРГО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ С ЛЮМИНОФОРАМИ ДЛЯ СИСТЕМ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Никита Сергеевич Никитенко

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, ведущий инженер, тел. (383)330-71-20, e-mail: rabochnet@mail.ru

Виктор Федорович Плюснин

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-23-85, e-mail: plusnin@yandex.ru

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Приводятся результаты выполненных исследований и полученные объективные данные о методах построения телекоммуникационных систем на основе полимерных планарных люминесцентных волноводов, с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: оптический планарный волновод, лазерные системы, полимер, люминофор.

**ENERGY-TIME TRANSFORMATIONS OF LASER PULSES IN POLYMERIC
STRUCTURES WITH LUMINOPHORES FOR TELECOMMUNICATION SYSTEMS
WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Alexander V. Britvin

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Nikita S. Nikitenko

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Lead Engineer, phone: (383)330-71-20, e-mail: rabochnet@mail.ru

Victor F. Plyusnin

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)333-23-85, e-mail: plusnin@kinetics.nsc.ru

Boris V. Poller

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

The results of the performed studies and obtained objective data on the methods of constructing telecommunication systems based on polymer planar luminescent waveguides using unmanned aerial vehicles are presented.

Key words: optical planar waveguide, laser systems, polymer, luminophore.

Введение

Для создания систем телекоммуникаций для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях интенсивных радиопомех необходимы лазерные линии связи, с чувствительными элементами, обладающими широким углом сбора излучения, компактными размерами и малым весом.

Чувствительные элементы в виде полимерных планарных волноводов с добавками люминофоров соответствуют заявленным требованиям, обладая углом поля зрения от 120° до 360° , при толщинах волноводов от десятков микрон до нескольких миллиметров и весом от единиц до десятков грамм. Ряд вопросов построения планарно-волоконных преобразователей ультрафиолетовых (УФ) сигналов освещен в работах [1–3, 6–8, 11, 14, 16, 17] и вопросы построения УФ систем связи рассмотрены в работах [4, 5, 9, 10, 12, 13, 18–20].

Следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе не освещены вопросы изготовления единой планарно-волоконной системы для УФ телекоммуникаций воздушного базирования.

Нет сведений об оптимальной концентрации люминофора, в зависимости от размеров волновода. Приведены теоретические расчеты оптимальной формы волновода, неподтвержденные широкой экспериментальной базой.

Таким образом, в теме разработки систем телекоммуникаций, с применением полимерных планарных волноводов существует достаточное количество нерешенных вопросов, которые требуют более детального освещения.

Целью настоящей научно-практической работы является оценка возможности и создание лазерных систем телекоммуникаций с использованием полимерных планарных волноводов, размещенных на БПЛА.

Эксперименты

В данном методе предполагается использовать пленочно-волоконные антенны, размещенные на БПЛА, что позволит одновременно передавать и принимать сигналы между БПЛА и наземными пунктами.

Планарный модуль представляет собой пластину из светопрозрачного материала с внедренным в нее люминесцирующим веществом. Излучение, проходя сквозь пластину, частично поглощается люминесцентной средой, преобразуется и излучается во всех направлениях. Та часть люминесцентного излучения, которая попадает в пределы двух критических конусов, ограниченных углом падения ϕ , равным $\phi = \arcsin(n)$, где n – показатель преломления матрицы, покидает пределы волновода. Для полиметилметакрилата с $n = 1,49$, $\phi \approx 42^\circ$.

Остальное излучение, претерпевая полное внутреннее отражение на поверхности волновода, достигает его торцевых граней. Так как критический угол зависит от показателя преломления матрицы, то увеличение показателя преломления матрицы повышает долю излучения, улавливаемого полным внутренним отражением. Концентрация лучистой энергии происходит за счет того, что через торцевую поверхность малой площади проходит излучение, возникающее в волноводе с большой площадью освещаемой поверхности.

Часть излучения теряется за счет отражения на границе двух сред с различными оптическими плотностями. Для ПММА френелевское отражение составляет 4 % (для нормально падающего света) и 6 % для излучения, падающего под углом 50° .

$$K = 4n / (n + 1)^2, \text{ при } n = 1,49 \text{ } K = 0,96,$$

где K – пропускная способность.

Неотраженная часть света, проходя сквозь волновод, частично поглощается люминофором и материалом матрицы. Поглощенная часть определяется коэффициентом экстинкции данных молекул люминофора и матрицы и описывается законом Бугера-Ламберта.

$$I = I_0 \exp[-[\alpha_l(\lambda) + \alpha_m(\lambda)]b],$$

где I – интенсивность прошедшего излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения; $\alpha_l(\lambda)$ – коэффициент экстинкции для средней длины волны поглощения люминофора; $\alpha_m(\lambda)$ – коэффициент экстинкции для средней длины волны поглощения матрицы; b – толщина образца.

Оптический сигнал, принимаемый боковой поверхностью планарно-волоконной антенны (ПВА), преобразуется частицами люминофора и канализируется за счет эффекта полного внутреннего отражения к торцам планарного волновода. Далее поступает на измеритель мощности, спектроанализатор или в блок обработки через волокно или напрямую (рис. 1).

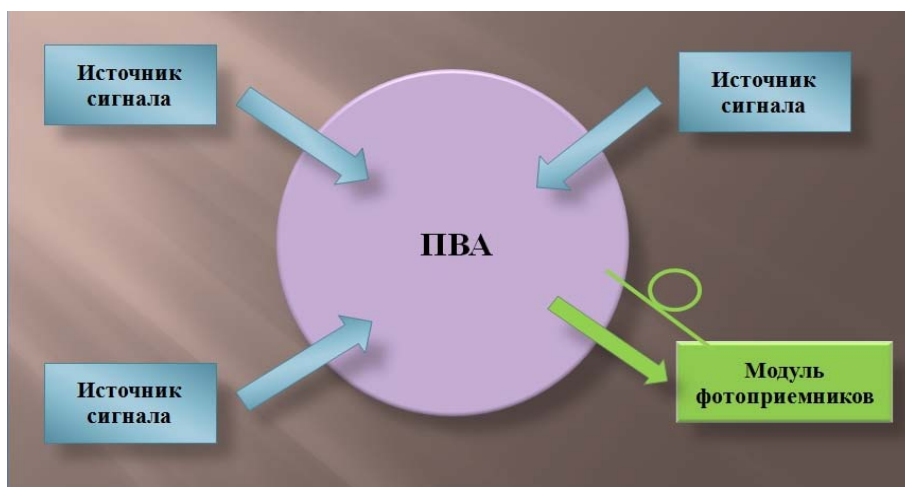


Рис. 1. Структура ПВА

Чувствительные элементы систем дистанционного контроля были изготовлены в лаборатории ИЛФ СО РАН с применением современных сертифицированных материалов и оборудования. Контроль структуры и характеристик пленочно-волоконных модулей проводился с использованием современных методов измерения мощности излучения, микроскопии, и спектроскопии с участием специалистов ИХКиГ СО РАН.

Методом исследования телекоммуникационных систем на основе полимерных планарных люминесцентных волноводов являлся физический эксперимент, заключающийся в измерении характеристик исследуемого излучения и систематизации результатов воздействий на чувствительные элементы систем.

В работе сравнивались энергетические и временные характеристики плоского (рис. 2) и кольцевого полимерных волноводов (см. рис. 6).

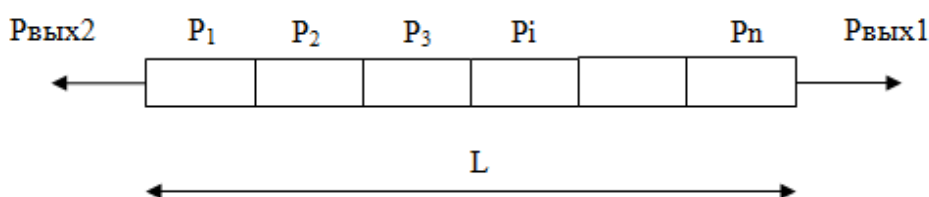


Рис. 2. Схема плоского волновода

Энергетические характеристики пленочно-волоконного модуля зависят от размеров планарного волновода, площади, с которой снимается сигнал, длины и материала волноводов и ряда других факторов.

При размерах волновода $30 \times 30 \times 1$ мм и расстоянии от источника сигнала до поверхности волновода, равном 200 см, в случае сбора излучения люминесценции со всей площади торцов волновода энергетическая эффективность будет составлять порядка 3 %.

Время задержки сигнала в волноводах зависит:

- от пути, в частности от толщины и формы волновода;
- концентрации люминофоров и степени перекрытия спектров поглощения и люминесценции.

Излучение, падающее на плоский волновод, взаимодействует с каждым участком волновода в одно время. Задержка выходного сигнала с торцов плоского волновода обусловлена временем прохождения сигнала внутри матрицы волновода, процессами перепоглощения и быстроедействием содержащегося в волноводе люминофора.

Для плоского волновода входной и выходной сигналы задаются следующими функциями:

$$P_{\text{ВхПВ}} = \sum P_i = \sum \Psi(t),$$

$$P_{\text{ВыхПВ}} = \Psi(L, b, \eta, \Delta t) P_{\text{Вх}},$$

где L – длина волновода, b – толщина волновода, η – длительность послесвечения люминофора.

Излучение, падающее на кольцевой волновод, взаимодействует с сегментами волновода в разное время.

Задержка входного сигнала:

$$\Delta t = h/v,$$

где v – скорость распространения падающего излучения, h – параметр, характеризующий величину изгиба волновода.

Для определения зависимости сигнала люминесценции, получаемого с торца плоского волновода с люминофором РОРОР, от угла падения излучения накачки на поверхность волновода исследуемый волновод закреплялся на вращающейся подвижке, позволяющей изменять угол поворота с точностью в 1° . Излучатель закрепляется на оптической стойке таким образом, чтобы излучение падало на пленку под прямым углом. Сигнал с торцов планарно-волоконного модуля принимался фотоприемником (рис. 3).

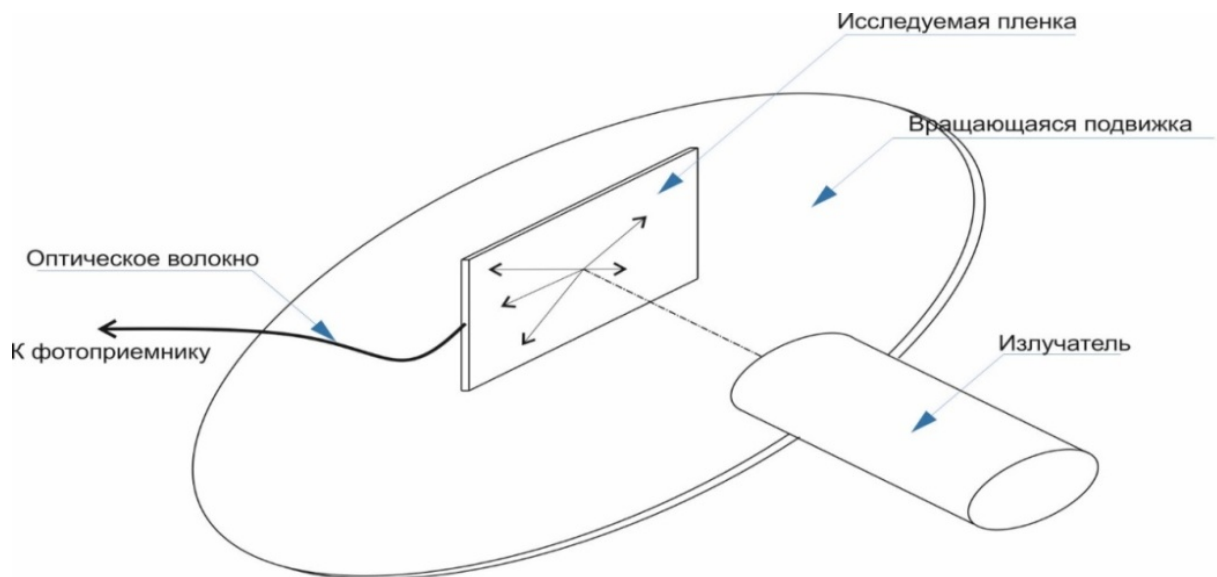


Рис. 3. Схема эксперимента по определению эффективного угла сбора излучения плоским волноводом

Рассматривали изменение положения планарно-волоконного модуля (ПВМ) в двух плоскостях (рис. 4, рис. 5).

При отклонении поверхности ПВМ от горизонтали изменяется угол α , амплитудные значения сигнала ослабляются в два раза при угле 40° и уменьшаются до нулевого значения при 55° .

При отклонении поверхности ПВМ от вертикали изменяется угол β , амплитудные значения сигнала ослабляются в два раза при угле 50° и уменьшаются до нулевого значения при 65° .

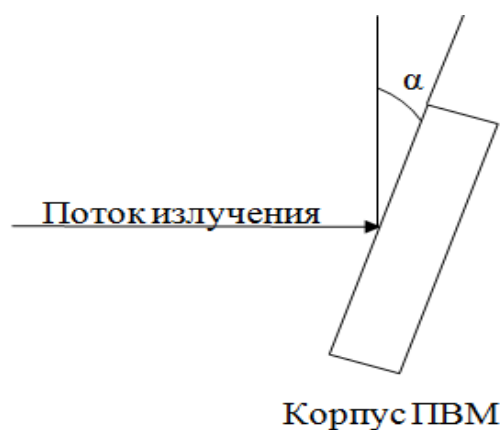


Рис. 4. Схема расположения корпуса ПВМ относительно луча излучения

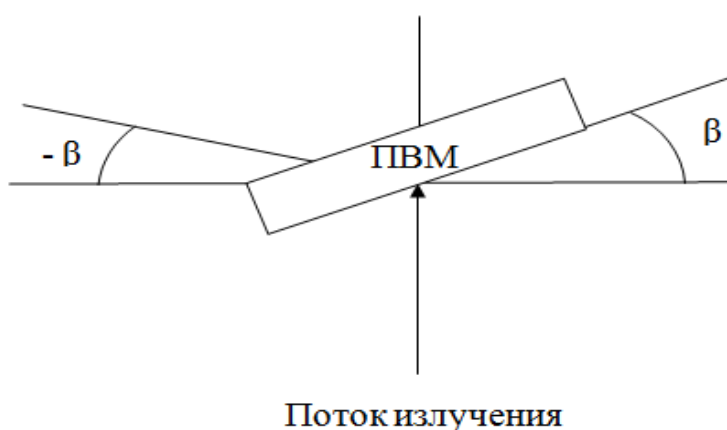


Рис. 5. Схема расположения корпуса ПВМ относительно луча излучения

Эксперименты по определению зависимости сигнала люминесценции, получаемого с торца плоского волновода с люминофором РОРОР, от угла падения излучения накачки на поверхность волновода показали, что изготовленные плоские волноводы обладают широким углом сбора излучения, достигающего 120° .

Использование кольцевого полимерного волновода позволяет увеличить угол сбора излучения до 360° и рабочую площадь волновода в рамках ограниченного пространства, определяемого параметром L . Однако с учетом угла падения излучения эффективная площадь волновода уменьшается.

Задержка выходного сигнала с торцов кольцевого волновода обусловлена временем прохождения сигнала внутри матрицы волновода, процессами перепоглощения, быстродействием содержащегося в волноводе люминофора, а также разным временем поступления входного сигнала на сегменты волновода.

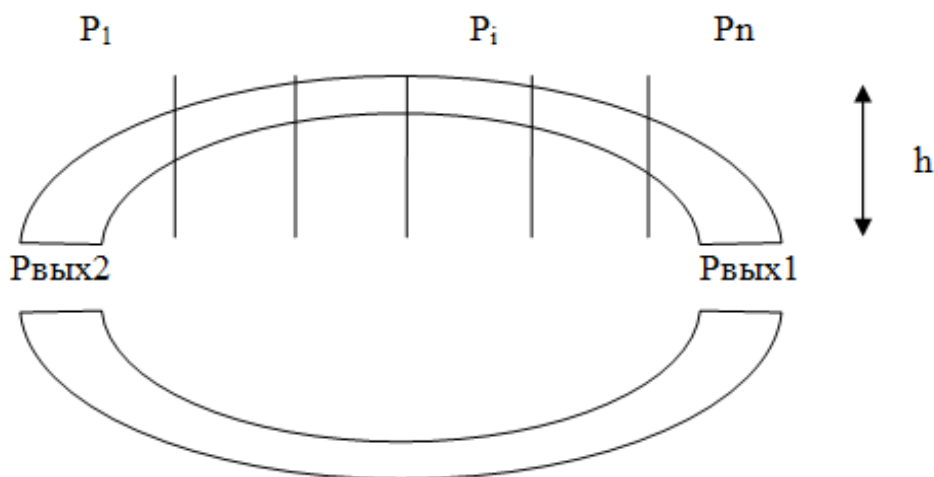


Рис. 6. Схема кольцевого волновода

Для кольцевого волновода входной и выходной сигналы определяются следующими функциями:

$$P_{\text{ВхКВ}} = \sum P_i = \sum \Psi(t, h),$$

где h – параметр, характеризующий величину изгиба волновода.

$$P_{\text{ВыхКВ}} = \Psi(C, b, \eta, \Delta t) P_{\text{Вх}},$$

где C – длина окружности волновода, b – толщина волновода, η – длительность послесвечения люминофора.

Варьирование величины изгиба и длины кольцевого волновода позволяет получить суммирование входных сигналов на выходе из торцов волновода или наоборот осуществить селекцию сигналов.

Для экспериментальной оценки временных характеристик ПВА был разработан УФ-передатчик на экспериментальных образцах УФ-диодов с длиной волны излучения равной 0,36 мкм и приемная антенна толщиной 1,5 мм, площадью 25 см² с волоконным съемом сигнала через широкополосный усилитель. Испытания подтвердили возможность передачи через атмосферу цветного видеосигнала высокого качества.

Заключение

Отличительными особенностями оптических систем с чувствительными элементами в виде полимерных планарных волноводов являются широкий угол поля зрения от 120° до 360°, при толщинах волноводов от десятков микрон до нескольких миллиметров и весом от единиц до десятков грамм. Планарные волноводы, обладая перечисленными выше характеристиками, являются перспективными для использования в лазерных телекоммуникационных системах на основе БПЛА.

Использование изогнутого полимерного волновода позволяет варьированием величины изгиба и длины волновода получить суммирование излучения люминесценции от сегментов волновода на выходе из торцов волновода или наоборот осуществить селекцию сигналов.

Через ПВА возможна передача импульсных сигналов с фронтами в десятки наносекунд, что позволит достичь пропускной способности до 100 Мбит/сек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспериментальные характеристики планарно-волоконных преобразователей ультрафиолетовых сигналов для лазерных систем мониторинга наземных объектов / А. В. Бритвин, Ю. Д. Коломников, Н. С. Никитенко и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 106–110.
2. Характеристики пленочно-волоконных модулей для антенн наземно-космической лазерной связи / Б. Д. Борисов, А. В. Бритвин, В. Ф. Плюснин, Б. В. Поллер // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013». Дифракционные и интерференционные системы и приборы : сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 77–80.
3. Бритвин А. В., Кусакина А. Е., Поллер Б. В. Экспериментальные характеристики распространения лазерных сигналов на горизонтальной и наклонной трассах на горном Алтае // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013»: сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 5, № 3. – С. 108–110.
4. Белов В. В., Абрамочкин В. Н., Гриднев Ю. В. и др. Бистатическая оптико-электронная связь в УФ-диапазоне длин волн. Полевые эксперименты в 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – № 2. – С. 111–114.
5. Тарасенков М. В., Белов В. В., Познахарев Е. С. Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – № 5. – С. 10–15.
6. Бритвин А. В., Поллер А. Б., Поллер Б. В., Щетинин Ю. И. Структура и функциональные возможности лазерной информационно-сенсорной системы для дистанционного контроля объектов в труднодоступных зонах // 19-ая Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь»: сб. докладов (Воронеж, 16–18 апреля 2013 г.). – Воронеж : САКВОЕЕ, 2013. Т. 1. – С. 178–184.
7. Бритвин А. В., Глушков Г. С., Никитенко Н. С. и др. Вопросы построения и результаты экспериментальных исследований средств лазерно-радиоволновой наземно-космической связи и мониторинга // III Всероссийская науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации»: сб. тезисов (Красноярск, 22–23 сентября, 2016 г.). – Красноярск : АО «НПП «Радиосвязь», 2016. – С. 387–390.
8. О свойствах полимерных планарных и волоконных оптических волноводов с микрочастицами и перетяжками / Д. В. Алексеев, А. В. Бритвин, С. Г. Орлов и др. // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 4, ч. 2. – С. 22–26.
9. Сонькин М. А., Ямпольский В. З. Интегрированные системы мониторинга для труднодоступных и подвижных объектов. – Томск : НТЛ, 2010. – 140 с.
10. Козинцев В. И. и др. Основы импульсной лазерной локации. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 573 с.

11. Амон Ф., Ригль У., Ригер П., Пфеннигбауэр М. Применение лазерного сканирования с БПЛА для мониторинга сложных и комплексных геодезических задач // Интерэкспо Гео-Сибирь-2015. – С. 32–41.
12. Бритвин А. В., Жумагулов Б. Т., Калимолдаев М. Н. и др. Комплексные системы мониторинга нефтепроводов на базе лазерных и пленочных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 3. – С. 51–54.
13. Борисов Б. Д., Бритвин А. В., Зверев А. В. и др. Характеристики энергоинформационной модели и методов построения телекоммуникационной и квантово-криптографической лазерной системы спутниковой связи // Проблемы информатики. – 2013. – № 1. – С. 69–75.
14. О характеристиках опторадиеволновых ретрансляторов для лазерных наземно-космических сетей и линий связи в условиях облачности / А. В. Бритвин, С. И. Коняев, Б. В. Поллер, Ю. И. Щетинин // Гео-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 5, ч. 2. – С. 64–68.
15. Исследование оптических параметров экспериментальных образцов ультрафиолетовых светодиодов для систем связи и контроля / А. В. Бритвин, Н. Н. Бакин, А. В. Поважаев и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 61–65.
16. Характеристики преобразования оптических сигналов в полимерных пленках с люминофорами, с наночастицами железа / А. В. Бритвин, А. Е. Кусакина, Б. В. Поллер и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.) – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 22–26.
17. Буценко Е. С., Иваницкий А. Е., Колчев М. Л. и др. Особенности люминесцентных свойств композиций полимер-люминофор с гомогенным распределением в полимерной матрице // Вестник ТГПУ. – 2013. – № 8 (136). – С. 149–153.
18. Haipeng D., Chen G., Arun K., Sadler B. M., Xu Z. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2009. – Vol. 27 (9). – P. 1535–1544.
19. Han D., Liu Y., Zhang K., Luo P., Zhang M. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system // Optics Express. – 2012. – Vol. 20 (14). – P. 15833–15842.
20. Elshimy M. A., Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28 (3). – P. 420–428.

REFERENCES

1. Britvin, A. V., Kolomnikov, Y. D., Nikitenko, N. S., et al. (2017). Experimental characteristics of planar fiber converters of ultraviolet signals for laser systems for monitoring terrestrial objects // In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2017: XIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. SibOptika-2017 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 2. SibOptics-2017] (pp. 106–110). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
2. Borisov, B. D., Britvin, A. V., Plyusnin, V. F., & Poller, B. V. (2013). Characteristics of film-fiber modules for terrestrial-satellite laser communications // In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2013: IX Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii SibOptika-2013 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference SibOptics-2013. Diffraction and Interference Systems and Instruments] (pp. 77–80). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

3. Brithvin, A. V., Kusakina, A. E., & Poller, B. V. (2013). Experimental characteristics of the propagation of laser signals on horizontal and inclined paths in the Altai Mountains. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2013: IX Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*: T. 5(3). *SibOptika-2013 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 5(3). SibOptics-2013]* (pp. 108–110). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
4. Belov, V. V., Abramochkin, V. N., Gridnev, Y. V., et al. (2017). Bystatic optical-electronic coupling in the UV-range of wavelengths. Field experiments in 2016. *Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and the Ocean]*, 2, 111–114 [in Russian].
5. Tarasenkova, M. V., Belov, V. V., & Poznakharev, E. S. (2017). Modeling of the process of information transmission by atmospheric channels of scattered laser radiation propagation. *Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and the Ocean]*, 5, 10–15 [in Russian].
6. Britvin, A. V., Poller, A. B., Poller, B. V., & Shchetinin, Y. I. (2013). Structure and functionality of the laser information-sensory system for remote control of objects in hard-to-reach zones. In *Sbornik dokladov 19-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz" [Proceedings of 19th International Scientific and Technical Conference "Radiolocation, navigation, communication": Vol. 1]* (pp. 178–184). Voronezh: SACVOEE [in Russian].
7. Britvin, A. V., Glushkov, G. S., Nikitenko, N. S., et al. (2016). Questions of construction and the results of experimental studies of laser-radio-wave terrestrial and space communications and monitoring. In *Sbornik tezisov III-ey Vserossiiskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Sistemy svyazi i radionavigatsii" [Proceedings of III All-Russian Scientific and Technical Conference "Communication and Radio Navigation Systems"]* (pp. 387–390). Krasnoyarsk: JSC "Scientific and Production Enterprise "Radiosvyaz" [in Russian].
8. Alekseev, D. V., Britvin, A. V., Orlov, S. G., et al. (2008). On the properties of polymeric planar and fiber optical waveguides with microparticles and waist-necked. In *Sbornik materialov Geo-Sibir'-2008: IV Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*: T. 4, ch. 2 [Proceedings of GEO-Siberia-2008: IV International Scientific Congress: International Scientific Conference: Vol. 4, part 2] (pp. 22–26). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
9. Son'kin, M. A., & Yampol'sky, V. Z. (2010). *Integrirovannyye sistemy monitoringa dlya trudnodostupnykh i podvijnykh ob'ektov [Integrated monitoring systems for hard-to-reach and mobile objects]*. Tomsk: NTL Publishing [in Russian].
10. Kozintsev, V. I., et al. (2010). *Osnovy impul'snoy lazernoy lokatsii [Fundamentals of pulsed laser location]*. Moscow: Bauman MSTU [in Russian].
11. Amon, P., Riegl, U., Rieger, P., & Pfennigbauer, M. (2015). Application of laser scanning with UAV for monitoring complex and complex geodetic tasks. *Interekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia]*, 32–41 [in Russian].
12. Britvin, A. V., Zhumagulov, B. T., Kalimoldaev, M. N., et al. (2013). Complex systems for monitoring of oil pipelines on the basis of laser and film technologies. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and Transport]*, 3, 51–54 [in Russian].
13. Borisov, B. D., Britvin, A. V., Zverev, A. V., et al. (2013). Characteristics of the energy-information model and methods of constructing a telecommunication and quantum-cryptographic laser system of satellite communication. *Problemy informatiki [Problems of Informatics]*, 1, 69–75 [in Russian].
14. Britvin, A. V., Konyaev, S. I., Poller, B. V., & Shchetinin, U. I. (2011). About the characteristics of opto-radio-frequency retransmitters for laser terrestrial-space networks and communication lines in cloud conditions. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2011: VII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: T. 5, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2011: International Scientific Congress: Vol. 5, part 2]* (pp. 64–68). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

15. Britvin, A. V., Bakin, N. N., Povazhaev, A. V., et al. (2017). Research of optical parameters of experimental samples of ultraviolet light-emitting diodes for communication systems and control. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2017: XIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2017* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2017] (pp. 61–65). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
16. Britvin, A. V., Kusakina, A. E., Poller, B. V., et al. (2012). Characteristics of the conversion of optical signals in polymer films with phosphors, with iron nanoparticles. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2012: VIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. "Spetsializirovannoe priborostroenie, metrologiya, teplofizika, mikrotekhnika, nanotekhnologii"* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: VIII International Scientific Congress: Vol. 2. "Specialized Instrument Making, Metrology, Thermophysics, Microtechnology, Nanotechnology"] (pp. 22–26). Novosibirsk: SSGA [in Russian].
17. Butsenko, E. S., Ivanitsky, A. E., Kolchev, M. L., et al. (2013). Features of luminescent properties of polymer-luminophor compositions with a homogeneous distribution in a polymer matrix. *Vestnik TGPU [Vestnik TSPU]*, 8(136), 149–153 [in Russian].
18. Haipeng, D., Chen, G., Arun, K., Sadler, B. M., & Xu, Z. (2009). Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27(9), 1535–1544.
19. Han, D., Liu, Y., Zhang, K., Luo, P., Zhang, M. (2012). Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system. *Optics Express*, 20(14), 15833–15842.
20. Elshimy, M. A., & Hranilovic, S. (2011). Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries. *Journal of the Optical Society of America A*, 28(3), 420–428.

© *А. В. Бритвин, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, Б. В. Поллер, 2018*

АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ БЫСТРО ДВИГАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Артём Олегович Лебедев

Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник, тел. (952)948-99-82, e-mail: artem_leb@mail.ru

Борис Николаевич Новгородов

Филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, руководитель сектора ИТ, e-mail: mbo@mail.ru

Стабилизация видеоизображения является важной процедурой компьютерного зрения и визуального контроля. К программным методам относятся алгоритмы определения вектора смещения изображения выбранного кадра относительно опорного кадра и смещение изображения в обратном направлении. Однако, при наличии в поле зрения быстро движущегося объекта такие алгоритмы приводят к еще большей дестабилизации изображения. В работе предложен новый алгоритм программной обработки видеоизображения, который позволяет стабилизировать изображение в режиме реального времени при наличии в поле зрения быстро движущихся объектов. Для вычисления смещения изображения выбирается сетка реперных точек, при этом для вычислений используется два соседних кадра. Алгоритм заключается в идентификации движущихся объектов и исключения соответствующих им областей изображения из процедуры стабилизации. Продемонстрированы преимущества предложенного алгоритма перед стандартными алгоритмами стабилизации изображения.

Ключевые слова: видеосистема, видеонаблюдение, алгоритм обработки видеоизображения, стабилизация видеоизображения, компьютерное зрение.

STABILIZATION ALGORITHM OF VIDEO WITH FAST MOVING OBJECTS IN THE FIELD OF VISION

Artem O. Lebedev

Branch ISP SB RAS «TDIAM», 2/1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (952)948-99-82, e-mail: artem_leb@mail.ru

Boris N. Novgorodov

Branch ISP SB RAS «TDIAM», 2/1, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of IT Sector, e-mail: mbo@mail.ru

Video image stabilization is an important procedure for computer vision and visual inspection. Software methods include algorithms for determining the displacement vector of the selected frame image relative to the reference one. Then the image is shifted in the opposite direction. However, such algorithms lead to an even greater destabilization of the image in case when there is a fast moving object in the field of view. A new algorithm for video image processing is proposed, which allows stabilizing the image in real time mode in the presence of fast moving objects in the field of view. A grid of reference points is selected to calculate the image displacement, and two adjacent frames only are used for the calculation. The algorithm consists in the moving objects identification and excluding the image areas corresponding to them from the stabilization procedure. The advantages of the proposed algorithm over standard image stabilization algorithms are demonstrated.

Key words: video system, video surveillance, video processing algorithm, video image stabilization, computer vision, fast moving objects.

Введение

При использовании приборов видеонаблюдения, работающих в видимом и/или инфракрасном диапазоне, в нестационарных условиях возникает проблема неустойчивости видеоизображения, обусловленная вибрацией платформы, например, связанной с ветровой нагрузкой. Особенно сильно этот эффект влияет на качество наблюдения и распознавания при применении длиннофокусных объективов, когда незначительные колебания камеры приводят к заметной неустойчивости видеоизображения. Под стабилизацией изображений понимается комплекс мер, обеспечивающий оператору комфортное восприятие сцены, что необходимо для повышения качества наблюдения.

Процедура стабилизации изображения включает две последовательные операции: определение величины и направления сдвига изображения, связанного с «дрожанием» камеры, и обратный сдвиг кадра, компенсирующий первоначальный сдвиг. Под эффектом «дрожания» изображения подразумевается хаотичное движение камеры относительно любой из трех осей, проходящих через ее центр. Вращение относительно оптической оси проекционной системы камеры приводит к вращению кадра, остальные две оси дают смещение по горизонтали и вертикали. Методы стабилизации подразделяются на два основных класса: аппаратная стабилизация, при которой с помощью гироскопов или акселерометров стабилизируется положение линз объектива [1] обеспечивается неподвижность положения проекции изображения на фоточувствительной матрице камеры.

К программным методам стабилизации видеоизображения относятся алгоритмы оценки параметров межкадрового преобразования – в простейшем случае линейное смещение, в более сложных случаях также вращение, изменение масштаба изображения [2–7].

В наиболее часто используемых алгоритмах стабилизации видеоизображения используется анализ корреляционной функции между опорным кадром и последующими N кадрами [2]. Каждый последующий N -й кадр смещается на заданную величину $\Delta x + \Delta y$ относительно опорного кадра и рассчитывается корреляционная функция, например, вида [2]:

$$A(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i,j}^{W,H} (I_{i+\Delta x, j+\Delta y}^N - I_{i,j}^{опорн}), \quad \Delta x, \Delta y \in N(-M, +M),$$

где $A(\Delta x, \Delta y)$ – корреляционная функция; $\Delta x, \Delta y$ – сдвиг N -го кадра относительно опорного кадра в пикселях по вертикали и горизонтали, соответственно; W, H – ширина и высота кадра в пикселях, соответственно; $I_{i,j}$ – величины сигналов пикселей с координатами i, j ; M – целая константа, соответствующая максимальному сдвигу, определяется параметрами фотоприемника и условиями наблюдения.

Смещение, для которого $A(\Delta x, \Delta y)$ минимальна, и будет искомым смещением. Далее весь кадр смещается на величину $-\Delta x, -\Delta y$ и, тем самым, достигается стабилизация изображения.

При использовании широкоформатных матричных фотоприемников объем вычислений может получиться настолько громоздким, что не обеспечит режим реального времени видеопотока. Поэтому, для анализа смещения изображения, связанного с «дрожанием», выбирается фрагмент кадра (например, центральный). Размер фрагмента с одной стороны должен обеспечить режим реального времени, с другой – обеспечить требуемое качество стабилизации.

Недостатком данного алгоритма является то, что при попадании в анализируемый фрагмент изображения быстро движущегося объекта (например, грузовой автомобиль) размером, сопоставимым с размером фрагмента, происходит сдвиг кадр на величину смещения, обусловленную скоростью объекта, а не дрожанием камеры. При этом все изображение сильно дергается в направлении, противоположном движению объекта. В итоге наблюдается эффект, обратный стабилизации изображения.

Задачей данной работы являлась разработка алгоритма стабилизации видеоизображения учитывающего наличие в кадре быстро движущегося объекта достаточно большого размера и движение камеры оператором.

Описание алгоритма

В качестве объекта исследований была выбрана видеозапись автомобильной дороги с расстояния 5,5 км, полученной видеокамерой на штативе. При видеозаписи камеру раскачивало ветром, что обуславливало «дрожание» изображения. На рис. 1 показана зависимость модуля величины смещения кадра в пикселях, связанного с «дрожанием», от номера кадра. Из рисунка видно, что смещение достигает 14 пикселей, что вызывает дискомфорт при наблюдении сцены.

Для реализации алгоритма на изображении выбиралась сетка реперных точек (рис. 2). Далее анализ оптического потока [8–9] проводился только по этим точкам. Количество реперных точек на изображении зависит от производительности видеопроцессора и должно обеспечивать режим реального времени: 25 кадров в секунду. Вычисляется среднее значение вектора смещения реперных точек ($\Delta x_{cp} + \Delta y_{cp}$), между двумя соседними кадрами и определяются точки со смещением, больше среднего значения на заданную величину ($\Delta x + \Delta y = \Delta x_{cp} + \Delta y_{cp} + \text{const}$). Если заданное число соседних реперных точек имеют величину смещения выше средней на заданную величину, то считается, что эти точки относятся к быстро движущемуся объекту (область, связанная с движущимся грузовиком, выделена прямоугольником) и исключаются из дальнейшего анализа. Число соседних реперных точек, по которым определяется наличие в кадре быстро движущегося объекта, задается задачей наблюдения и размером сетки реперных точек. Это может быть одна-две соседние реперные точки при крупной сетке или группа соседних точек при мелкой сетке. Стрелка в центре прямоугольника показывает направление и величину смещения точек в области прямоугольника. По остальным точкам определяется медианное значение вектора смещения, которое использовалось для процедуры стабилизации изображения.

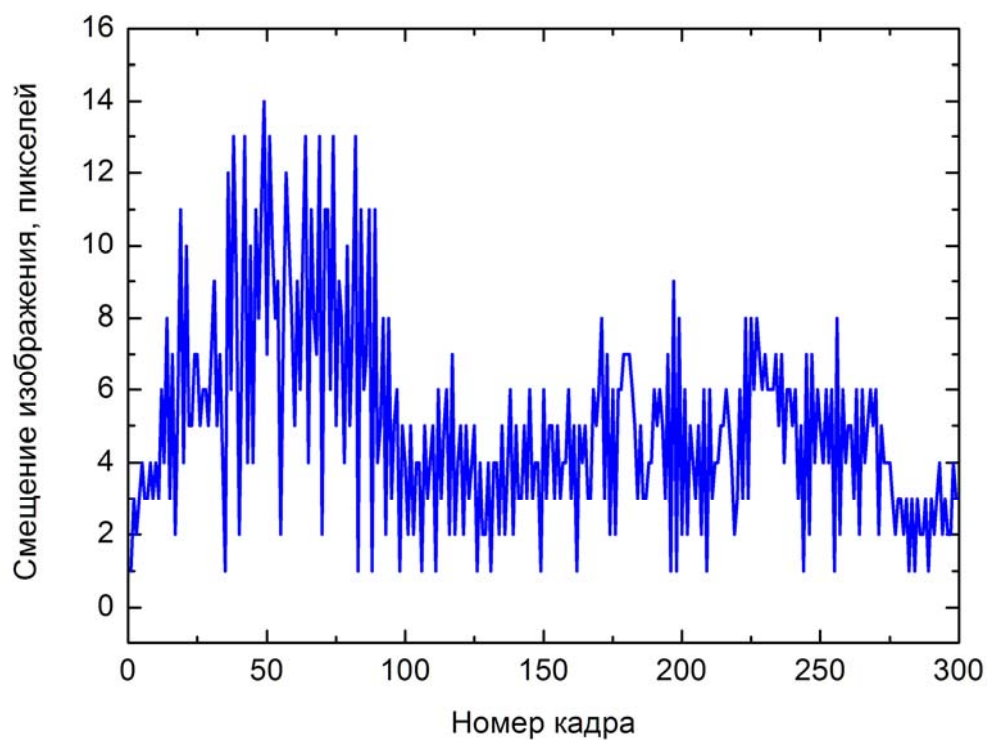


Рис. 1. Зависимость величины исходного смещения изображения от номера кадра



Рис. 2. Кадр изображения с быстро двигающимся объектом: точки на изображении соответствуют реперным точкам, используемым для анализа видеопотока; грузовой автомобиль выделен прямоугольником; стрелка в центре прямоугольника показывает направление и величину смещения грузовика

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показана исходная зависимость величины смещения изображения от номера кадра (кривая 1) на 50-ти кадрах, в течение которых в поле зрения проезжает грузовой автомобиль. Кривая 2 соответствует стандартному корреляционному методу, который хорошо стабилизирует изображение при отсутствии быстро движущихся объектов. В момент появления в кадре грузового автомобиля на зависимости видны всплески, соответствующие смещению изображения, связанному не с «дрожанием», а с наличием движущегося объекта. Кривая 3 соответствует предложенному алгоритму стабилизации изображения, на которой отсутствуют всплески, что показывает отсутствие влияния движущегося объекта на процедуру стабилизации. Тем не менее, следует отметить, что на остальных участках видеопотока стабилизация несколько хуже, чем для корреляционного метода. Поэтому алгоритм требует дальнейшей оптимизации.

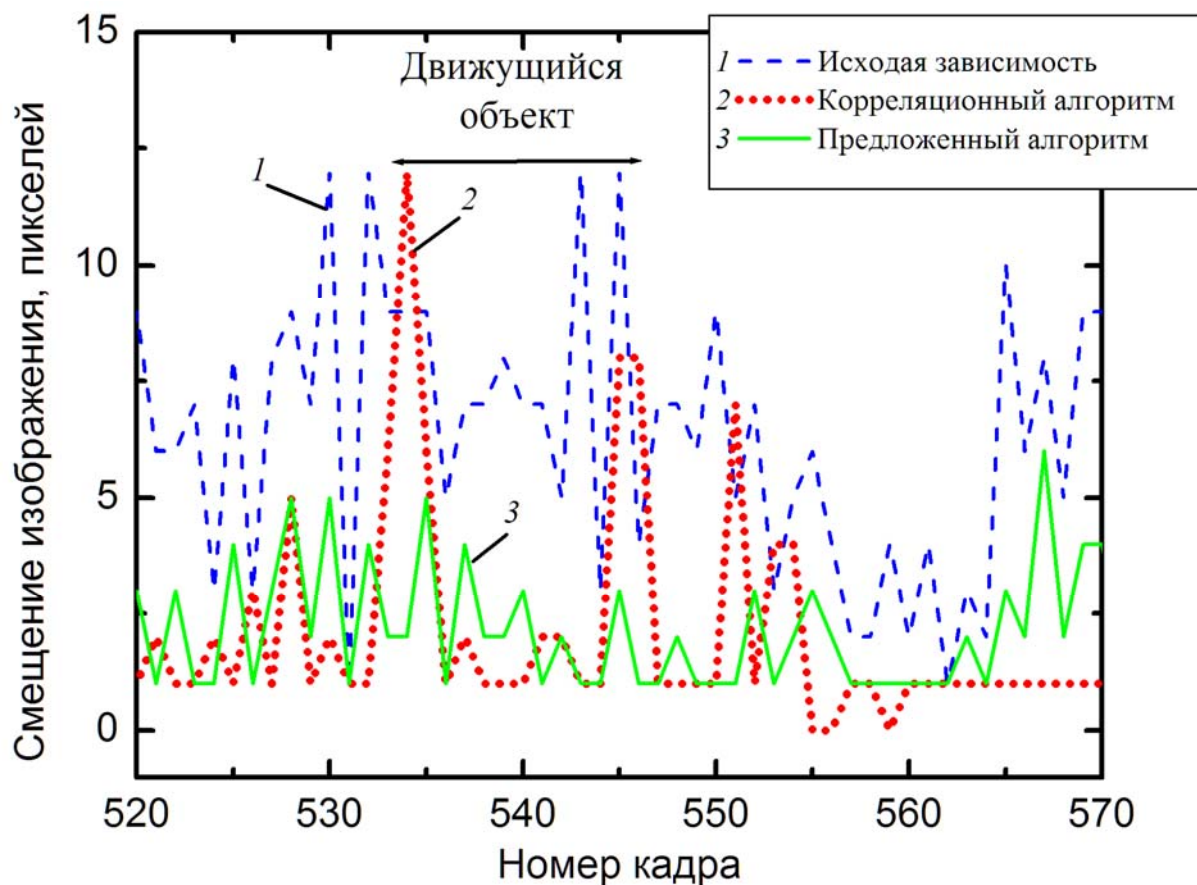


Рис. 3. Зависимости величины смещения изображения от номера кадра: 1 – исходная зависимость (пунктирная линия); 2 – применение корреляционного алгоритма (точечная линия); 3 – применение предложенного алгоритма (сплошная линия)

Заключение

В итоге, в работе предложен алгоритм стабилизации видеоизображения в режиме реального времени в условиях, когда в сцене наблюдаются быстродвигающиеся объекты. В приборах с реконфигурируемыми вычислительными платформами возможно использование нескольких алгоритмов обработки изображения без изменения аппаратной части. Выбор алгоритма осуществляется оператором нажатием соответствующей кнопки или выбором алгоритма из меню программы. Предложенный алгоритм может использоваться в таких системах как дополнительная возможность получения стабилизированных видеоизображений в условиях, когда в поле зрения появилисьдвигающиеся объекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. La Rosa Fabrizio, Celvisia Virzì Maria, Bonaccorso Filippo, Branciforte Marco. Optical Image Stabilization (OIS) // STMicroelectronics [Электронный ресурс]. URL: www.st.com/resource/en/white_paper/ois_white_paper.pdf
2. Курчанов Г. О., Шведов А. П. Система цифровой стабилизации видеоизображения на базе экстремально-корреляционного метода поиска // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 10. – С. 103–111.
3. Поляков Д. Б. Блочные алгоритмы оценки движения // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tvs-mtuci.ru/attachments/article/19/Blochnye%20algoritmy%20ocenki%20dvizhenija.pdf>
4. Буряченко В. В. Стабилизация видео для статичной сцены на базе модифицированного метода соответствия блоков // Вестник СибГАУ. – 2012. – № 3(43). – С. 10–15.
5. Grundmann Matthias, Kwatra Vivek, Essa Irfan. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-2011) – 2011. – P. 225–232.
6. Brox T., Bruhn A., Papenberger N., and Weickert. J. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping // Proceedings of European Conference on Computer Vision. – 2004. – P. 25–36.
7. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. – М. : «Мир», 1989. – 358 с.
8. Shi J. and Tomasi C. Good Features to Track // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1994. – P. 593–600.
9. Lucas B. D. and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of Imaging Understanding Workshop. – 1981. – P. 121–130.

REFERENCES

1. La Rosa, F., Celvisia, V. M., Bonaccorso, F., & Branciforte M. Optical Image Stabilization (OIS). STMicroelectronics. URL: www.st.com/resource/en/white_paper/ois_white_paper.pdf
2. Kurchanov, G. O., & Shvedov A. P. (2016). Digital image stabilization system based on the method of extreme-correlation search. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [News of Tula State University. Engineering Sciences], 10, 103–111 [in Russian].
3. Polyakov, D. B. Block algorithms for motion estimation. URL: <http://www.tvs-mtuci.ru/attachments/article/19/Blochnye%20algoritmy%20ocenki%20dvizhenija.pdf> [in Russian].
4. Buryachenko V. V. (2012). Stabilization of video for a static scene on the basis of a modified block matching method. Vestnik SibGAU [Bulletin of the Reshetnev Siberian State Aerospace University], 3(43), 10–15 [in Russian]

5. Grundmann, M., Kwatra, V., & Essa, I. (2011). Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-2011), 225–232.
6. Brox, T., Bruhn, A., Papenberg, N., & Weickert, J. (2004) High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping. In Proceedings of European Conference on Computer Vision, 25–36.
7. Horn, B. K. P. (1989). Zrenie robotov [Vision of robots]. Moscow: Mir [in Russian].
8. Shi, J., & Tomasi, C. (1994). Good Features to Track. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 593–600.
9. Lucas, B. D., & Kanade, T. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 121–130.

© A. O. Лебедев, Б. Н. Новгородов, 2018

РЕГИСТРАЦИЯ И РАСШИФРОВКА ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Владимир Иванович Гужов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных, тел. (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

Сергей Петрович Ильиных

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, тел. (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Хайдуков

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, ассистент кафедры систем сбора и обработки данных, тел. (383)346-08-46, e-mail: demon-angelok@yandex.ru

В статье описана система для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. Для расшифровки используется преобразование Френеля. В отличие от классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии можно получить комплексную математическую голограмму, которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля. Значения амплитуд и фаз находят по серии голограмм с помощью методов пошагового фазового сдвига. Комплексная амплитуда рассеянного от объекта поля восстанавливается преобразованием Френеля над математической голограммой. Приведена оптическая схема голографической установки. Показаны результаты регистрации и восстановления цифровой голограммы.

Ключевые слова: голография, оптическая микроскопия, интерференция, цифровая голография, преобразование Френеля, преобразование Фурье, пошаговый фазовый сдвиг.

REGISTRATION AND DECODING OF DIGITAL HOLOGRAMS

Vladimir I. Guzhov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, Department of Systems for Data Collection and Processing, phone: (383)346-08-46, e-mail: vigguzhov@gmail.com

Sergej P. Ilinykh

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Computer Engineering, phone: (383)346-04-92, e-mail: isp51@yandex.ru

Dmitrij S. Hajdukov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Assistant Professor, Department of Systems for Data Collection and Processing, phone: (383)346-08-46, e-mail: demon-angelok@yandex.ru

The article describes the system for registration and decryption of digital holograms by the method of step-by-step phase shift. The Fresnel transform is used for decryption. In contrast to the

classical holograms, which represent a picture of the intensity, using digital holography it is possible to obtain a complex mathematical hologram, which consists of the amplitude and phase of the object field. The values of amplitudes and phases are found by a series of holograms using the methods of step-by-step phase shift. The complex amplitude of the scattered field from the object is restored by Fresnel transformation over a mathematical hologram. The optical scheme of holographic installation is given. Results of registration and restoration of the digital hologram are shown.

Key words: holography, optical microscopy, interference, digital holography, Fresnel transform, Fourier transform, phase sampling, phase shifting interferometry, PSI.

Введение

Современные методы экспериментального исследования геометрической формы различного рода объектов, широко используют методы цифровой голографии [1–12]. Основной проблемой при восстановлении голограмм является перекрытие нулевым порядком дифракции действительного и мнимого изображений. Э. Лейт и Ю. Упатниекс нашли решение проблемы, увеличив угол между интерферирующими пучками [13]. Это позволило получать изображения, которые при наблюдении не перекрываются. Для такой схемы при угле между интерферирующими полосами в 30 градусов необходим регистрирующий материал с разрешающей способностью не менее 0,5 мкм. Цифровые матрицы фотоприемников не могут на текущий момент обеспечить столь высокое пространственное разрешение. Поэтому при использовании методов цифровой голографии приходится уменьшать угол между интерферирующими волновыми полями, что неизбежно приводит к перекрытию спектров в разных дифракционных порядках.

Целью статьи является описание системы для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. В качестве регистратора используется матрица фотоприемников.

Получение и расшифровка цифровых голограмм

В отличие от регистрации классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии можно получить комплексную математическую голограмму [14], которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля:

$$G(x, y) = a_p(x, y) \exp(\varphi_p(x, y)), \quad (1)$$

где $a_p(x, y)$ – амплитуда поля, $\varphi_p(x, y)$ – фаза поля, распространенного от объекта в плоскости голограммы (η, ξ) .

Найти значения амплитуды и фазы можно по набору голограмм (картин интерференции объектного и опорного пучков регистрируемых в плоскости

цифровой матрицы фотодетекторов) с помощью методов пошагового фазового сдвига (phase sampling, phase shifting interferometry – PSI).

Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны на известную величину. Фазовый сдвиг между интерферирующими пучками может быть реализован различными способами. Наиболее часто фазовый сдвиг задается с помощью зеркала, закрепленного на пьезокерамике. В зависимости от числа фазовых сдвигов существуют различные алгоритмы расшифровки.

Анализируя интерференционные картины можно найти распределение разности фаз $\phi(x, y)$ интерферирующих пучков [15-18].

Зная разность фаз $\phi(x, y)$ и фазу опорной волны $\phi_r(x, y)$, можно определить и исходное фазовое распределение $\phi_p(x, y)$.

$$\phi_p(x, y) = \phi(x, y) - \phi_r(x, y) \quad (2)$$

Для формирования математической голограммы необходимо также определить амплитуду волнового поля $a_p(x, y)$, отраженного от объекта, в плоскости голограммы. Значения амплитуд объектного и опорного пучка можно определить перекрытием соответствующих пучков в оптической схеме. По уже имеющемуся набору голограмм с фазовым сдвигом можно определить амплитуду объектного пучка получить методом пошагового сдвига, используя этот же набор голограмм [19, 20].

Из математической голограммы $G(x, y)$ можно восстановить комплексную амплитуду поля рассеянного от объекта. Комплексную амплитуду $\Gamma(r, s)$ можно определить с помощью преобразование Френеля над $G(x, y)$ [21, 22]:

$$\begin{aligned} \Gamma(r, s) = & \frac{1}{i\lambda d} \exp\left[i\frac{2\pi d}{\lambda}\right] \exp\left[i\frac{\pi[(r\Delta\xi)^2 + (s\Delta\eta)^2]}{\lambda d}\right] \times \\ & \times \sum_k^{N_x-1} \sum_l^{N_y-1} b_1(k, l) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}[(k\Delta\xi)^2 + (l\Delta\eta)^2]\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{N}(kr + ls)\right] \end{aligned} \quad (3)$$

где d – расстояние от голограммы до плоскости восстановления, λ – длина волны, N – число точек при оцифровке голограммы, $\Delta\xi = 2X_{\max} / N$ и $\Delta\eta = 2Y_{\max} / N$ – размер одного дискретного значения, $X_{\max}$ и $Y_{\max}$ – размер оцифрованного участка голограммы.

Отметим, что (3) восстанавливает только одно изображение и проблемы с перекрытием пучков не возникает. Алгоритм преобразования Френеля обеспечивает простое масштабирование восстановленного изображения, однако это накладывает ряд ограничений на конструкцию измерительной системы, в част-

ности, верхняя и нижняя границы допустимого расстояния от плоскости объекта до плоскости записи голограммы становятся значимым фактором [23].

Экспериментальная установка

Оптическая схема регистрации цифровых голограмм показана на рис. 1.

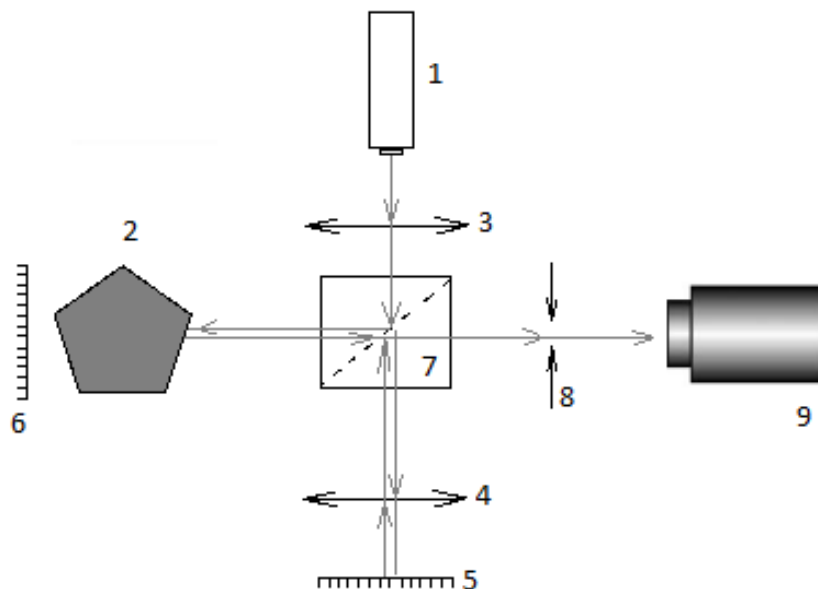


Рис. 1. Схема записи цифровой голограммы:

лазер – 1; объект – 2; коллиматор – 3; фильтр – 4; зеркала – 5, 6; разделительный кубик – 7; диафрагма – 8; фотокамера – 9

В качестве объекта использовался юбилейный серебряный значок с эмблемой Новосибирского государственного технического университета. На рис. 2 показаны результаты интерференции между опорным и объектным пучками при изменении фазового угла сдвига $\delta_1 = 0^\circ$, $\delta_2 = 90^\circ$, $\delta_3 = 180^\circ$, $\delta_4 = 270^\circ$. Интерференционные картины проецировались непосредственно на цифровую матрицу фотоприемника.

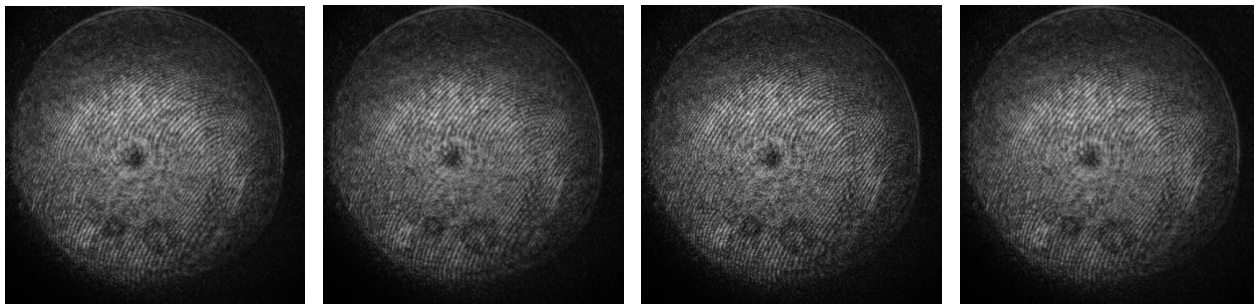


Рис. 2. Интерференционные картины при изменении фазового угла сдвига

$\delta_1 = 0^\circ$, $\delta_2 = 90^\circ$, $\delta_3 = 180^\circ$, $\delta_4 = 270^\circ$

Фаза и амплитуда определялись по алгоритму [18–20], затем формировалась математическая голограмма (1). На рис. 3 показаны амплитуда $a_p(x, y)$ и фаза $\varphi_p(x, y)$ математической голограммы.

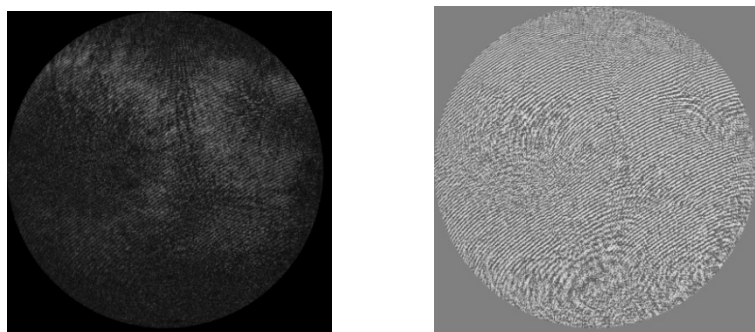


Рис. 3. Амплитуда и фаза математической голограммы

Действительное изображение восстанавливалось по математической голограмме с помощью преобразования Френеля. Размер объекта составляет 7 мм, расстояние до объекта равно 135 мм. Результат восстановления показан на рис. 4.



Рис. 4. Восстановленная амплитуда (слева) и исходный объект (справа)

Низкое качество при восстановлении изображения на рис. 4 вызвано отклонением профиля опорного пучка от плоского.

Заключение

Разработана система для регистрации и расшифровки цифровых голограмм методом пошагового фазового сдвига. Цифровая голография в отличие от классических голограмм, которые представляют картину интенсивностей, при использовании цифровой голографии регистрируют комплексную математическую голограмму, которая состоит из амплитуды и фазы объектного поля. Значения амплитуды и фазы определяются по набору серии голограмм с помощью

методов пошагового фазового сдвига. Преобразование Френеля над комплексной математической голограммой восстанавливает комплексную амплитуду поля, рассеянного от объекта. Приведена оптическая схема голографической установки. Показаны результаты регистрации и восстановления цифровой голограммы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка и исследование методов компьютерной голографической интерферометрии объектов сложной формы» (Грант № 18-08-00580).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xu Xianfeng, Zhang Zhiwei, Wang Zecheng, Wang Jing, Zhan Kaiyun, Jia Yulei, Jiao Zhiyong. Robust digital holography design with monitoring setup and reference tilt error elimination // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57. – P. B205–B211.
2. Byeon Hyeokjun, Go Taesik, Lee Sang Joon. Digital stereo-holographic microscopy for studying three-dimensional particle dynamics // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 6–13.
3. Yao Longchao, Chen Jun, Sojka Paul E., Wu Xuecheng, Cen Kefa. Three-dimensional dynamic measurement of irregular stringy objects via digital holography // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43. – P. 1283–1286.
4. Häussler R., Leister N., Stolle H. Large holographic 3D display for real-time computer-generated holography // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10335. – P. 103350X.
5. Banerjee Partha P., Osten Wolfgang, Pascal Picart, Cao Liangcai, Nehmetallah George. Digital Holography and 3D Imaging // *Journal of the Optical Society of America*. – 2017. – Vol. B 34. – P. DH1–DH4.
6. Abdelsalam D. G., Yasui Takeshi. High brightness, low coherence, digital holographic microscopy for 3D visualization of an in-vitro sandwiched biological sample // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – P. F1–F6.
7. Gómez M., Lobera J., Arroyo M. P., Andres N., Pallarés J., Palero V. R. Digital Holography for the analysis of the migration and deposition of magnetic particles on the walls of microchannels // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (online)*. – 2017. – paper Tu2A.3.
8. Soumaya Kara Mohammed, Larbi Bouamama, Derradji Bahloul, Pascal Picart. Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – P. F158–F166.
9. Tahara Tatsuki, Otani Reo, Omae Kaito, Gotohda Takuya, Arai Yasuhiko, Takaki Yasuhiro. Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25. – P. 11157–11172.
10. Öhman Johan, Sjö Dahl Mikael. Off-axis digital holographic particle positioning based on polarization-sensitive wavefront curvature estimation // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – P. 7503–7510.
11. Wu Yumin, Song Guoqing, Feng Yunpeng. Development and Application of Digital Holographic Microscopy in Biomedicine // *Imaging Science and Photochemistry*. – 2016. – Vol. 34 (1). – P. 23–29.
12. Kim Myung K. Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy // *Journal of the Optical Society of Korea*. – 2010. – Vol. 14 (2). – P. 77–89.
13. Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory // *Journal of the Optical Society of America*. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.

14. Ярославский Л. П., Мерзляков Н. С. Цифровая голография. – М. : Наука, 1982. – 219 с.
15. Гужов В. И., Ильиных С. П. Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия : учеб. пособие. – М. : Юрайт, 2-е издание, 2018. – 258 с.
16. Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry / V. Guzhov, S. Ilinykh, R. Kuznetsov, D. Haydukov // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52 (3). P. 030501-1–030501-2.
17. Гужов В. И., Ильиных С. П., Хайдуков Д. С., Вагизов А. Р. Универсальный алгоритм расшифровки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 4 (41) – С. 51–58.
18. Ильиных С. П., Гужов В. И. Обобщенный алгоритм расшифровки интерферограмм с пошаговым сдвигом // Автометрия. – 2002. – № 3. – С. 123–126.
19. Гужов В. И., Ильиных С. П., Хайбулин С. В. Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 101–106.
20. Гужов В. И., Ильиных С. П. Определение интенсивности опорного и объектного пучков при использовании метода пошагового фазового сдвига // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 4 (22). – С. 68–73.
21. Представление преобразования Френеля в дискретном виде / В. И. Гужов, Р. Б. Несин, В. А. Емельянов // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 1 (15). – С. 91–96.
22. Williams L. A., Nehmetallah G., Aylo R., Banerjee P. P. Application of up-sampling and resolution scaling to Fresnel reconstruction of digital holograms // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54 (6). P. 1443–1452.
23. Область возможного применения дискретных преобразований Фурье и Френеля / В. И. Гужов, В. А. Емельянов, Д. С. Хайдуков // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 1 (15). – С. 97–103.

REFERENCES

1. Xu, X., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, J., Zhan, K., Jia, Y., & Jiao Z. (2018). Robust digital holography design with monitoring setup and reference tilt error elimination. *Applied Optics*, 57, B205–B211.
2. Byeon, H., Go, T., & Lee S. J. (2018). Digital stereo-holographic microscopy for studying three-dimensional particle dynamics. *Optics and Lasers in Engineering*, 105, 6–13.
3. Yao, L., Chen, J., Sojka, P. E., Wu, X., & Cen, K. (2018). Three-dimensional dynamic measurement of irregular stringy objects via digital holography. *Optics Letters*, 43, 1283–1286.
4. Häussler, R., Leister, N., & Stolle H. (2017). Large holographic 3D display for real-time computer-generated holography. *Proceedings of SPIE*, Vol. 10335, 103350X.
5. Banerjee, P. P., Osten, W., Pascal, P., Cao, L., & Nehmetallah, G. (2017). Digital Holography and 3D Imaging: introduction to the joint feature issue in *Applied Optics* and *Journal of the Optical Society of America B*. *Journal of the Optical Society of America B* 34, DH1–DH4.
6. Abdelsalam, D. G., & Yasui, T. (2017). High brightness, low coherence, digital holographic microscopy for 3D visualization of an in-vitro sandwiched biological sample. *Applied Optics*, 56, F1–F6.
7. Gómez, M., Lobera, J., Arroyo, M. P., Andres, N., Pallarés, J., & Palero, V. R. (2017). Digital Holography for the analysis of the migration and deposition of magnetic particles on the walls of microchannels. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (online), paper Tu2A.3. <https://doi.org/10.1364/DH.2017.Tu2A.3>
8. Soumaya, K. M., Larbi, B., Derradji, B., & Pascal, P. (2017). Quality assessment of refocus criteria for particle imaging in digital off-axis holography. *Applied Optics*, 56, F158–F166.
9. Tahara, T., Otani, R., Omae, K., Gotohda, T., Arai, Y., & Takaki, Y. (2017). Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts. *Optics Express*, 25, 11157–11172.

10. Öhman, J., & Sjö Dahl, M. (2016). Off-axis digital holographic particle positioning based on polarization-sensitive wavefront curvature estimation. *Applied Optics*, 55, 7503–7510.
11. Wu, Y., Song, G., & Feng, Y. (2016). Development and Application of Digital Holographic Microscopy in Biomedicine. *Imaging Science and Photochemistry*, 34(1), 23–29.
12. Kim, Myung K. (2010). Applications of Digital Holography in Biomedical Microscopy. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(2), 77–89.
13. Leith, E. N., & Upatnieks, J. (1962). Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52, 1123–1130.
14. Yaroslavsky, L. P., & Merzlyakov, N. S. (1982). *Tsifrovaya golografiya* [Digital holography]. Moscow: Science [in Russian].
15. Guzhov, V. I., & Ilinykh, S. P. (2018). *Opticheskie izmereniya. Komp'yuternaya interferometriya* [Optical measurements. Computer interferometry]. Moscow: Yurayt, 2-nd edition [in Russian]. ISBN: 978-5-534-06855-9.
16. Guzhov, V., Ilinykh, S., Kuznetsov, R., & Haydukov, D. (2013). Generic Algorithm of Phase Reconstruction in Phase-Shifting Interferometry. *Optical Engineering*, 52(3), 030501-1–030501-2.
17. Guzhov, V. I., Ilinykh, S. P., Khaydukov, D. S., & Vagizov, A. R. (2010). Universal Decryption Algorithm. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Bulletin NSTU], 4(41), 51–58 [in Russian].
18. Ilyinykh, S. P., & Guzhov, V. I. (2002). A Generalized Decoding Algorithm for Interferograms using Phase Stepping. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 3, 103–106.
19. Guzhov, V. I., Ilinykh, S. P., & Khaibullin, S. V. (2017). Phase Information Recovery Based on the Methods of Step-By-Step Phase Shear with Small Angles between Interfering Beams. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(3), 288–293.
20. Guzhov, V. I., & Ilyinykh, S. P. (2017). Determination of the Intensity of the Reference and Object Beams when Using the Phase-Shift Interferometry. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Enginery], 4(22), 68–73 [in Russian].
21. Guzhov, V. I., Nesin, R. B., & Emelyanov, V. A. (2016). Presentation of Fresnel Transform in the Discrete Form. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Enginery], 1(15), 91–96 [in Russian].
22. Williams, L. A., Nehmetallah, G., Aylo, R., & Banerjee, P. P. (2015). Application of Up-sampling and Resolution Scaling to Fresnel Reconstruction of Digital Holograms. *Applied Optics*, 54(6), 1443–1452.
23. Guzhov, V. I., Emelyanov, V. A., & Hajdukov, D. S. (2016). The Area of Possible Application of Discrete Fourier transform. *Avtomatika i Programmnaya Injeneriya* [Automatics & Software Enginery], 1(15), 97–103. [in Russian].

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Д. С. Хайдуков, 2018

ОПТИМИЗАЦИЯ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СПЕКТРАЛЬНАЯ СЕЛЕКЦИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ Yb, Er: LiNbO₃

Николай Николаевич Налбантов

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, аспирант кафедры оптоэлектроники, тел. (929)854-39-72, e-mail: nick.nalbantov@gmail.com

Андрей Андреевич Квас

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, аспирант кафедры оптоэлектроники, тел. (861)219-96-20, e-mail: andkvas@yandex.ru

Елена Валерьевна Строганова

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптоэлектроники, тел. (928)423-12-35, e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Рассмотрены квантовая эффективность различных энергетических переходов в неоднородно-легированном лазерном кристалле Yb, Er: LiNbO₃ и динамика их изменения во времени и вдоль длины активной среды. Рассчитаны оптимальные параметры диэлектрических пленок из SiO₂-TiO₂ для селекции 1,5- и 3-микронного излучения лазера на основе Yb, Er: LiNbO₃.

Ключевые слова: градиентно-активированные кристаллы, концентрационные профили оптических центров, спектрально-люминесцентные свойства, оксидные пленки, селекция излучения.

OPTIMISATION OF QUANTUM EFFICIENCY AND SPECTRAL SELECTION OF IR-RADIATION BY NON-UNIFORMLY DOPED Yb, Er: LiNbO₃ CRYSTALS

Nikolai N. Nalbantov

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Ph. D. Student, Department of Optoelectronics, phone: (929)854-39-72, e-mail: nick.nalbantov@gmail.com

Andrey A. Kvas

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Ph. D. Student, Department of Optoelectronics, phone: (861)219-96-20, e-mail: andkvas@yandex.ru

Elena V. Stroganova

Kuban State University, 149, Stavropolskaya St., Krasnodar, 350040, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Optoelectronics, phone: (928)423-12-35, e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Quantum efficiencies of several key energy transitions in non-uniformly doped Yb, Er: LiNbO₃ laser crystal were studied and calculated in spatial and time domain. Optimal properties of SiO₂-TiO₂ dielectric films for frequency selection of 1.5μ and 3μ laser radiation of Yb, Er: LiNbO₃ crystals were obtained.

Key words: non-uniformly doped crystals, concentration profiles of optical centers, spectral and kinetic properties, oxide films, spectral selection.

Введение

Как известно, традиционным способом повышения эффективности лазерной генерации ионов эрбия является дополнительное легирование матрицы ионами иттербия, что позволяет значительно повысить уровень поглощенной энергии оптической накачки [1–5]. Другой известной технологией, позволяющей повысить энергетическую эффективность DPSS-лазеров [6], является градиентное легирование [7–9]. В данной работе предлагается рассмотреть объединение указанных концепций, а также дальнейшую оптимизацию процесса повышения эффективности многоканальных твердотельных лазеров на основе Yb, Er: LiNbO₃ при помощи узкополосной селекции излучения в оптическом резонаторе.

Эксперимент

В качестве объекта исследований был избран нелинейный кристалл ниобата лития с различными концентрационными профилями редкоземельных ионов Yb³⁺ и Er³⁺ (рис. 1) [10]. Концентрационные профили имеют вид, описываемый функцией зависимости концентрации оптических центров от продольной координаты кристалла, и соответствуют следующим аналитическим выражениям:

$$C_{Yb}(z) = C_{1\%} \cdot (0.0205 \cdot z^3 - 0.118 \cdot z^2 - 0.0372 \cdot z + 1.2089) \quad (1)$$

$$C_{Er}(z) = C_{1\%} \cdot (-0.0098 \cdot z^3 + 0.0511 \cdot z^2 + 0.0221 \cdot z + 0.0205) \quad (2)$$

где $C_{1\%}$ – концентрация примеси в кристаллической решетке LiNbO₃, соответствующая 1 % ат.

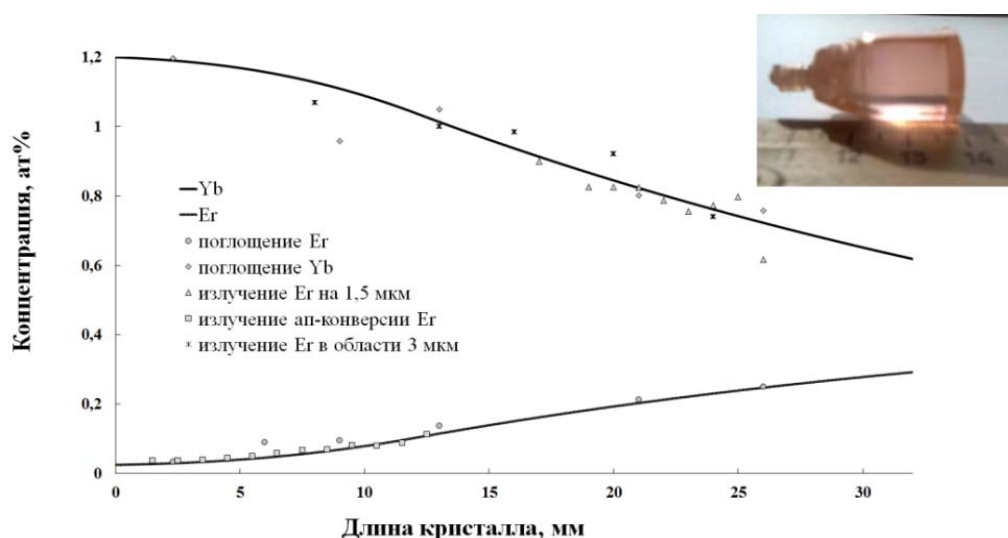


Рис. 1. Концентрационные профили активных ионов: Yb³⁺ (вверху) и Er³⁺ (внизу)

Для оценки пространственно-временной динамики квантовой эффективности люминесценции в неоднородно-легированном кристалле была решена система кинетических уравнений, ранее описанная в работе [11]. В процессе моделирования излучательных и безызлучательных релаксационных каналов были задействованы населенности N_i энергетических уровней ионов Yb^{3+} ($^4\text{F}_{5/2}$ (N_1) и $^4\text{F}_{7/2}$ (N_2)), а также населенности энергетических уровней ионов Er^{3+} , с учетом процессов ап-конверсии ($^4\text{F}_{7/2}$, $^4\text{H}_{11/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$ – (N_7); $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$ – (N_6); $^4\text{I}_{11/2}$ – (N_5); $^4\text{I}_{13/2}$ – (N_4) и $^4\text{I}_{15/2}$ – (N_3)) [12].

Из решения данной системы были получены выражения для квантовых эффективностей следующих энергетических процессов (3-6): $\eta_{2\text{в}}$ – прямой перенос энергии Yb ($^2\text{F}_{5/2}$) – Er ($^4\text{I}_{11/2}$); $\eta_{5\text{в}}$ – энергетический переход $^4\text{I}_{11/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ ионов эрбия (безызлучательный); η_4 – излучательный распад энергетического состояния $^4\text{I}_{11/2}$ (Er) (излучение в области 2,9 мкм); $\eta_{\text{в}}$ – излучательный распад энергетического состояния $^4\text{I}_{13/2}$ (Er) (излучение в области 1,5 мкм).

$$\eta_{2\text{в}}(t, z) = \frac{C_{2\text{в}} N_2(t, z) N_1(t, z) - C_{2\text{т}} N_2(t, z) N_1(t, z) - \sigma_{\text{Yb,em}} N_2(t, z) \varphi(t)}{\sigma_{\text{Yb,abs}} N_1(t, z) \varphi(t) + C_{5\text{в}} N_2(t, z) N_1(t, z)}, \quad (3)$$

$$\eta_{5\text{в}}(t, z) = \frac{(A_{5\text{в}} + W_{5\text{в}}) N_5(t, z)}{[\sigma_{\text{Er,abs}} N_5(t, z) - \sigma_{\text{ESA}} N_5(t, z)] \varphi(t) + A_{7\text{в}} N_7(t, z) + (A_{6\text{в}} + W_{6\text{в}}) N_6(t, z) + C_{2\text{в}} N_2(t, z) N_1(t, z)}, \quad (4)$$

$$\eta_4(t, z) = \frac{A_{4\text{м}} N_4(t, z) - C_{4\text{в}} N_4(t, z) N_2(t, z)}{A_{7\text{в}} N_7(t, z) + A_{6\text{в}} N_6(t, z) + (A_{5\text{в}} + W_{5\text{в}}) N_5(t, z)}, \quad (5)$$

$$\eta_{\text{в}}(t, z) = \frac{A_{5\text{в}} N_5(t, z)}{[\sigma_{\text{Er,abs}} N_5(t, z) - \sigma_{\text{ESA}} N_5(t, z)] \varphi(t) + A_{7\text{в}} N_7(t, z) + (A_{6\text{в}} + W_{6\text{в}}) N_6(t, z) + C_{2\text{в}} N_2(t, z) N_1(t, z)}, \quad (6)$$

где A_{ij} – постоянная времени радиационного распада i -ого энергетического состояния в j -ое состояние, с^{-1} ; W_{ij} – постоянная времени безызлучательного распада i -ого энергетического состояния в j -ое состояние, с^{-1} ; C_{ij} – коэффициент эффективности переноса энергии, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; A_i – постоянная времени распада i -ого энергетического состояния, с^{-1} ; σ_{Ybabs} , σ_{Erabs} – сечения поглощения ионов иттербия и эрбия на длине волны накачки, соответственно; $\sigma_{2\text{ph}}$, σ_{ESA} – сечения ап-конверсионных процессов для ионов эрбия: двухфотонного поглощения и поглощения энергии возбужденными состояниями (ESA – excited-state absorption), соответственно; $N_i(t)$ – концентрация ионов в i -м энергетическом состоянии (рис. 2), см^{-3} ; $\varphi(t)$ – форма временного профиля накачки в единицах плотности потока фотонов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

На основании полученных выражений были рассчитаны квантовые эффективности излучения ионов эрбия с длинами волн $\lambda \approx 1,5$ мкм и $\lambda \approx 2,9$ мкм относительно входящего потока оптической накачки:

$$\eta_{1,2\text{в}}(t, z) = \eta_{2\text{в}}(t, z) \cdot \eta_{5\text{в}}(t, z) \cdot \eta_4(t, z), \quad (7)$$

$$\eta_{\text{в}}(t, z) = \eta_{2\text{в}}(t, z) \cdot \eta_{\text{в}}(t, z). \quad (8)$$

Результаты аналитического решения уравнений (7) и (8) представлены на рис. 2 (а, б), из которых видно, что пиковое значение квантовой эффективности 1,5-микронного излучения достигает 73,5%, а 2,9-микронного – 0,33%.

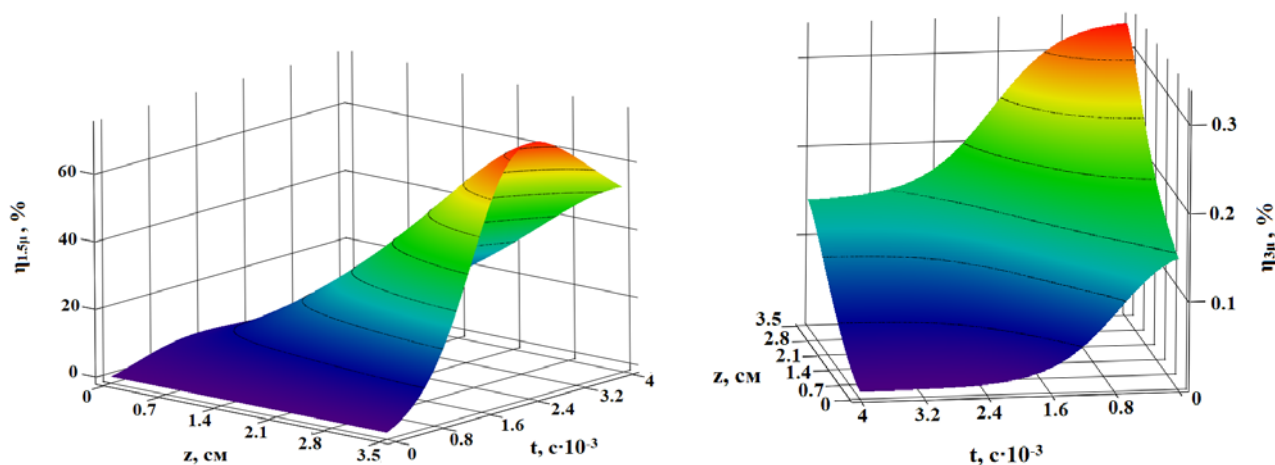


Рис. 2. Квантовая эффективность люминесценции ионов эрбия в зависимости от продольной координаты вдоль оптической оси кристалла (z) и времени от начала импульса накачки (t):

а) $\eta_{1.5\mu}(z, t)$ (для $\lambda \approx 1,5$ мкм); б) $\eta_{2.9\mu}(z, t)$ (для $\lambda \approx 2,9$ мкм)

Для создания условий эффективного вывода из активного элемента излучения двух генерационных каналов был проведен расчет просветляющих покрытий с максимумами спектра пропускания в спектральной области 1,5 и 2,9 мкм [13-15]. Подходящими свойствами обладают покрытия из пленок оксидов кремния SiO_2 и титана TiO_2 , нанесенные методом реактивного распыления, которые имеют показатели преломления $n_1 = 1,47$ и $n_2 = 2,28$ на длине волны 1,5 мкм, соответственно.

Моделирование и расчет толщины слоев покрытия, обеспечивающего максимальное пропускание в требуемом спектральном диапазоне, были осуществлены при помощи генетического алгоритма. В таблице представлены характеристики пятислойных пленок и коэффициенты пропускания T на длинах волн 1,5 мкм и 2,9 мкм, на рис. 3 – спектры пропускания. Было получено семь решений, соответствующих различным локальным минимумам. Из этого набора решений наиболее оптимальным является решение 5L2, имеющее самое высокое пропускание в требуемом диапазоне, широкую зону просветления и наименьшую общую толщину покрытия – 953 нм.

Дальнейшее увеличение количества слоев не имеет практического смысла, так как в реальных покрытиях суммарные потери на поглощение и рассеяние, имеющие величину $\sim 10 \div 100$ ppm, превышают рассчитанное значение потерь на отражение (0,002 % или 20 ppm). При этом прочие потери возрастают с увеличением количества слоев.

Характеристики пятислойных пленок

Номер решения		5L1	5L2	5L3	5L4	5L5	5L6	5L7
Толщины слоев, нм	SiO ₂	970	45	76	160	58	921	82
	TiO ₂	230	346	95	56	96	268	50
	SiO ₂	96	107	573	151	562	824	377
	TiO ₂	58	58	555	603	685	589	610
	SiO ₂	390	397	232	252	792	700	169
Толщина общая, нм		1744	953	1531	1222	2193	3302	1288
T (1500 нм), %		99,996	99,998	99,949	99,984	99,987	99,983	99,994
T (2900 нм), %		99,931	99,998	99,980	99,980	99,994	99,981	99,996

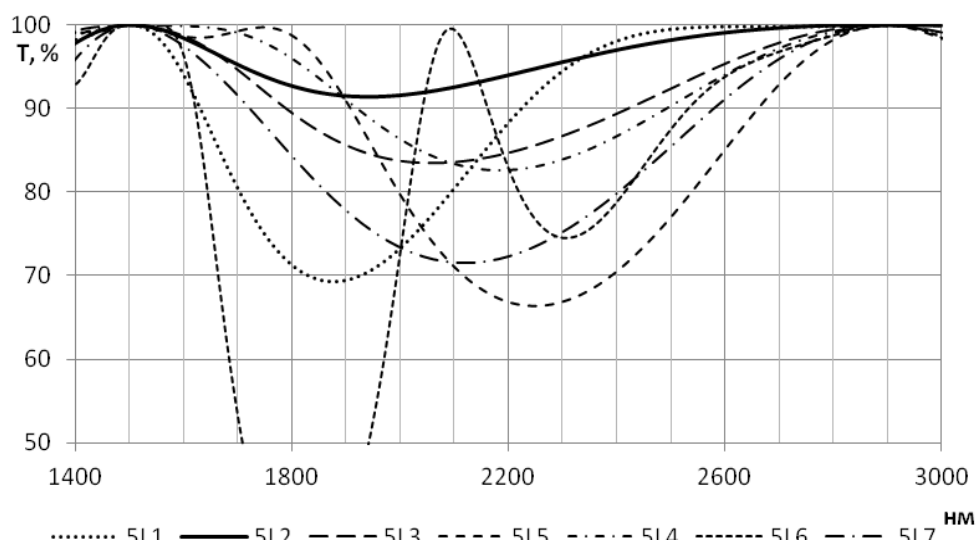


Рис. 3. Спектр пропускания различных пятислойных пленок

Заключение

В результате проведенных исследований были получены аналитические выражения для расчетов квантовой эффективности различных энергетических процессов в системе ионов Yb^{3+} - Er^{3+} для произвольных форм их концентрационных профилей. Данная физико-математическая модель позволяет проводить оптимизацию свойств неоднородно-легированных лазерных кристаллов на стадии их проектирования. В качестве примера были рассмотрены результаты вычислений для кристалла Yb, Er: LiNbO_3 .

Для расчета оптимальных параметров многослойных диэлектрических просветляющих покрытий было проведено математическое моделирование их спектральных свойств. В качестве демонстрации применения генетического алгоритма для определения толщины пленок диэлектрических материалов были произведены расчеты двухканального просветляющего покрытия из оксидов кремния и титана с максимумами пропускания на длинах волн 1,5 и 2,9 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Webb C. E., Jones J. D. C. (Eds.). Handbook of Laser Technology and Applications, Volume II: Laser Design and Laser Systems. – IOP Publishing Ltd, 2004. – 1264 p.
2. Rokhmin A. S., Aseev V. A., Nikonorov N. V. Polarized luminescence of erbium and thulium ions in glasses // Optical Materials. – 2015. – Vol. 41. – P. 136–138.
3. Zhilin A. A., Tsenter M. Y., Loiko P. A., et al. Structural characteristics and spectral properties of novel transparent lithium aluminosilicate glass-ceramics containing (Er,Yb)NbO₄ nanocrystals // Journal of Luminescence. – 2015. – Vol. 160. – P. 337–345.
4. Galutskiy V. V., Stroganova E. V., Yakovenko N. A. Comparative Analysis of Ytterbium-Erbium Media for 1.5 μ m Lasers // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 660. – P. 40–46.
5. Вилейшикова Е. В., Лойко П. А., Рачковская Г. Е., Захаревич Г. Б., Юмашев К. В. Спектрально-люминесцентные свойства оксифторидных стекол, соактивированных ионами (Yb³⁺, Eu³⁺) и (Yb³⁺, Tb³⁺) // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 4. – С. 531–538.
6. ООО «Промэнерголаб»: CZL лабораторное оборудование // URL: <https://www.czl.ru/catalog/lasers/nanoekspla/>
7. Stroganova E. V., Galutskiy V. V., Tkachev D. S., et al. Increasing pumping efficiency by using gradient-doped laser crystals // Optics and Spectroscopy. – 2014. – Vol. 117. – № 6. – P. 984–989.
8. Stroganova E. V., Galutskiy V. V., Nalbantov N. N. Quantum efficiency of energy transfers in non-uniformly doped crystals of Er, Yb: LiNbO₃ // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 737. – P. 012–017.
9. Stroganova E. V., Galutskiy V. V., Nalbantov N. N. A study of the quantum efficiency of multichannel relaxation in LiNbO₃:Yb, Er crystals // Optics and Spectroscopy. – 2016. – Vol. 121. – № 6. – P. 922–928.
10. Galutskiy V. V., Vatlina M. I., Stroganova E. V. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging // Journal of Crystal Growth. – 2009. – Vol. 311. – P. 1190–1194.
11. Galutskiy V. V., Stroganova E. V., Kozin A. S., et al. Spectral and luminescent properties of gradient-activated LiNbO₃ crystals with concentration profiles of Yb³⁺ and Er³⁺ ions // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53. – № 1. – P. 1–5.
12. Dymshits O. S., Loiko P. A., Skoptsov N. A., et al. Structure and upconversion luminescence of transparent glass-ceramics containing (Er,Yb)₂(Ti,Zr)₂O₇ nanocrystals // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2015. – Vol. 409. – P. 54–62.
13. Колкер Д. Б., Старикова М. К., Бойко А. А., Духовникова Н. Ю. Выбор и обоснование схемы резонатора для создания источника ИК-излучения в области 2,6–5,9 мкм // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 96–99.
14. Kolker D. B., Starikova M. K., Boyko A. A., Dukhovnikova N. Yu. OPO cavity design for a 2.6–5.9 μ m IR radiation source // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 56 (2). – P. 220–224.
15. Иночкин М. В., Назаров В. В., Сачков Д. Ю., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю. Модель многочастотной трехмикронной генерации излучения лазеров на эрбиевых кристаллах с диодной накачкой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 25–30.

REFERENCES

1. Webb, C. E., & Jones, J. D. C. (2004). Handbook of Laser Technology and Applications, Volume II: Laser Design and Laser Systems. IOP Publishing Ltd.
2. Rokhmin, A. S., Aseev, V. A., & Nikonorov, N. V. (2015). Polarized luminescence of erbium and thulium ions in glasses. Optical Materials, 41, 136–138. doi: 10.1016/j.optmat.2014.09.040.

3. Zhilin, A. A., Tsenter, M. Y., Loiko P. A., et al. (2015). Structural characteristics and spectral properties of novel transparent lithium aluminosilicate glass-ceramics containing (Er,Yb)NbO₄ nanocrystals. *Journal of Luminescence*, 160, 337–345. doi: 10.1016/j.jlumin.2014.12.040.
4. Galutskiy, V. V., Stroganova, E. V., & Yakovenko, N. A. (2013). Comparative Analysis of Ytterbium-Erbium Media for 1.5 μm Lasers. *Advanced Materials Research*, 660, 40–46. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.660.40.
5. Vileishikova, E. V., Loiko, P. A., Rachskovskaya, G. E., Zakharevich, G. B., & Yumashev K. V. (2016). Spectral and luminescent properties of oxyfluoride glasses activated with (Yb³⁺, Eu³⁺) and (Yb³⁺, Tb³⁺) with ions. *Jurnal prikladnoy spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 83(4), 531–538. [in Russian].
6. LLC Promenergolab: CZL laboratory equipment // URL: <https://www.czl.ru/catalog/lasers/nanoekspla/>
7. Stroganova, E. V., Galutskiy, V. V., Tkachev, D. S., et al. (2014). Increasing pumping efficiency by using gradient-doped laser crystals. *Optics and spectroscopy*, 117(6), 984–989. doi: 10.7868/S003040341412023X.
8. Stroganova, E. V., Galutskiy, V. V., & Nalbantov, N. N. (2016). Quantum efficiency of energy transfers in non-uniformly doped crystals of Er, Yb: LiNbO₃. *Journal of Physics: Conference Series*, 737, 012–017. doi:10.1088/1742-6596/737/1/012017.
9. Stroganova, E. V., Galutskiy, V. V., & Nalbantov, N. N. (2016). A study of the quantum efficiency of multichannel relaxation in LiNbO₃:Yb, Er crystals. *Optics and Spectroscopy*, 121(6), 922–928. doi: 10.7868/S0030403416120266.
10. Galutskiy, V. V., Vatlina, M. I., & Stroganova, E. V. (2009). Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging. *Journal of Crystal Growth*, 311(4), 1190–1194. doi: 10.1016/j.jcrysgr.2008.11.059.
11. Galutskiy, V. V., Stroganova, E. V., Kozin, A. S., et al. (2017). Spectral and luminescent properties of gradient-activated LiNbO₃ crystals with concentration profiles of Yb³⁺ and Er³⁺ ions. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(1), 1–5. doi: 10.15372/AUT20170111.
12. Dymshits, O. S., Loiko, P. A., Skoptsov, N. A., et al. (2015). Structure and upconversion luminescence of transparent glass-ceramics containing (Er,Yb)₂(Ti,Zr)₂O₇ nanocrystals. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 409, 54–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.11.012> 0022-3093.
13. Kolker, D. B., Starikova, M. K., Boyko, A. A., & Duhovnikova, N. Yu. (2013). Selection and justification of the scheme of optical cavity for a source of infrared radiation in the spectral range of 2.6 to 5.9 μm. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Fizika [News of Higher Educational Institutions. Physics]*, 56(2), 96–99 [in Russian].
14. Kolker, D. B., Starikova, M. K., Boyko, A. A., & Dukhovnikova, N. Yu. (2013). OPO cavity design for a 2.6–5.9 μm IR radiation source. *Russian Physics Journal*, 56(2), 220–224. doi: 10.1007/s11182-013-0018-4.
15. Inochkin, M. V., Nazarov, V. V., Sachkov, D. Yu., Khloponin, L. V., & Khramov, V. Y. (2013). Modelling of 3 μm multi-frequency generation of laser radiation with diode-pumped erbium crystals. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Priborostroenie [Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument making]*, 56(9), 25–30 [in Russian].

© *Н. Н. Налбантов, А. А. Квас, Е. В. Строганова, 2018*

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД ИМПУЛЬСАМИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Марина Андреевна Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник, тел. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Анастасия Владимировна Мерещук

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, техник, тел. (383)306-58-66; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, магистрант, e-mail: mereshuk94@rambler.ru

Разработана технология структурирования поверхности оптических прозрачных сред ультрафиолетовыми (УФ) импульсами пикосекундного лазера. Создан экспериментальный стенд для отработки метода лазерной абляции кремния УФ пикосекундным лазерным излучением. Экспериментальным путем выявлены оптимальные параметры для получения качественных микроструктур на поверхности кремния. Исходя из геометрических параметров полученных структур найдена скорость абляции. Для получения отверстий цилиндрической формы в кварцевом стекле был рассчитан и экспериментально апробирован дифракционно-рефракционный объектив (РД-объектив), состоящий из фазовой маски и микрообъектива LMU – 15X – UVB, Thorlabs. Также были сформированы отверстия с плоским дном в кварцевом стекле с использованием двухслойных структур. Проведена трехмерная микрообработка кремния. Полученные структуры исследовались с помощью интерференционного микроскопа-нанопрофилометра МНП-1 и микроскопа атомных сил NT-MDT Integra Prima HD.

Ключевые слова: лазерная абляция, пикосекундные импульсы, фазовая маска, кремний, кварцевое стекло.

STRUCTURING OF OPTICAL TRANSPARENT MEDIUMS BY PULSES OF PICOSECOND LASER

Marina A. Zavyalova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phone: (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Anastasiya V. Mereshchuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Technician, phone: (383)306-58-66; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, e-mail: mereshuk94@rambler.ru

The technology for structuring the optical transparent mediums surface by ultraviolet (UV) pulses of the picosecond laser is described. The experimental stand for the realization of the method of silicon laser ablation by UV picosecond laser radiation is created. Optimal parameters for obtaining the qualitative microstructures on the silicon surface have been determined experimentally. The ablation velocity is found from the geometric parameters of obtained structures. To obtain the cy-

lindrical holes in quartz glass, a diffraction-refractive lens (RD-lens) consisting of a phase mask and micro-lens LMU-15X-UVB, Thorlabs is calculated and tested experimentally. RD-lens was included in the experimental stand. Using two-layer structures, the holes with a flat bottom in quartz glass were formed. Three-dimensional microprocessing of silicon was carried out. Obtained structures were studied using the interference microscope-nanoprofilometer MNP-32 and the atomic force microscope NT-MDT Integra Prima HD.

Key words: laser ablation, picosecond pulses, phase mask, silicon, quartz glass.

Введение

Одним из прецизионных и высокоэффективных методов обработки поверхности самых разнообразных материалов (диэлектриков, полупроводников, металлов) является метод лазерной абляции с использованием импульсов ультракороткой длительности (УКИ) [1–5]. Технологии лазерной обработки ультракороткими импульсами полупроводников и диэлектриков, в частности кремния и кварцевого стекла, представляет особый интерес для различных приложений нано- и микроэлектроники, микрофлюидики, дифракционной оптики. Качество обработки поверхности материала определяется интенсивностью и длиной волны лазерного излучения, а также длительностью импульса. В настоящее время коммерчески доступные лазеры для нано- и микрообработки материалов генерируют импульсы фемто-, пико- и наносекундной длительности; типичные длины волн варьируются от УФ до ближнего ИК [6, 7].

В случае УКИ фемтосекундная длительность импульса меньше, чем характерное время термализации материала. Поэтому лазерная обработка материала может быть выполнена с очень небольшим количеством термических эффектов. Другим преимуществом такой обработки является отсутствие экранирования плазмой, поскольку воздействие фемтосекундных импульсов прекращается до того, как материал будет унесен с поверхности образца. Так как потери теплопроводности в материале минимальны и не происходит экранирования плазмы, порог абляции для полупроводников является самым низким. Поэтому материал может быть испарен с предельной точностью. По мере увеличения энергии импульса процессы термической абляции становятся доминирующими даже при фемтосекундных импульсах [6, 8, 9].

Технология обработки материала с помощью наносекундных импульсов наиболее широко распространена и хорошо изучена. Однако при резке и сверлении получаются недостаточно гладкие края, а на структурах остаются капли расплавленного материала [6].

Лазерная абляция пикосекундными импульсами является компромиссом между фемто- и наносекундными импульсами. Порог абляции несколько выше, чем для фемтосекундных импульсов, главным образом из-за потерь теплопроводности и плазменного экранирования. Но при этом в некоторых случаях качество обработки поверхности материала с помощью пикосекундных импульсов может быть даже выше, так как, например, скачки давления, вызванные

фемтосекундным лазером, могут привести к механическому повреждению материала и дефектам решетки в кремнии [6].

Так как механизмы получения качественных структур на поверхности оптических прозрачных сред с помощью лазерной абляции до сих пор остаются темой дискуссий ввиду сложности картины взаимодействия интенсивных УКИ с поверхностью материала, актуальной является задача определения диапазона параметров обработки (плотности мощности лазерного излучения, длительности воздействия и др.), в результате которых получают микро- и наноструктуры с качественным профилем [8, 10].

Целью данной работы является разработка технологии структурирования поверхности оптических прозрачных сред ультрафиолетовыми импульсами пикосекундного лазера.

Микрообработка кремния

Для получения микроструктур на поверхности кремния с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ импульсами был разработан и собран экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

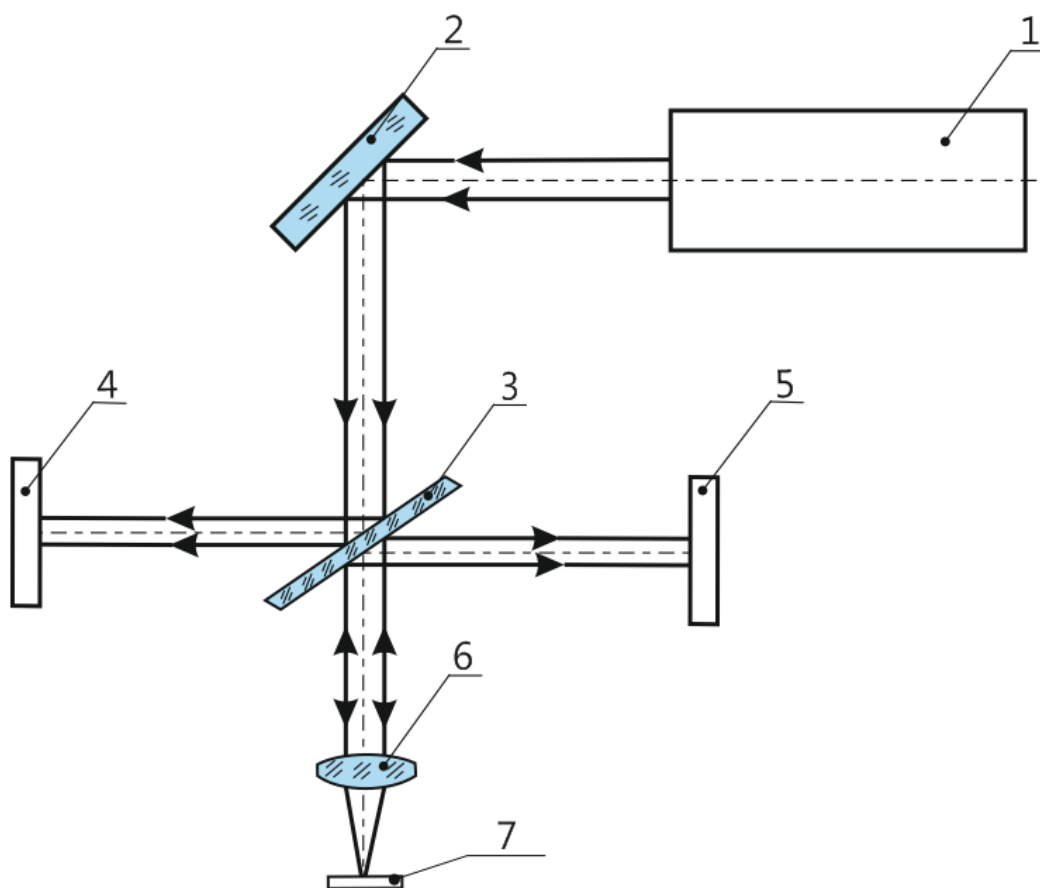


Рис. 1. Лабораторный стенд для разработки технологии прямой записи профиля на поверхности кремния с помощью абляции пикосекундными УФ импульсами

В его состав входит твердотельный лазер с диодной накачкой DUETTO-OEM V3.4 1, который генерирует последовательность импульсов длительностью 10 пс. Данный лазер имеет достаточно высокую мощность импульсного излучения (средняя мощность 10 – 15 Вт, частота импульсов 50 кГц – 8 МГц и энергия импульса до 200 мкДж) на трех длинах волн ($\lambda = 355; 532; 1064$ нм). Лазерное излучение проходит систему зеркал 2 и, попав на стеклянную пластинку 3, частично отражается на экран 4. Пройденное излучение с помощью линзы 6 ($f = 125$ мм) фокусируется на кремниевую заготовку 7 в пятно диаметром 40 мкм. Отраженное излучение от заготовки направляется стеклянной пластиной 3 на экран 5. С помощью экранов определялась плоскость наилучшей фокусировки лазерного пучка после линзы 6. В случае, если поверхность заготовки находилась в этой плоскости, размеры пятен на экранах 4 и 5 совпадали. Кремниевая заготовка перемещалась с помощью трехкоординатного столика ZSS 33.200.1.2, Phytron.

На рис. 2 представлены микроструктуры, полученные с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ импульсами при плотностях мощности: $0,22 \cdot 10^{10}$ Вт/см², $0,27 \cdot 10^{10}$ Вт/см², $0,34 \cdot 10^{10}$ Вт/см². Наибольший интерес представляют кратеры, полученные при воздействии на материал одного импульса лазерного излучения, поскольку по геометрическим параметрам данных кратеров возможно нахождение скорости абляции, которая в дальнейшем позволит управлять глубиной структур. Шероховатость дна микроструктур примерно равна шероховатости поверхности заготовки ($R_a = 0,5$ нм). Изображения микроструктур получены с помощью интерференционного микроскопа-нанопрофилометра МНП-1 (КТИ НП СО РАН).

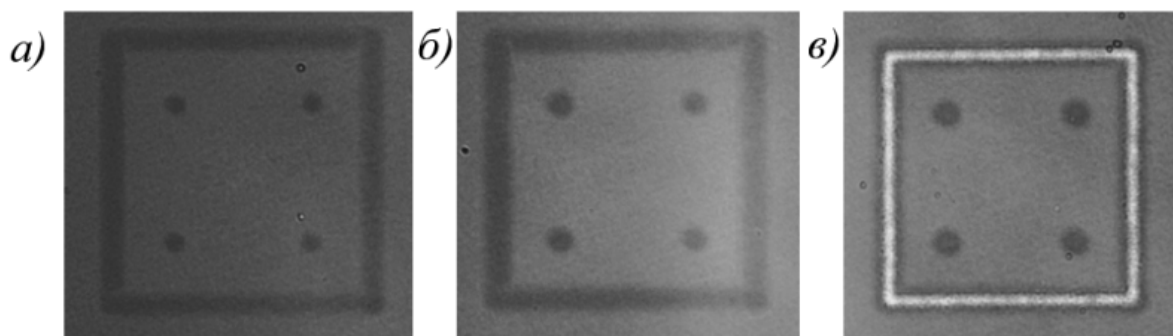


Рис. 2. Двухмерные изображения микроструктур размером 232×232 мкм, которые были получены на кремнии с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ импульсами при следующих плотностях мощности:
а) $0,22 \cdot 10^{10}$ Вт/см², б) $0,27 \cdot 10^{10}$ Вт/см², в) $0,34 \cdot 10^{10}$ Вт/см²

Структуры с наилучшим качеством получились при плотности мощности $0,27 \cdot 10^{10}$ Вт/см², 3D изображение которых представлено на рис. 3.

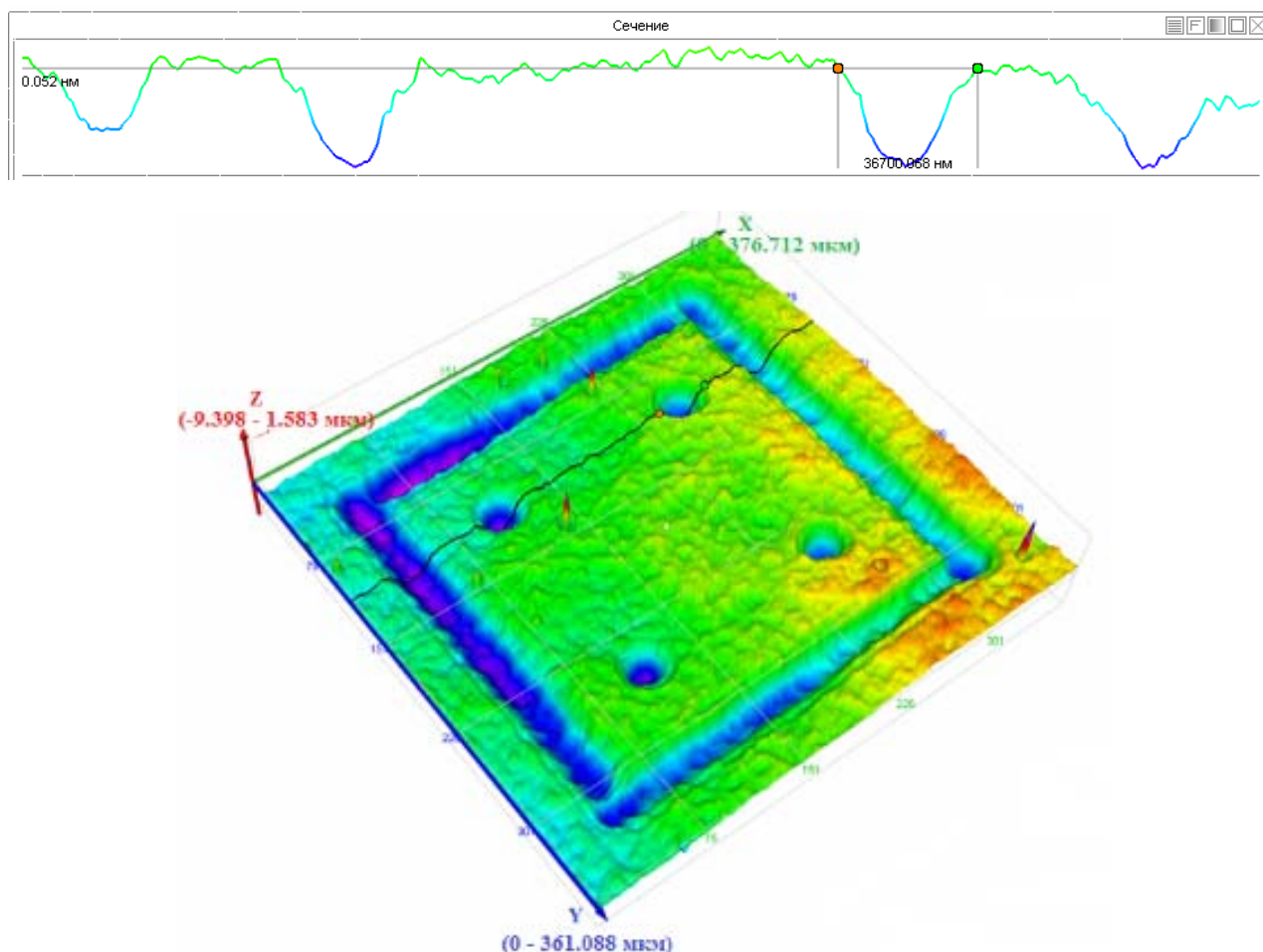


Рис. 3. Трехмерное изображение структур и их сечение (сверху), полученное с помощью микроскопа-нанопрофилометра МНП-1.

Кратеры синтезированы с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ импульсами при плотности мощности $0,27 \cdot 10^{10}$ Вт/см². Размеры кратеров: диаметр – 36,7 мкм, высота – 6,9 нм

В ходе исследований получены систематические экспериментальные данные по лазерной абляции кремния, результаты которых сведены в таблицы. Погрешность определялась по двадцати измеренным кратерам. По геометрическим параметрам кратеров найдена скорость абляции.

Таблица результатов лазерной абляции кремния

Плотность мощности, Вт/см ²	Глубина кратера, нм	Диаметр кратера, мкм	Скорость абляции, нм/импульс
$0,22 \cdot 10^{10}$	$3,63 \pm 0,63$	$29,54 \pm 1,95$	$3,63 \pm 0,63$
$0,27 \cdot 10^{10}$	$6,85 \pm 0,62$	$36,79 \pm 1,63$	$6,85 \pm 0,62$
$0,34 \cdot 10^{10}$	$7,2 \pm 0,2$	$41,8 \pm 2,73$	$7,2 \pm 0,2$

Формирование цилиндрических отверстий в кварцевом стекле с использованием средств дифракционной оптики

При обработке поверхности материала сфокусированным лазерным пучком гауссовое распределение интенсивности приводит к сосуществованию процессов плавления и испарения с преобладанием испарения в центре и значительной зоной расплава на периферии. Дальнейшее повышение средней мощности излучения и увеличения энергии в импульсе для смещения процесса в сторону испарения приводит к менее стабильному качеству, особенно для глубоких структур [11]. Формируя равномерное распределение интенсивности по всей площади сфокусированного пучка, возможно создание микроструктур с профилем, близким к цилиндрическому. Это особенно актуально при синтезе биочипов для нужд микрофлюидики для формирования ламинарных потоков жидкости [12]. Поэтому актуальной является разработка технологии гомогенизации гауссова пучка для современных технологических задач высокоскоростной обработки материалов.

Для формирования равномерного распределения интенсивности по всей площади сфокусированного пучка можно использовать доступные на рынке фирменные объективы Focal- π Shape (AdlOptica, Germany) [13]. Однако они имеют достаточно высокую коммерческую стоимость. Поэтому в данной работе рассчитан и экспериментально апробирован более дешевый дифракционно-рефракционный (РД) объектив (рис. 4), в состав которого входит фазовая маска и микрообъектив.

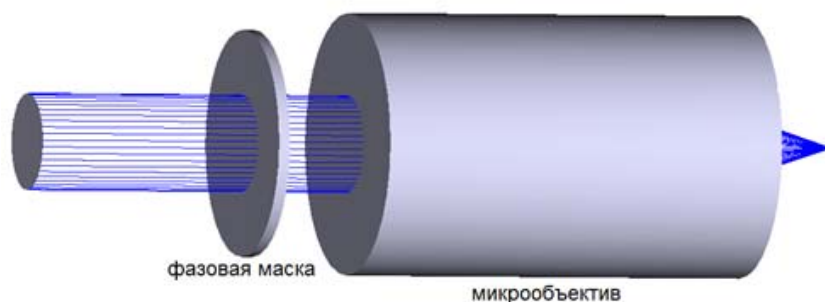


Рис. 4. Дифракционно-рефракционный объектив, состоящий из фазовой маски и микрообъектива

Фазовая маска представляет собой подложку из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86), на которой вытравлена круговая ступенька высотой 374 нм. При отношении радиуса круговой ступеньки R_1 к световому диаметру микрообъектива R_2 , равному 0,8, в фокальной плоскости РД-объектива наблюдается равномерное распределение интенсивности (рис. 5, а, б). Для сравнения приведено распределение интенсивности в фокусе обычного микрообъектива при освещении гауссовой волной (рис. 5, в, г).

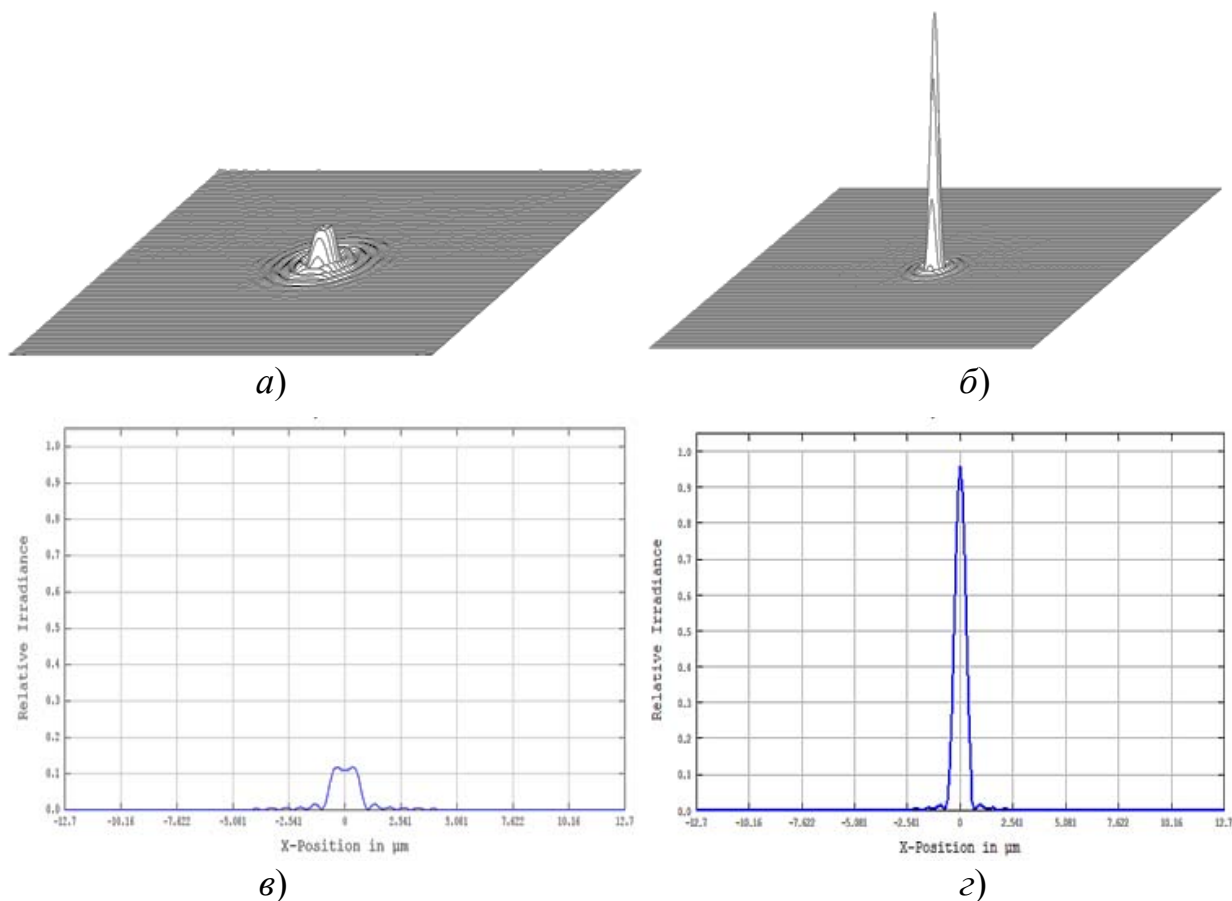


Рис. 5. Распределение интенсивности лазерного излучения в фокусе дифракционно-рефракционного объектива (*а, б*) и обычного микрообъектива (*в, г*)

РД-объектив использовался в экспериментальном стенде (рис. 6) для структурирования оптических прозрачных материалов с помощью лазерной абляции пикосекундными УФ импульсами. Излучение лазера DUETTO-OEM V3.4 1 расширялось с помощью коллиматора 2 и проходило через систему зеркал 3, 4. Далее оно расщеплялось светоделительной пластиной 5. Часть излучения проходила через фазовую маску 6 и фокусировалась с помощью микрообъектива 7 LMU-15X-UVB, Thorlabs на поверхность заготовки, которая находилась в специальном держателе 8. Держатель с заготовкой перемещался с помощью трехкоординатного столика 9 ZSS 33.200.1.2, Phytron. Положение фокальной плоскости контролировалось с помощью датчика Шека-Гартмана 10 WFS150-7AR, Thorlabs.

Эксперименты по формированию структур в кварцевом стекле проводились с использованием одного или нескольких импульсов. При многоимпульсной обработке кварцевого стекла были получены отверстия по форме, близкой к цилиндрической. На рис. 7, *а* представлена профилограмма кратера при облучении поверхности кварцевого стекла с помощью микрообъектива без фазовой маски, а на рис. 7, *б* – при многоимпульсной обработке с использованием РД объектива.

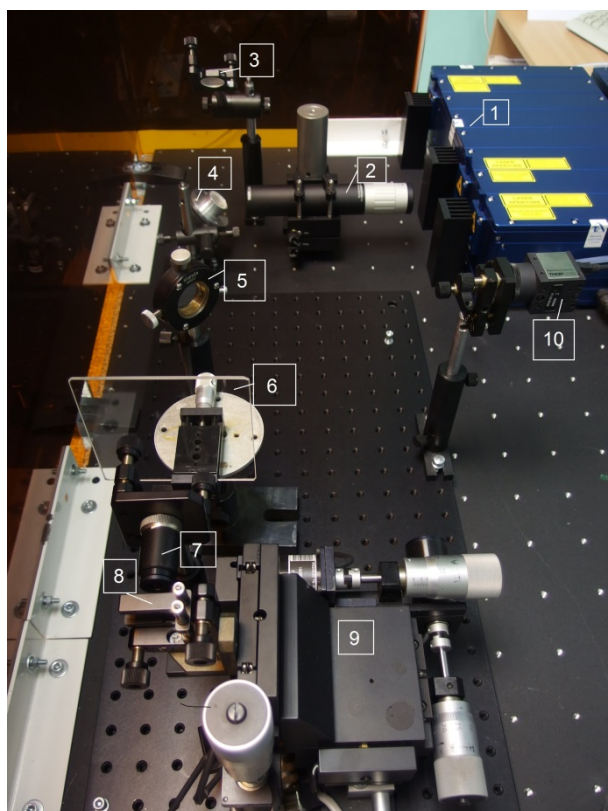
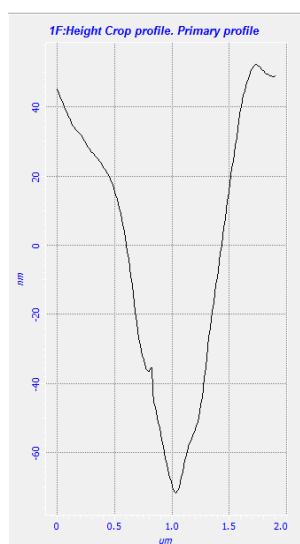
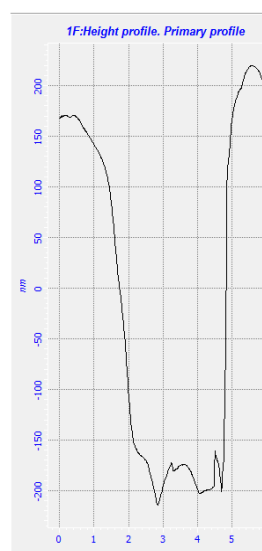


Рис. 6. Экспериментальный стенд для обработки технологии получения цилиндрических микроотверстий в оптических прозрачных материалах



а)



б)

Рис. 7. Профилограммы АСМ-изображений, полученных при сканировании кратеров:

а) для случая облучения поверхности одиночным пикосекундным УФ импульсом без использования фазовой маски; б) для случая облучения поверхности 10 пикосекундными УФ импульсами с использованием фазовой маски (шероховатость дна кратера 50 нм). Плотность мощности: $3,2 \cdot 10^{12}$ Вт/см²

Профилограммы кратеров были получены в программе Image Analysis по изображениям кратеров на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-MDT Integra Prima HD. Оптимальная плотность мощности для поверхностной обработки кварцевого оптического стекла была найдена в [5].

Формирование отверстий с плоским дном в кварцевом стекле с использованием многослойных структур

Одним из способов формирования отверстий с плоским дном является испарение диэлектрических покрытий на полированном кварцевом стекле. Расчетная пороговая плотность мощности для кварцевого стекла на несколько порядков выше таковой для ряда оптических прозрачных диэлектриков. Поэтому возможно испарение только диэлектрического покрытия без существенного теплового влияния на кварцевое стекло. Варьируя толщины диэлектрических покрытий и используя несколько слоев, можно разработать технологию формирования сверхточных дифракционных структур с повышенной дифракционной эффективностью, а также расходных элементов биочипов для целей микрофлюидики [14, 15].

В ходе экспериментальных исследований использовалось полированное кварцевое стекло с напыленным слоем диэлектрика MgF_2 толщиной 0,5 мкм, который удалялся при плотности мощности $3 \cdot 10^9$ Вт/см². В результате были сформированы структуры с плоским дном. Пример профилограммы такого микроотверстия, полученной на АСМ-микроскопе, представлен на рис. 8.

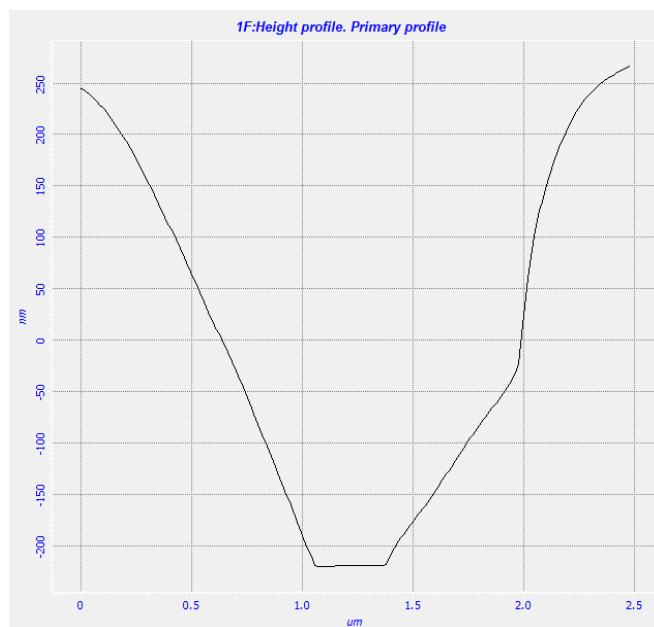


Рис. 8. Профилограмма микроотверстия в двухслойной структуре MgF_2 – кварцевое стекло. Шероховатость дна – 5 нм

Комбинация методов синтеза цилиндрических микроотверстий с плоским дном в оптических прозрачных средах: с использованием средств дифракционной оптики и многослойных структур

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены подложки из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86). На подложки был нанесен слой пленки MgF_2 толщиной 0,25 мкм. С учетом скорости абляции MgF_2 , установленной в ходе экспериментальных исследований, поверхность облучалась количеством импульсов, достаточным для испарения слоя толщиной 0,25 мкм. Для фазовой модуляции гауссова пучка использовался РД объектив. Экспериментальная установка так же описана выше и представлена на рис. 6. На рис. 9 показано АСМ-изображение кратера при облучении пикосекундными УФ импульсами с плотностью мощности $3 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$, количество импульсов – 10.

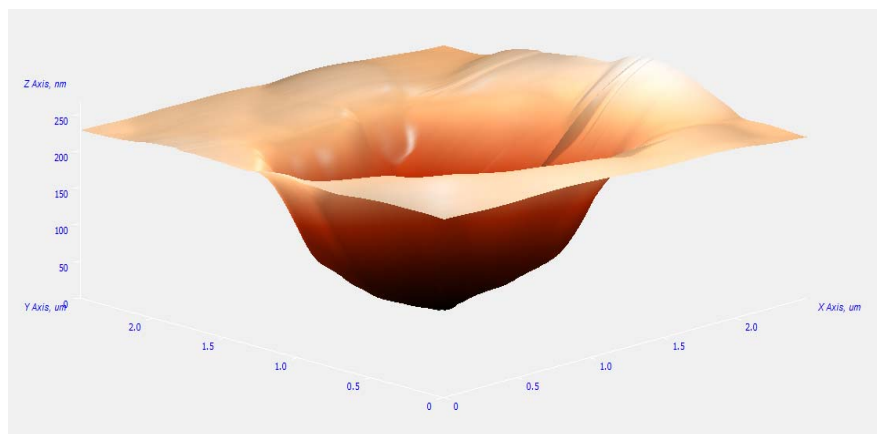


Рис. 9. АСМ-изображение кратера на поверхности двухслойной структуры, состоящей из кварцевого оптического стекла марки КУ-1 и пленки MgF_2

Так же при многоимпульсном режиме обработки УФ импульсами пикосекундной длительности были синтезированы серии «глубоких» цилиндрический отверстий в кварцевом стекле при плотности мощности $3,2 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2$. На рис. 10 представлено изображение цилиндрического микроотверстия глубиной 33 мкм, полученное на интерференционном микроскопе-нанопрофилометре МНП-1.

С помощью атомно-силового микроскопа Nt-Mdt Integra Prima HD и микроскопа-нанопрофилометра МНП-1 оценивались оплавления краев кратеров, степень разбрызгивания и растрескивания материала. Из рис. 6–7 видно, что профиль отверстий близок к цилиндрическому, а вдоль кромки отверстий нет каемок плавления. Существующие сколы можно предотвратить записью структур в непрерывном режиме путем оптимизации коэффициентов перекрытия импульсов.

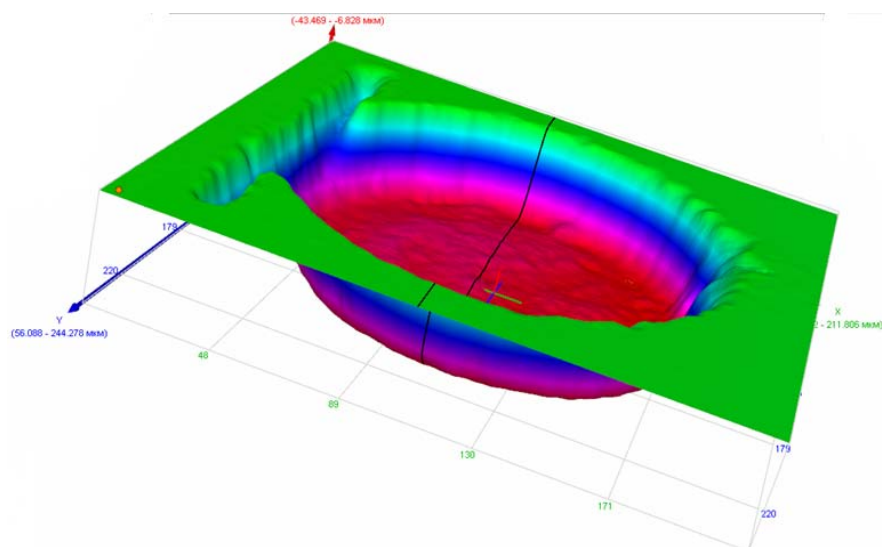


Рис. 10. Изображение цилиндрического отверстия в кварцевом оптическом стекле марки КУ-1, шероховатость дна – 5 мкм

Формирование многоуровневых структур в кремнии

Для демонстрации трехмерной микрообработки оптических прозрачных материалов использовалась тестовая 3D модель пирамиды, состоящая из 5 ступенек, глубина которых задается количеством импульсов. Размер одной пирамиды – 150×150 мкм, размер ступеньки – 30 мкм. Удаление материала осуществлялось лазерными УФ импульсами пикосекундной длительности послойно. Изображения синтезированных на поверхности кремния многоуровневых тест-объектов представлены на рис. 11.

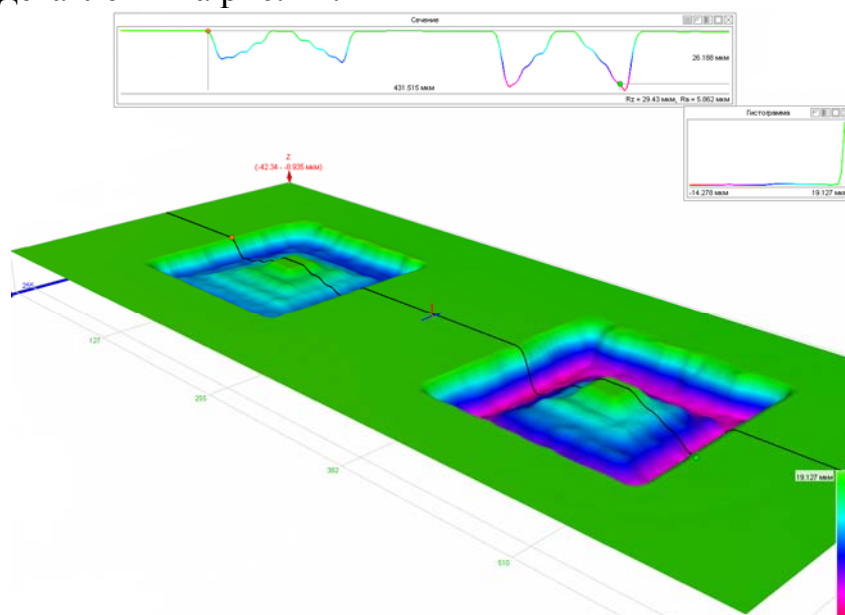


Рис. 11. Многоуровневые структуры, полученные на поверхности кремния методом прямого микропрофилирования с помощью абляции импульсами пикосекундной длительности

Заключение

Разработана технология структурирования поверхности оптических прозрачных сред УФ импульсами пикосекундного лазера. Для получения микроструктур на поверхности кремния создан и настроен экспериментальный стенд. С помощью лазерной абляции синтезированы кратеры глубиной от 3 до 7 нм с хорошим качеством кромки при следующих плотностях мощности $0,22 \cdot 10^{10}$ Вт/см² до $0,34 \cdot 10^{10}$ Вт/см², соответственно. Проведено исследование полученных структур на интерференционном микроскопе-напрофилометре МНП-1 (КТИ НП СО РАН). Геометрические параметры кратеров и их визуальное представление демонстрируют качественную обработку материала. Получены систематические экспериментальные данные по скорости абляции кремния УФ импульсами пикосекундной длительности.

Исследованы два метода формирования цилиндрических микроотверстий на поверхности прозрачных диэлектриков. Первый метод основан на использовании средств дифракционной оптики, которые позволяют перераспределить энергию в каустике лазерного пучка требуемым образом и тем самым сформировать отверстия, форма которых отличается от конической.

Второй метод основан на испарении тонких пленок диэлектриков на поверхности полированного кварцевого стекла. Расчетная пороговая плотность мощности для кварцевого стекла на несколько порядков выше таковой для ряда оптических прозрачных диэлектрических покрытий, поэтому возможно испарение только диэлектрического покрытия без существенного теплового влияния на кварцевое стекло.

В ПО Zemax был рассчитан дифракционно-рефракционный объектив, состоящий из фазовой маски и микрообъектива и позволяющий получить близкое к прямоугольному распределение интенсивности в фокальном пятне. На основе РД-объектива были получены «глубокие» отверстия цилиндрической формы в пленках MgF₂ и в кварцевом оптическом стекле КУ-1 (ГОСТ 15130–86) диаметром от 3 мкм до 150 мкм с глубиной от 0,25 мкм до 33 мкм при плотности мощности $3 \cdot 10^9$ Вт/см² (для пленок MgF₂) и $3,2 \cdot 10^{12}$ Вт/см² (для кварцевого стекла).

Продемонстрирована трехмерная микрообработка кремния путем прямого профилирования поверхности пикосекундным лазерным УФ лучом.

Направление дальнейших исследований – разработка и создание лазерного фотопостроителя для прямого профилирования поверхности оптически прозрачных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вейко В. П., Скворцов А. М., Ту Хуинь Конг, Петров А. А. Лазерная абляция монокристаллического кремния под действием импульсно-частотного излучения волоконного лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 426–434.

2. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В., Синицын Д. В., Бункин А. Ф., Леднев В. Н., Першин С. М. Термическое плавление и абляция кремния фемтосекундным лазерным излучением // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 143, № 3. – С. 403–422.
3. Завестовская И. Н. Теоретическое моделирование процессов поверхностной обработки материалов импульсами лазерного излучения // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 2012. – С. 221.
4. Ultrafast laser processing of materials: a review / K. C. Phillips, H. H. Gandhi, E. Mazur, S. K. Sundaram // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7, Issue 4. – P. 684–712.
5. Завьялова М. А. Поверхностная модификация кварцевого стекла импульсами пикосекундного лазера // Компьютерная оптика – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 863–870.
6. Laser microvia drilling and ablation of silicon using 355 nm pico and nanosecond pulses / H. Pansar, H. Herfurth, S. Heinemann // *Proc. ICALEO 2008, Temecula*. – 2008. – P. 278–287.
7. Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И. Абляция поверхности алюминия и кремния ультракороткими лазерными импульсами варьируемой длительности // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 103, № 11-12. – С. 846–850.
8. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Самохин А. А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 159–172.
9. Picosecond laser ablation for silicon micro fuel cell fabrication / G. Scotti, D. Trusheim, P. Kanninen // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2013. – 14 pp.
10. Fabrication of Sapphire Micro Optics by F2-Laser Ablation / M. Wiesner, J. Ihlemann // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – P. 239–244.
11. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
12. Занавескин М. Л., Миронова А. А., Попов А. М. Микрофлюидика и ее перспективы в медицине // Молекулярная медицина. – 2012. – № 5. – С. 9–16.
13. Laskin A., Bae H., Laskin V., Ostrun A. Beam shaping of focused beams for microprocessing applications. *Proc. ICALEO 2014*. – 2014. – Anaheim, CA, USA.
14. 3D microstructuring of glass by femtosecond laser direct writing and application to biophotonic microchips / K. Sugioka, Y. Hanada, K. Midorikawa // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. – 2008. – Vol. 1. – P. 181–188.
15. Rapid microfluidic biochips fabrication by femtosecond laser on glass substrate / C. L. Chang, W. J. Ju, C. L. Liou // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 483. – P. 359–363.

REFERENCES

1. Veiko, V. P., Skvortsov, A. M., Tu, Huynh Cong, & Petrov, A. A. (2015). Laser ablation of monocrystalline silicon under pulsed-frequency fiber laser. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnyh tehnologii, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 15(3), 426–434 [in Russian]. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-426-434.
2. Ionin, A. A., Kudryashov, S. I., Seleznev, L. V., Sinitsyn, D. V., Bunkin, A. F., Lednev, V. N., & Pershin, S. M. (2013). Thermal melting and ablation of silicon by femtosecond laser radiation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 116(3), 347–362. doi: 10.1134/S106377611302012X.
3. Zavestovskaya, I. N. (2012). *Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk: Teoreticheskoe modelirovanie processov poverhnostnoj obrabotki materialov impul'sami lazernogo izlucheniya* [Theoretical modeling of processes for material surface treatment by laser radiation pulses] (pp. 221). Moscow [in Russian].

4. Phillips, K. C., Gandhi, H. H., Mazur, E., & Sundaram, S. K. (2015). Ultrafast laser processing of materials: a review. *Advances in Optics and Photonics*, 7(4), 684–712. doi: 10.1364/AOP.7.000684.
5. Zavyalova, M. A. (2016). Surface modification of silica glass by pulses of a picosecond laser. *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 40(6), 863–870. [in Russian]. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-863-870.
6. Pantsar, H., Herfurth, H., & Heinemann, S. (2008). Laser microvia drilling and ablation of silicon using 355 nm pico and nanosecond pulses. *Proceedings of ICALEO 2008*, 278–287.
7. Zayarny, D. A., Ionin, A. A., & Kudryashov, S. I. (2016). Surface ablation of aluminum and silicon by ultrashort laser pulses of variable width. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (Jetp Letters) [Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki]*, 103(12), 846–850 [in Russian]. doi: 10.1134/S002136 4016120158.
8. Ionin, A. A., Kudryashov, S. I., & Samokhin, A. A. (2017). Material surface ablation produced by ultrashort laser pulses. *Uspehi fizicheskikh nauk [Physics–Uspekhi]*, 60(2), 149–160 [in Russian]. doi: 10.3367/UFNe.2016.09.037974.
9. Scotti, G., Trusheim, D., & Kanninen, P. (2013). Picosecond laser ablation for silicon micro fuel cell fabrication. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14. doi: 10.1088/0960-1317/23/5/055021.
10. Wiesner, M., & Ihlemann, J. (2011). Fabrication of Sapphire Micro Optics by F₂-Laser Ablation. *Physics Procedia*, 12, 239–244. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.129.
11. Vaks, E. D., Milenky, M. N., & Saprykin, L. G. (2013). *Praktika precizionnoj lazernoj obrabotki [The practice of precision laser processing]*. Moscow: Technosphere [in Russian].
12. Zanaevskin, M. L., Mironova, A. A., & Popov, A. M. (2012). Microfluidics and its perspectives in medicine. *Molekulyarnaya meditsina [Molecular Medicine]*, 5, 9–16 [in Russian].
13. Laskin, A., Bae, H., Laskin, V., & Ostrun A. (2014). Beam shaping of focused beams for microprocessing applications. *Proceedings of ICALEO 2014*, Anaheim, CA, USA.
14. Sugioka, K., Hanada, Y., & Midorikawa, K. (2008). 3D microstructuring of glass by femtosecond laser direct writing and application to biophotonic microchips. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 1, 181–188.
15. Chang, C. L., Ju, W. J., & Liou, C. L. (2011). Rapid microfluidic biochips fabrication by femtosecond laser on glass substrate. *Key Engineering Materials*, 483, 359–363. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.483.359.

© М. А. Завьялова, А. В. Мерецук, 2018

ФОРМФАКТОР ГОЛОГРАММ И МОДИФИКАЦИЯ СТАТИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ ЗАПИСЫВАЕМЫХ НА ГОЛОГРАММУ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сергей Александрович Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Александр Владимирович Трифанов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

Артем Леонович Пазоев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Для случая фазовых объемных голограмм показано, что модификация записываемого на голограмму объектного пучка, вызываемая записью расфокусированного или удаленного от поверхности голограммы объекта, не приводит к существенным изменениям формфактора и достигаемой средней дифракционной эффективности. Полученные результаты позволяют утверждать, что формфактор более консервативен к изменению записываемого изображения, чем его статистическое распределение яркости, чем формфактор напоминает известные интегралы движения.

Ключевые слова: голография, дифракционная эффективность, формфактор, видность, гауссов пучок, голографический портрет, интеграл движения.

FORMFACTOR AND MODIFICATION OF STATISTICS OF INTENSITY DISTRIBUTION ON THE HOLOGRAM

Sergey A. Shoydin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Aleksandr V. Trifanov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383) 361-07-31, e-mail: trifanov.alex@mail.ru

Artem L. Pazoev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-91-11, e-mail: apl-93@mail.ru

For the case of phase 3D holograms, it was shown that the modification of the object beam recorded on the hologram caused by writing a Gaussian beam or an object in the form of a portrait

defocused or removed from the object's hologram surface does not lead to significant changes in the form factor and the achievable average diffraction efficiency. The results obtained make it possible to assert that the formfactor is more conservative to the change in the recorded image than its statistical brightness distribution. By this property of stability under changing images, the formfactor resembles the known integrals of motion.

Key words: hologram, formfactor, diffraction efficiency, Gaussian beam, visibility, holographic portrait.

Введение

В работах [1-5] было показано, что при записи голограмм гауссовыми пучками, за счет перекрестного влияния двух нелинейностей (гауссова распределения яркости по полю голограммы и синусоидальной, когельниковской зависимости локальной дифракционной эффективности η_m от экспозиции) возникает ограничение на максимально достижимую дифракционную эффективность голограмм согласно (1). Одновременно, скорость достижения этого максимального значения замедляется и оптимальная экспозиция увеличивается. Причем, при устранении одной из этих двух нелинейностей эффект формфактора сводится к нулю, и величина достижимой дифракционной эффективности описывается классическим выражением, аналогичным (2), полученным Когельником для плоской волны [6]. Степень приближения к этому классическому выражению определяется степенью приближения одной из двух указанных нелинейностей к прямолинейному, равномерному распределению.

$$\eta_m = \left(\frac{1}{s}\right) \iint \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y) \} dx dy. \quad (1)$$

$$\eta = \Omega \sin^2 \{ \Psi f(EV) \}. \quad (2)$$

Здесь и далее, аналогично [1, 2], экспозиция E приводится в нормированных единицах так, что $E=1$ изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к росту аргумента под синусом, равному одному радиану. Таким образом, экспозиция $E=\pi/2$, при $\beta=1$ приводит к $\eta=100\%$ при видности $V=1$ в соответствии с выражением, найденным Когельником, в которое вырождается (2) при $\Psi f(EV)=EV$. В настоящей работе мы будем рассматривать случай линейного фотоотклика голографического материала, полагая везде далее $\beta(E)=1$.

Численный эксперимент

На рис. 1, а, приведена зависимость $\eta_m(E, V)$, рассчитанная по (1) при экспозиции гауссовым пучком. Для сравнения на рис. 1, б приведен график зависимости от нормированной экспозиции E классической когельниковской дифракционной эффективности (пунктирная кривая) и $\eta_m(E)$, рассчитанной по (1) для $V=1$. Видно, что $\eta_m(E, V)$ на рис. 1, а растет нелинейно, как бы сначала забираясь на первую ступеньку, а потом на следующую.

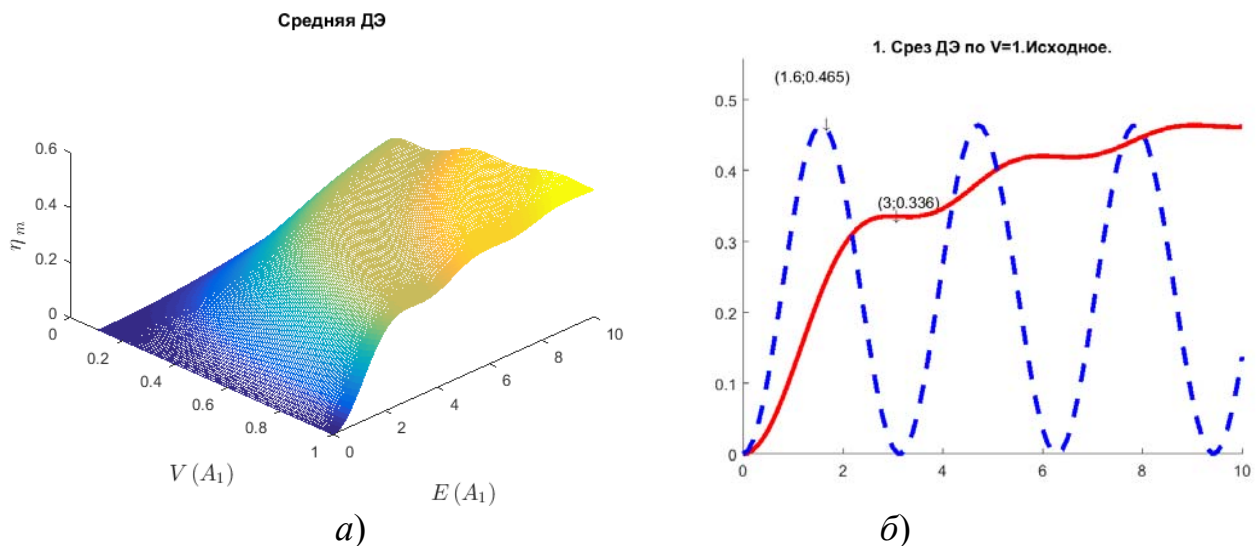


Рис. 1: а) зависимость η_m от экспозиции E и видности V ; б) графики среза из рис. 1, а при $V=1$ – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности для равномерного пучка (пунктирная кривая), уменьшенная примерно в 2 раза по амплитуде до максимальных значений η_m для удобства сравнения положений максимумов соответствующих кривых. Полученный формфактор $\Psi_I = 1.6/3.0 = 0.53$

Это связано с тем, что наиболее яркие участки голограммы гауссовых пучков достигая первыми максимальных локальных значений дифракционной эффективности, затем уменьшают свой вклад в нее, когда для них значение аргумента в (2) перерастает $\pi/2$. Следующий этап возрастания $\eta_m(E, V)$ возникает при прохождении аргументом $3\pi/4$ и т. д. Отношение экспозиций, при которых дифракционная эффективность достигает максимума в $[1, 2]$ определено, как формфактор, то есть фактор формы, влияющий на скорость достижения максимально возможной дифракционной эффективности и величину этого максимума.

Для гауссовых пучков, в случае линейного фотоотклика (рис. 1, б) формфактор $\Psi_I = 1.6/3.0 = 0.53$.

Изменяя форму пучка, можно влиять на статистику распределения яркости записываемого на голограмму изображения. При этом допустимы только такие изменения, которые не приводят к нарушению структуры записываемого на голограмму сигнала (изображения). К ним могут относиться: расфокусировка, удаление объекта, изменение видности по полю и даже по объему регистрируемого изображения.

На рис. 2, в приведены рассчитанные по (1) графики $\eta_m(E)$ при $V=1$ для голограммы портретного изображения. Видно (рис. 2, б), что статистические распределения яркости портретного изображения близко к гауссовому распределению, его отклонение от гауссового составляет всего 17.9%, что объясняет практическое совпадение полученного (рис. 2, в) формфактора $\Psi_2 = 1.56/2.93 = 0.53$ с формфактором Ψ гауссовых пучков.

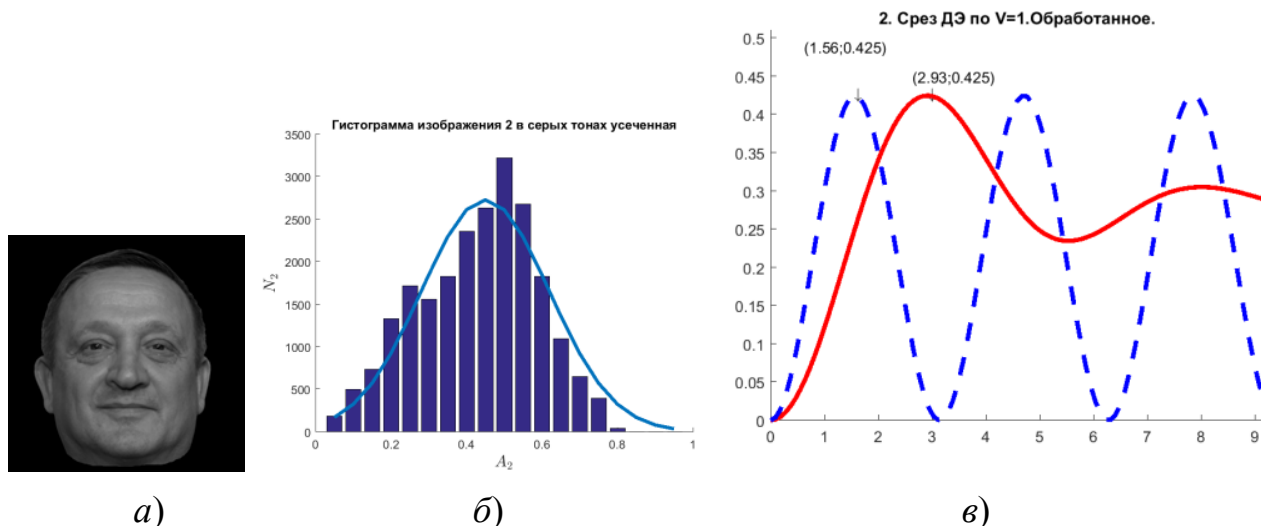


Рис. 2: а) портретное изображение; б) гистограмма статистического распределения яркости портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссова пучка 17.9%; в) дифракционная эффективность голограммы портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая).
 Полученный формфактор $\Psi_2 = 1.56/2.93 = 0.53$

Далее, на рис. 3, приведен случай записи расфокусированного изображения, при котором детали изображения (рис. 3, а) размываются и статистическое распределение яркости (рис. 3, б) меньше похоже на гауссово, его отклонение от гауссового составляет уже 27.5%. Как видно из рис. 3в, величина формфактора, при такой расфокусировке несколько растет ($\Psi_3 = 1.54/2.45 = 0.63$).

Следует отметить, что при большей в 2.5 раза расфокусировке (рис. 4) статистическое распределение яркости (рис. 4, б) еще больше искажается (его отклонение от гауссовой формы уже 45.2%), но несмотря на это, величина формфактора ($\Psi_4 = 1.54/2.48 = 0.62$) остается практически неизменной.

Это объясняется тем, что при вычислении формфактора значительное влияние оказывает синусоидальная нелинейность в (2), на аргумент которой и влияют локальные значения яркости в отличие от их линейного, пропорционального учета в статистическом распределении яркости. Таким образом, можно сделать вывод, что формфактор, как некоторый аналог интеграла движения является более стабильным к дефокусировкам, чем статистическое распределение яркости.

Другим случаем изменения распределения яркости объектного пучка в голографии является удаление объекта от плоскости голограммы, на поверхность которой в этом случае попадает не само изображение объекта голографирования, а его преобразование Френеля. На рис. 5, 6 приведены изображения, соответствующие преобразованиям Френеля в ближней и дальней зонах дифракции (расстояния до голограммы отличаются в 1,5 раза).

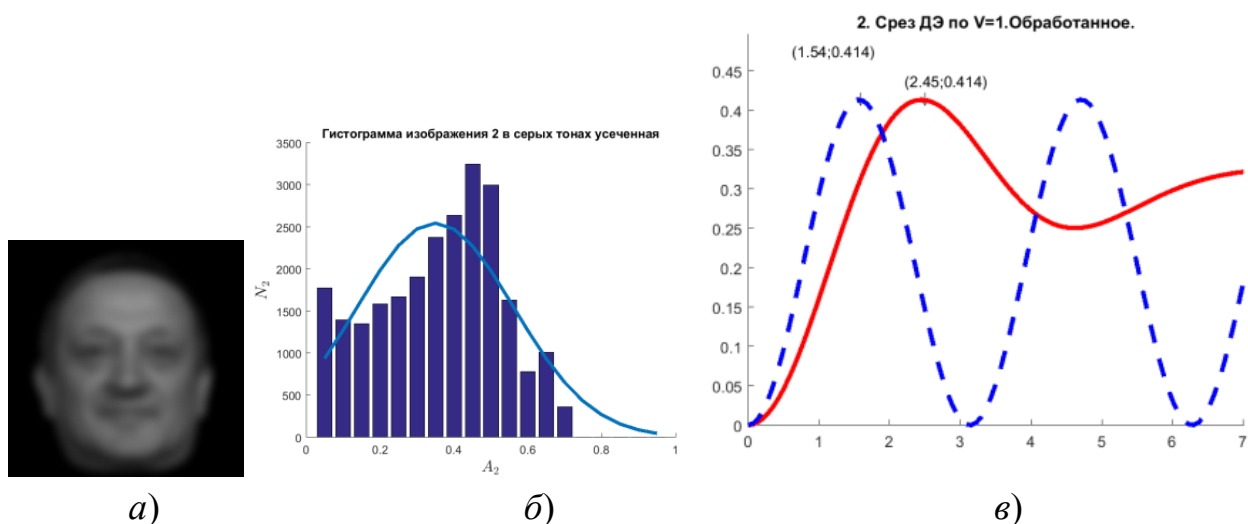


Рис. 3: а) портретное изображение, расфокусированное на 1%; б) гистограмма статистического распределения яркости слабо расфокусированного портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссового пучка 27.5%; в) дифракционная эффективность голограммы слабо расфокусированного портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю, когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая).
Полученный формфактор $\Psi_3 = 1.54/2.45 = 0.63$

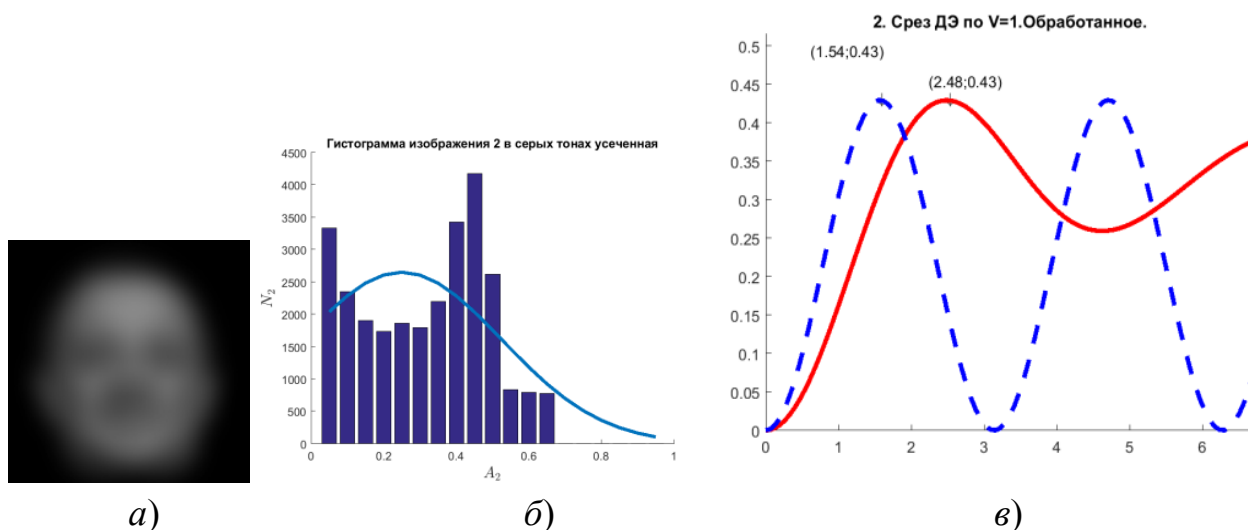


Рис. 4: а) расфокусированное портретное изображение; б) гистограмма статистического распределения яркости значительно расфокусированного портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссового пучка 45.2%; в) дифракционная эффективность голограммы такого расфокусированного портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю, когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая).
Полученный формфактор $\Psi_4 = 1.54/2.48 = 0.62$

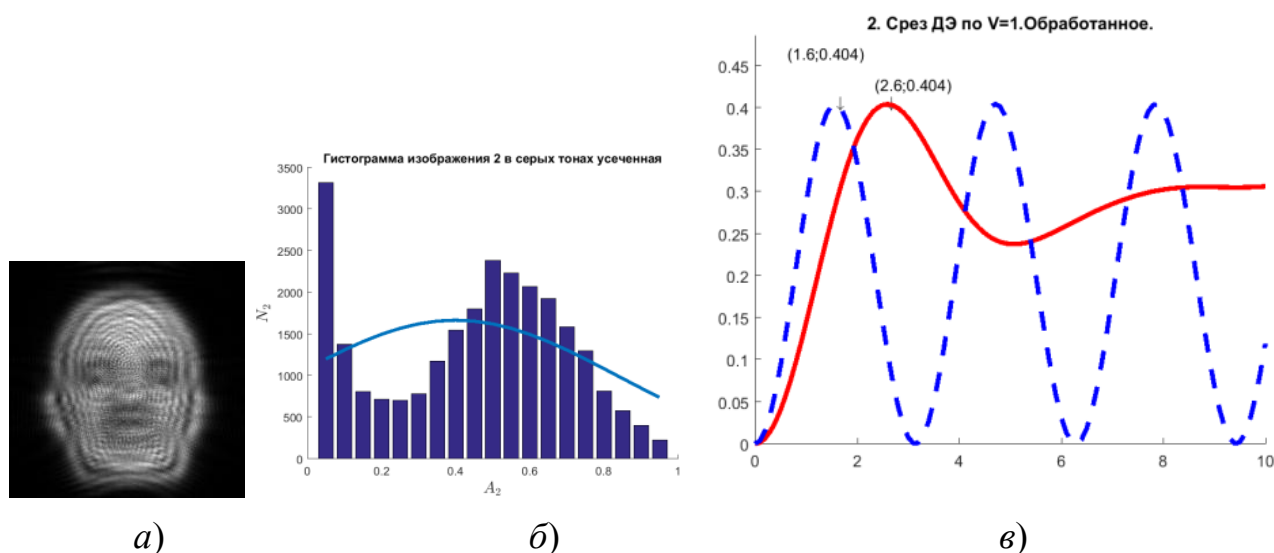


Рис. 5: а) изображение в ближней зоне дифракции; б) соответствующая ему гистограмма распределения яркости, дисперсия отклонения от гаусса 47.9%; в) графики средней дифракционной эффективности по (1) при $V=1$ – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности по (2) при $\Psi f(EV)=EV$ для равномерного пучка (пунктирная кривая).
Полученный формфактор $\Psi_5=1.6/2.6=0.61$

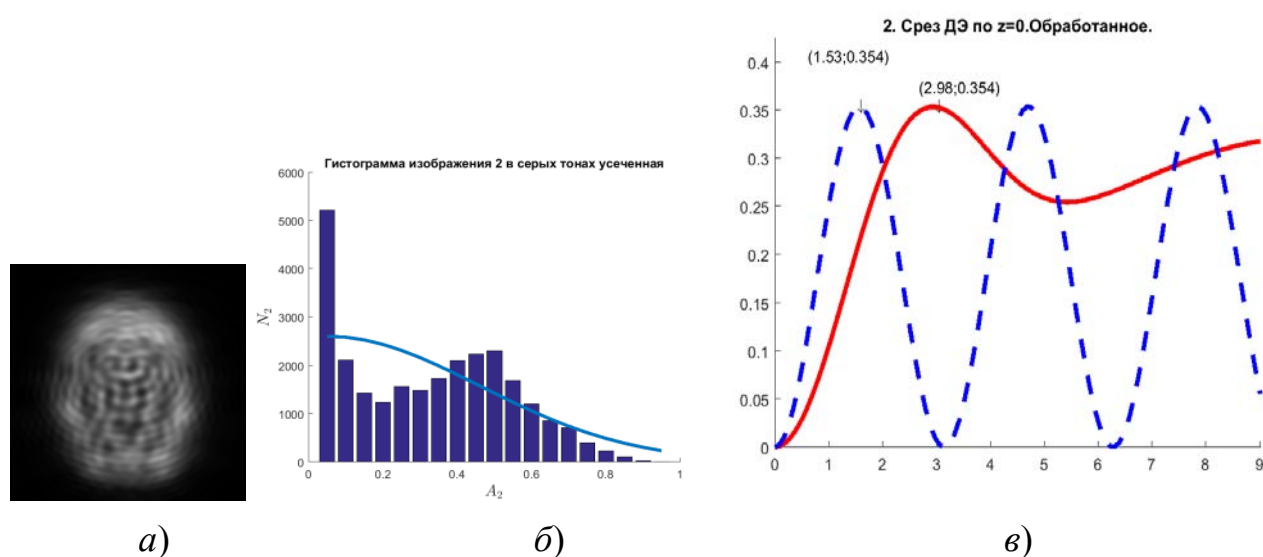


Рис. 6: а) изображение в дальней зоне дифракции; б) соответствующая ему гистограмма распределения яркости, дисперсия отклонения от гаусса 48.4%; в) графики средней дифракционной эффективности по (1) при $V=1$ – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности по (2) при $\Psi f(EV)=EV$ для равномерного пучка (пунктирная кривая).
Полученный формфактор $\Psi_5=1.53/2.98=0.51$

Гистограмма яркости (6б) значительно отличается от гауссовой формы, а величина формфактора остается близкой к формфактору исходного изображения. Причем, с удалением от объекта голографирования сначала формфактор возрастает почти на 20%, (рис. 5), а затем снова приходит почти к прежнему значению (рис. 2, 6).

Заключение

Следует отметить, что все вышеприведенные методы модификации записываемых на голограмму изображений не дают существенного изменения средней дифракционной эффективности голограмм, а также практически не влияют на величину оптимальной экспозиции, что еще раз подтверждает устойчивый характер параметра, названного в [4, 5] формфактором. Таким образом, можно считать, что формфактор как для голограмм гауссовых пучков, так и для голограмм сложных, многофакторных изображений, имеет некоторое сходство с «интегралом движения», оставаясь практически постоянным при существенных искажениях записываемого на голограмму изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шойдин С. А. Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 5. – С. 71–76.
2. Shoydin S. A. Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms ISSN 1060-992X, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2014, Vol. 23, №4, pp. 287-294. Allerton Press, Inc., 2014.
3. Шойдин С. А. О требованиях к параметрам источника излучения для голографии // Сб. трудов Санкт-Петербургского государственного университета. - СПб, 2013. - С. 94-107.
4. Шойдин С. А. Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. – 2016. -Т. 83. - №5. -С. 65-75.
5. Шойдин С. А. Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора // Компьютерная оптика. – 2016. -Т. 40. - № 4. -С. 501-507.
6. Кольер Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; монография пер. с. англ. – М.: Мир, 1973. – С. 289.

REFERENCES

1. Shoydin S.A. Diffraction efficiency of holograms recorded by Gaussian beams. Interexpo Geo-Siberia – 2015. SibOptics – 2015: Sat. materials of the international. sci. Conf. – Novosibirsk: Publishing house of Sib. University of Geosystems and Technologies, 2015. – Vol. 5. – Pp. 71-76.
2. Shoydin S. A. Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms ISSN 1060-992X, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2014, Vol. 23, №4, pp. 287-294. Allerton Press, Inc., 2014.
3. Shoydin S. A. On the requirements to the parameters of the radiation source for holography. Lasers. Measurements. Information. 2013: Sat. doc. – St. Petersburg.: Publishing House of St. Petersburg. Polytechnic. Univ., 2013. – Vol. 1. – Pp. 94-107.

4. Shoydin S. A. Requirements for laser radiation and the form factor of holograms. Optical Journal. – 2016. – Vol. 83. – №5. Pp. 65-75.
5. Shoydin S. A. The method for achieving the maximum diffraction efficiency of holograms on the basis of optimizing the form factor. Computer Optics. – 2016, Vol. 40, №4. – Pp.501-507.
6. Robert J. Collier. Optical Holography / Robert J. Collier, Christoph B. Burckhardt, Lawrence H. Lin. Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey / Academic Press New York and London, 1971. – P. 289.

© С. А. Шойдин, А. В. Трифанов, А. Л. Пазоев, 2018

ФОРМФАКТОР ГОЛОГРАММ ПОРТРЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сергей Александрович Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)291-00-92, e-mail:shoydin@ssga.ru

Александр Владимирович Трифанов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

Для случая фазовых объемных голограмм показана применимость использования формфактора для голограмм реального изображения. Полученные результаты доказывают, что значения формфактора для сложных изображений, имеющих гауссову статистику распределения яркости, близки к величине формфактора для голограмм гауссовых пучков, что увеличивает применимость последнего в целом ряде практических задач.

Ключевые слова: лазер, голография, дифракционная эффективность, формфактор, видность, степень когерентности, гауссов пучок, голографический портрет.

FORMFACTOR OF IMAGE HOLOGRAMS

Sergey A. Shoydin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Aleksandr V. Trifanov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383) 361-07-31, e-mail: trifanov.alex@mail.ru

For the case of phase volumetric holograms, the applicability of the use of the formfactor for real image holograms is shown. The obtained results prove that the values of the formfactor for complex images having a Gaussian brightness distribution statistics do not differ much from the formfactor of holograms of Gaussian beams.

Key words: laser, hologram, formfactor, diffraction efficiency, gaussian beam, visibility, coherence degree, holoportrait.

Введение

Ранее показано [1–5], что учёт фактора формы голограммы позволяет точнее определять её оптимальную экспозицию и величину дифракционной эффективности неоднородной по полю голограммы. В настоящей работе исследованы основные свойства фактора формы при записи голограммы реального изображения, представленного портретом человека.

Как показано в [5], формфактор Ψ у голограммы вычисляется как поправочный коэффициент в классическом выражении (1) для величины дифракционной эффективности η .

$$\eta = \Omega \sin^2 \{ \Psi f(EV) \} \quad (1)$$

Здесь E – экспозиция голограммы, V – видность интерференционной картины при её записи, Ω – максимальное значение средней дифракционной эффективности, а Ψ – формфактор голограммы. Аналогично [5] вычислялись значения $\eta_m(E_1, V)$ по (2), где η_m – средняя по полю голограммы дифракционная эффективность, s – её площадь.

$$\eta_m = \left(\frac{1}{s} \right) \iint \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y) \} dx dy \quad (2)$$

В дальнейших расчётах $f(E, V)$, бралась такой же, как в [5]:

$$f(E, V) = \beta(E) \cdot E \cdot V \quad (3)$$

Здесь $\beta(E)$ – голографическая чувствительность, хорошо аппроксимирующая [6] реальный фотоотклик голографического материала «Реоксан» при $E_0 = 5$ дж/см² и $\beta_0 = 1$.

$$\beta(E) = \beta_0 / (1 + E / E_0) \quad (4)$$

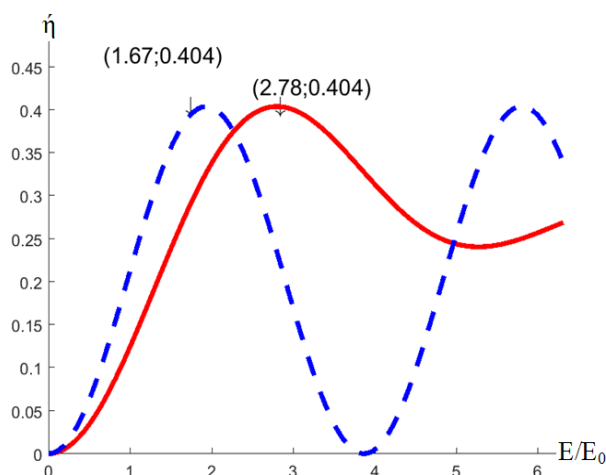
По выражению (2) находится положение первого максимума $\eta_m(E)$ и по его положению определяется величина Ψ так, чтобы аргумент в (1) в той же координате E_1 был равен $\pi/2$, т. е. η в (1) достигала первого максимума.

Численный эксперимент

На рис. 1 *а, б* приведено исходное изображение и вычисленная по (2) для него зависимость дифракционной эффективности от экспозиции – сплошная кривая. Для сравнения приведена пунктиром дифракционная эффективность, вычисленная по (1) при $\Psi \cdot \beta(E) = 1$, т. е. для случая плоской однородной волны, как в [7]. Видно, что отношение экспозиции, при которой достигается максимум пунктирной кривой к экспозиции, при которой достигается максимум сплошной кривой, формфактор $\Psi = 0,6$, что близко к формфактору гауссовых пучков, полученному в [4, 5]. Это связано с тем, что статистическое распределение яркости в реальных изображениях может приближаться к гауссовому в силу ЦПТ. Действительно, реальные изображения являются сложными комбинациями различных оптических явлений, происходящих со множеством объектов, и поэтому в силу ЦПТ тяготеют к гауссову распределению яркости.



а)

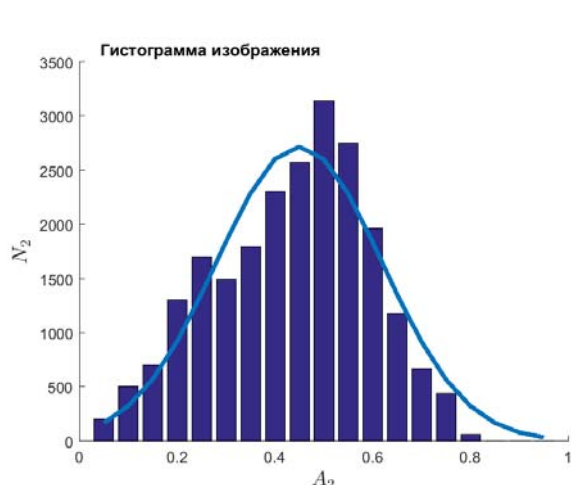


б)

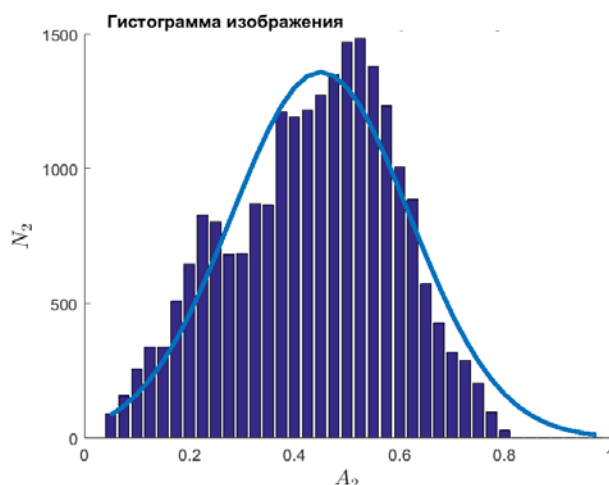
Рис. 1. Изображение, использованное для вычисления формфактора (а);
графики зависимости дифракционной эффективности
от относительной экспозиции (б):

сплошная кривая – вычисления по (2), пунктирная – по (1) при $\Psi \cdot \beta(E) = 1$

На рис. 2 приведены две гистограммы изображения рис. 1, из которых видно, что распределение яркости действительно стремится к гауссовому. Причём это происходит независимо от количества отсчётов, взятых для гистограммы. Так, отличие статистики яркости от гауссовой кривой на рис. 2, а отличается от статистики на рис. 2, б лишь на одну сотую. Это говорит о том, что статистическое распределение яркости изображения на рис. 1 при увеличении числа отсчётов стремится к собственному распределению, хотя и близкому к гауссову. Однако вопрос о том, каков критерий сложности изображения, приближающего его к гауссовой статистике яркости, остается открытым.



а)



б)

Рис. 2. Гистограмма распределения яркости в изображении портрета:

а) 16 отсчетов; б) 31 отсчет

Справедливость утверждения, что формфактор портретных изображений стремится к формфактору гауссовых пучков, была проверена на массиве из 31 портрета*. На рис. 3 приведены вычисленные по (2) значения формфактора для этих изображений. Среднее значение для них получилось $\Psi = 0,60$.

Для определения репрезентативности полученного результата исследовалась сходимость дисперсии при увеличении числа отсчётов начиная от 5 портретов и до 31. На рис. 4 приведены кривые сходимости доверительного интервала при вычислении дисперсии значений формфактора (рис. 1) начиная с дисперсии по 5 портретам и заканчивая дисперсией формфактора по 31 портрету. Видна хорошая сходимость к среднему значению, что указывает на репрезентативность приведённой выборки из 31 портрета.

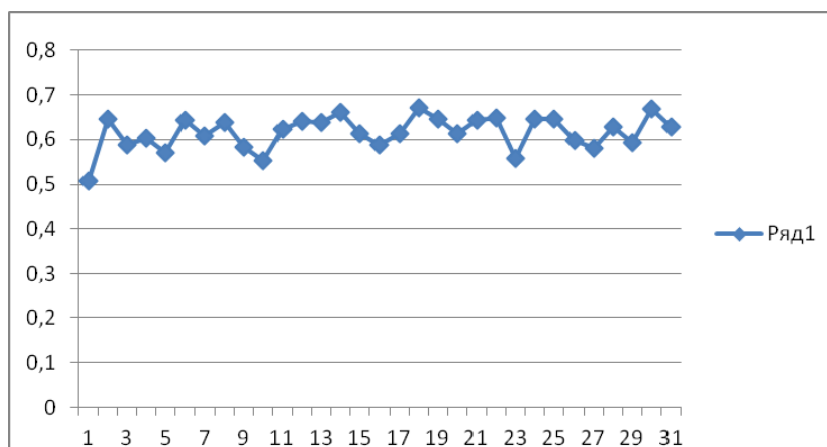


Рис. 3. Среднее значение формфактора для 31 портрета:
по оси абсцисс — порядковый номер исследуемого портрета, по оси ординат — величина формфактора Ψ

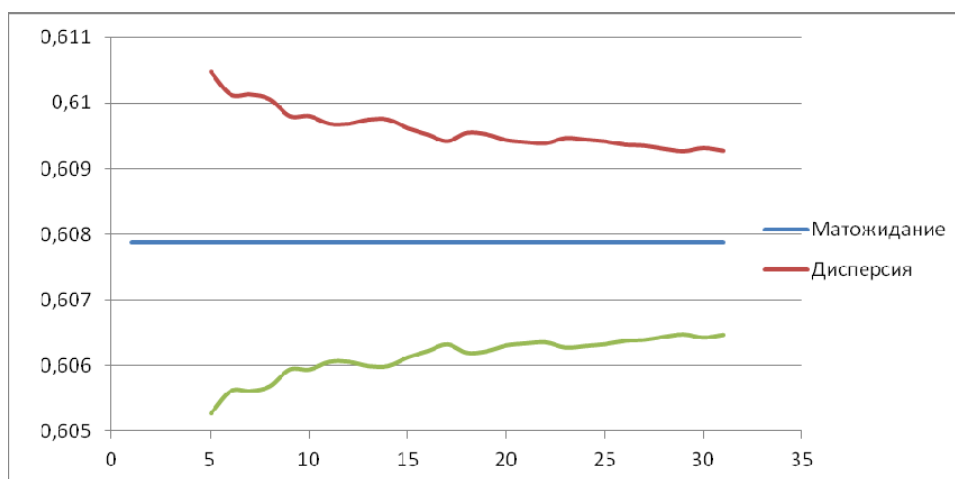


Рис. 4. Сходимость дисперсии при увеличении количества обработанных портретов:
прямая на уровне 0,60 — среднее значение формфактора для 31 портрета; сверху и снизу — кривые отклонения от среднего значения на величину дисперсии по 5 и более измерениям (до 31)

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что для голограмм реальных изображений, сформированных сложными по форме пучками, применима технология вычисления и практического использования формфактора. Записывающие голограмму пучки, имеющие сложное, многофакторное (хотя и не гауссово по полю) распределение яркости, в силу ЦПТ, также стремятся к гауссовой статистике распределения яркости. На примере реального изображения проиллюстрирован подход к определению формфактора для изобразительных голограмм. Доказано хорошее совпадение формфактора голограмм реальных портретных изображений с формфактором голограмм гауссовых пучков.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за предоставленные фотографии группе студентов ОЗИ-21 СГУГиТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шойдин С. А. Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 71–76.
2. Shoydin S. A. Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23 (4). – P. 287–294.
3. Шойдин С. А. О требованиях к параметрам источника излучения для голографии // «Лазеры. Измерения. Информация – 2013»: сб. докладов в 3 т. (Санкт-Петербург, 5–6 июня 2013 г.). – СПб. : СПб. Политехнич. ун-т, 2013. – Т. 1. – С. 94–107.
4. Шойдин С. А. Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 5. – С. 65–75.
5. Шойдин С. А. Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 501–507.
6. Шойдин С. А., Сандер Е. А., Суханов В. И. Исследование голографической записи двоичной информации в объемной регистрирующей среде реоксан. Оптическая голография. – Л. : Наука, 1983. – С. 77–89.
7. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография : монография, пер. с англ. – М. : Мир, 1973. – С. 289.

REFERENCES

1. Shoydin, S. A. (2015). Diffraction efficiency of holograms recorded by Gaussian beams. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2015 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2015] (pp. 71–76). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
2. Shoydin, S. A. (2014). Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms. Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), 23(4), 287–294. ISSN 1060-992X.

3. Shoydin, S. A. (2013). On the requirements to the parameters of the radiation source for holography. In Sbornik dokladov "Lazery. Izmereniya. Informatsiya. 2013": T. 1 [Proceedings of "Lasers. Measurements. Information. 2013": Vol. 1] (pp. 94–107). Saint-Petersburg: SpbPU [in Russian].
4. Shoydin, S. A. (2016). Requirements for laser radiation and the form factor of holograms. *Journal of Optical Technology*, 83(5), 318–326. doi: 10.1364/JOT.83.000318.
5. Shoydin, S. A. (2016). A method of achieving the maximum diffraction efficiency of holograms based on optimizing the form factor. *Computer Optics*, 40(4), 501–507. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507.
6. Shoydin, S. A., Sander, E. A., & Sukhanov, V. I. (1983). Issledovanie golograficheskoy zapisi dvoichnoy informatsii v ob'emnoy registriruyushchey srede reoskan. *Opticheskaya golografiya* [Investigation of holographic recording of binary information in the 3-D recording material the Reoxan. *Optical holography*]. Saint-Petersburg: Science [in Russian].
7. Collier, R. J., Burckhardt, Ch. B., & Lin, L. H. (1971). *Optical Holography*. New York: Academic Press.

© С. А. Шойдин, А. В. Трифанов, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>А. Г. Полеицук, А. Е. Качкин, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, В. Н. Хомутов, А. Г. Седухин.</i> Разработка сканирующего лазерного нанолитографа для исследований по сверхразрешающей записи дифракционных наноструктур	3
2. <i>Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников.</i> Особенности оптических свойств голографических структур на основе фотополимерных материалов.....	9
3. <i>В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, А. Е. Колдаев.</i> Оптические аксиконы, полученные вакуумным напылением	16
4. <i>А. А. Кутанов, Нурбек Сыдык уулу, З. М. Казакбаева.</i> Трехмерная лазерная запись изображений на пленках аморфного кремния	24
5. <i>П. С. Завьялов, М. С. Кравченко, М. В. Савченко, В. В. Уржумов.</i> Стереоскопический метод контроля торцевой поверхности топливных таблеток с использованием дифракционных фокусаторов.....	30
6. <i>Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, Т. С. Маганакова.</i> Осевые aberrации высших порядков фокусирующего дифракционного оптического элемента	42
7. <i>Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова.</i> Ахроматизация двух осевых ГОЭ с исправленными сферическими aberrациями третьего порядка	48
8. <i>А. Д. Безруков, И. А. Зарубин.</i> Расчет внеосевой зеркальной осветительной системы входной щели светосильного спектрометра.....	54
9. <i>С. А. Арбузов, Е. В. Грицкевич.</i> Использование цифровых камер для мультиспектральной съемки с беспилотного воздушного судна.....	62
10. <i>Д. Н. Бокк, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин, В. Г. Гаранин.</i> Определение неметаллических включений в сталях на спектрометре «Гранд-Эксперт» с регистрацией спектров единичных искр линейными твердотельными фотодетекторами	68
11. <i>К. Д. Волкова, Т. Н. Хацевич.</i> Особенности проектирования объективов телескопических панкратических систем	80
12. <i>В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Г. А. Поздняков.</i> Компьютерная расшифровка аналоговых голограмм.....	95
13. <i>М. Б. Куксенко, К. В. Судариков, Е. В. Строганова.</i> Терагерцовая спектроскопия градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с развитой изоморфной структурой	103
14. <i>Е. В. Дружкин, Т. Н. Хацевич.</i> Сравнительная оценка малогабаритных тепловизионных приборов.....	111
15. <i>В. С. Корнеев, В. А. Райхерт, Д. С. Михайлова.</i> Компьютерная обработка в учебных целях изображений интерференционных и дифракционных картин, получаемых видеокамерами	118

16. И. А. Зарубин, В. А. Лабусов, С. А. Бабин. Сравнение малогабаритных спектрометров, построенных по разным оптическим схемам.....	126
17. А. В. Бритвин, И. С. Месензова, Н. А. Павлов, А. В. Поважаев, Б. В. Поллер. Экспериментальные характеристики распространения ультрафиолетовых многолучевых сигналов на трассах обсерватории «Кайтанак» в Республике Алтай.....	134
18. В. Г. Меледин. Лазерная доплеровская полупроводниковая анемометрия.....	141
19. А. В. Бритвин, А. В. Поважаев, Н. С. Никитенко, Б. В. Поллер. Характеристики оптико-электронной системы для контроля подвижных объектов и сред в приземной зоне лазерного мониторинга.....	151
20. О. В. Пелипасов, О. В. Комин. Определение температуры азотной микроволновой плазмы атмосферного давления, образованной в резонаторах с модами H_{10} и H_{011}	158
21. А. И. Пеньковский, М. В. Фаттахова. Поляриметрический способ измерения постоянной Верде прозрачных веществ.....	167
22. А. А. Голицын, Н. А. Сейфи. Использование ПЗС-матриц в составе активно-импульсных приборов наблюдения	174
23. З. В. Семенов, В. А. Лабусов, И. А. Зарубин. Система спектрального контроля нанесения многослойных оптических покрытий в широком спектральном диапазоне	179
24. С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. Г. Меледин, О. Ю. Садбаков. Лазерная дифференциальная облачная триангуляция с видеопотоковой синхронизацией	192
25. Н. А. Колосов, С. С. Болдова. База данных спектральных линий для атомно-абсорбционного спектрального анализа с непрерывным источником спектра.....	202
26. А. В. Бритвин, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, Б. В. Поллер. Энерго-временные преобразования лазерных импульсов в полимерных структурах с люминофорами для систем телекоммуникаций с беспилотными летательными аппаратами	211
27. А. О. Лебедев, Б. Н. Новгородов. Алгоритм стабилизации видеоизображения при наличии в поле зрения быстро движущихся объектов.....	222
28. В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Д. С. Хайдуков. Регистрация и расшифровка цифровых голограмм	229
29. Н. Н. Налбантов, А. А. Квас, Е. В. Строганова. Оптимизация квантовой эффективности и спектральная селекция ИК-излучения неоднородно легированных кристаллов Yb, Er: $LiNbO_3$	237
30. М. А. Завьялова, А. В. Мерецук. Структурирование оптических прозрачных сред импульсами пикосекундного лазера	244

31. <i>С. А. Шойдин, А. В. Трифанов, А. Л. Пазоев.</i> Формфактор голограмм и модификация статистики распределения яркости записываемых на голограмму изображений.....	258
32. <i>С. А. Шойдин, А. В. Трифанов.</i> Формфактор голограмм портретных изображений	266

CONTENTS

1. <i>A. G. Poleschuk, A. E. Kachkin, V. P. Korolkov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, A. G. Sedukhin.</i> Development of Scanning Laser Nanolithography System for Study of High Resolution Writing of Diffractive Nanostructures.....	3
2. <i>E. F. Pen, V. V. Shelkovnikov.</i> Features of Optical Properties of Holographic Structures Based on Photopolymer Materials.....	9
3. <i>V. I. Nalivaiko, M. A. Ponomareva, A. E. Koldaev.</i> Optical Axicons Obtained by Vacuum Deposition	16
4. <i>A. A. Kutanov, Nurbek Sydyk uluu, Z. M. Kazakbaeva.</i> 3D Laser Image Recording on Amorphous Silicon Layer.....	24
5. <i>P. S. Zavyalov, M. S. Kravchenko, M. V. Savchenko, V. V. Urzhumov.</i> Stereoscopic Method of Inspection the Fuel Pellets Face Surface with the Use of Diffraction Focusers	30
6. <i>Yu. Ts. Batomunkuev, A. A. Dianova, T. V. Maganakova.</i> Axial Aberrations of Higher Orders of Focusing Diffractive Optical Element.....	42
7. <i>Yu. Ts. Batomunkuev, A. A. Dianova.</i> Achromatization of Two Axial Goe with Corrected Third-Order Spherical Aberrations.....	48
8. <i>A. D. Bezrukov, I. A. Zarubin.</i> Off-Axis Mirror Lightning System Calculation for High-Aperture Spectrometer Slit	54
9. <i>S. F. Arbuzov, E. V. Gritskevich.</i> Use of Digital Cameras for Multispectral Survey Fulfilled from an Unmanned Aircraft	62
10. <i>D. N. Bock, V. A. Labusov, I. A. Zarubin, V. G. Garanin.</i> Determination of Non-Metallic Inclusions in Steel Using «Grand-Expert» Spectrometer with Linear Solid-State Photodetectors Registering Single-Spark Spectra	68
11. <i>K. D. Volkova, T. N. Khatsevich.</i> Features of Designing Objective for Telescopic Zoom Systems	80
12. <i>V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, G. A. Pozdnjakov.</i> Computer Decoding of Analog Holograms	95
13. <i>M. B. Kuksenko, K. V. Sudarikov, E. V. Stroganova.</i> Thz Spectroscopy of Non-Uniformly Doped Crystals of LiNbO_3 with Highly-Isomorphic Structure	103
14. <i>E. V. Druzhkin, T. N. Khatsevich.</i> The Comparative Evaluation of Compact Infrared Devices.....	111
15. <i>V. S. Korneyev, V. A. Reichert, D. S. Mikhailova.</i> Computer Processing of Interference and Diffraction Pictures Images Obtained by Video Cameras for Educational Purposes.....	118
16. <i>I. A. Zarubin, V. A. Labusov, S. A. Babin.</i> Comparison of Compact Spectrometers Designed by Different Optical Schemes	126

17. <i>A. V. Britvin, I. S. Mesenzova, N. A. Pavlov, A. V. Povazhaev, B. V. Poller. Experimental Characteristics of Ultraviolet Multilayer Signals Distribution on the Trails of Kaitanak Observatory in the Republic of Altai.....</i>	134
18. <i>V. G. Meledin. Laser Doppler Semiconductor Anemometry.....</i>	141
19. <i>A. V. Britvin, A. V. Povazhaev, N. S. Nikitenko, B. V. Poller. Characteristics of the Optical-Electronic System for Inspection of Moving Objects and Environment in the Ground Laser Monitoring Zone</i>	151
20. <i>O. V. Pelipasov, O. V. Komin. Determination of Atmospheric Pressure Nitrogen Microwave Plasma Temperature in H₁₀ and H₀₁₁ Resonators.....</i>	158
21. <i>A. I. Penkovsky, M. V. Fattakhova. Polarimetric Method of Verdet Constant of Transparent Substances Measurement.....</i>	167
22. <i>A. A. Golitsyn, N. A. Seyfi. The Use of CCD Image Sensor as a Component of a Gated-Viewing Device</i>	174
23. <i>Z. V. Semenov, V. A. Labusov, I. A. Zarubin. Broadband Monitoring System for Deposition of Multilayer Optical Coatings</i>	179
24. <i>S. V. Dvoynishnikov, G. V. Bakakin, V. G. Meledin, O. Yu. Satbakov. Laser Differential Cloudy Triangulation with Video Stream Synchronization.....</i>	192
25. <i>N. A. Kolosov, S. S. Boldova. Database of Spectral Lines for Atomic-Absorption Spectral Analysis with Continuous Spectrum Source</i>	202
26. <i>A. V. Britvin, N. S. Nikitenko, V. F. Plyusnin, B. V. Poller. Energy-Time Transformations of Laser Pulses in Polymeric Structures with Luminophores for Telecommunication Systems with Unmanned Aerial Vehicles</i>	211
27. <i>A. O. Lebedev, B. N. Novgorodov. Stabilization Algorithm of Video with Fast Moving Objects in the Field of Vision.....</i>	222
28. <i>V. I. Guzhov, S. P. Ilinykh, D. S. Hajdukov. Registration and Decoding of Digital Holograms.....</i>	229
29. <i>N. N. Nalbantov, A. A. Kvas, E. V. Stroganova. Optimisation of Quantum Efficiency and Spectral Selection of Ir-Radiation by Non-Uniformly Doped Yb, Er: LiNbO₃ Crystals.....</i>	237
30. <i>M. A. Zavyalova, A. V. Mereshchuk. Structuring of Optical Transparent Mediums by Pulses of Picosecond Laser</i>	244
31. <i>S. A. Shoydin, A. V. Trifanov, A. L. Pazojev. Formfactor and Modification of Statistics of Intensity Distribution on the Hologram.....</i>	258
32. <i>S. A. Shoydin, A. V. Trifanov. Formfactor of Image Holograms</i>	266

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XIV Международный научный конгресс

Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2018»

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 18.10.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 16,10. Тираж 100 экз. Заказ 161.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 8.