

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

X Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

СибОптика-2014

Т. 1

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2014

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств
и технологий СГГА, Новосибирск
В. С. Айрапетян

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии
и технологии оптического производства СГГА, Новосибирск
О. В. Минин

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем
и оптотехники СГГА, Новосибирск
Д. В. Чесноков

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

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля
2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. ма-
териалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 260 с.

ISBN 978-5-87693-717-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-716-2

ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Ин-
терэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции
«СибОптика-2014».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-717-9 (т. 1)

ISBN 978-5-87693-716-2

ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

Сборник включен в систему РИНЦ.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУКИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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;

ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, генеральный директор, тел. (383)330-87-82, e-mail: director@ioit.ru

Представлен обзор ряда оптоэлектронных информационных систем для научных исследований, инновационных и импортозамещающих промышленных технологий, широко внедренных на крупнейших предприятиях России.

Ключевые слова: оптоэлектронные информационные системы, лазерная доплеровская анемометрия, размерный контроль.

OPTOELECTRONIC INFORMATION SYSTEMS FOR SCIENCE AND INDUSTRY

Vladimir G. Meledin

Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, prospect akad. Lavrentieva, 1, Dr. of Sciences, Professor, Chief researcher, tel. (383)330-87-82, e-mail: meledin@itp.nsc.ru

Institute of Optic-Electronic Information Technologies. Public corporation, 630090, Russia, Novosibirsk, prospekt akad. Lavrentieva, 1, General Director, tel. (383)330-87-82, e-mail: director@ioit.ru

Is presented the review of the optoelectronic information systems for scientific researches, innovative and import substitution industrial technologies that widely introduced at the largest Russia enterprises.

Key words: optoelectronic information systems, laser Doppler anemometry, size control.

Введение

Прецизионные оптоэлектронные невозмущающие системы для измерений кинематики и структуры многофазных потоков в режиме обратного светорассеяния необходимы в экспериментальной механике, физике, химии, биологии, медицине, экологии, технике. Информация о скорости и геометрии получается при измерении пространственных характеристик и доплеровского сдвига частоты света, рассеянного на объекте, либо взвешенными в потоке и движущимися вместе с ним малыми частицами и фазовыми неоднородностями. Нанотехнологии, экспериментальная гидро-, газо- и плазмодинамика многофазных систем, безопасность, ресурс и экология в энергетике, в авиации, ракетной и атомной технике, судостроении, наземном транспорте, станко- и приборостроении – вот далеко не полный перечень областей, для которых применение подобных систем является жизненно важным. Особую актуальность в последнее время приобрела верификация расчетных кодов (CFD) и компьютерных моделей

течений в науке и в инновационных промышленных технологиях. Крайне необходимы такие оптоэлектронные информационные лазерные системы, не уступающие лучшим зарубежным аналогам, простые и безопасные в использовании, и для образовательных целей.

В обзоре представлен ряд научных достижений и практических результатов работ группы профессора В. Г. Меледина (Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН) в области физической экспериментальной диагностики и создания оптоэлектронных информационных систем для науки и промышленности. Представлены результаты, доказавшие на деле свою новизну, масштабность, эффективность, успешно используемые в различных областях науки и практики.

I. Лазерные доплеровские анемометры для фундаментальной и прикладной науки

Со времен первой публикации по лазерной доплеровской анемометрии (Yeh Y., Commins H. Z., 1964) прошло почти полвека. За это время в нашей стране тематика развивалась различными организациями. Сегодня явным лидером является научно-производственная группа из новосибирского Академгородка – ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий» (ОАО «ИОИТ») и «Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ИТ СО РАН).

Мировой уровень исследований коллектива основан на цикле работ 80-90-х гг. по созданию систем на газовых лазерах и разработке первых мощных инжекционных лазерных излучателей для оптического приборостроения (совместно с ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе, рук. академик Ж. И. Алферов). В результате появились первые в мире доплеровские измерители скорости и линейных размеров горячего проката для металлургии на полупроводниковых лазерах (серия «Альтаир»). Значительный научный задел обусловил создание информационно-измерительной системы «ЛАД-0xx» в 2003 г., на три года раньше появления лучшего мирового аналога (DANTEC), при частичной поддержке программы импортозамещения СО РАН.

Переход к полупроводниковым лазерам (к.п.д. 20–60 %) сделал возможным создание эффективных и малогабаритных по сравнению с системами на основе газовых лазеров (к.п.д. 0,03 %) информационно-измерительных систем с принципиально новыми функциональными возможностями. Однако по качеству оптического излучения, по его пространственной и временной когерентности и пригодности для метрологии полупроводниковые лазеры существенно уступают газовым.

Для того, чтобы заменить газовые высококогерентные лазеры полупроводниковыми в информационно-измерительных системах и в интерферометрах потребовались теоретические и экспериментальные исследования по ряду направлений. Выполнены теоретические исследования особенностей формирования и регистрации оптоэлектронных сигналов в условиях фотонного ограничения, исследования устойчивости анаморфотных схем, созданы новые методы пара-

метрической стабилизации волновых фронтов, созданы методы и устройства для фотоэлектронных преобразований оптических сигналов с динамическим диапазоном до 10^{16} по энергии.

Важнейшим направлением исследований был переход от работы с засеянными искусственными светорассеивающими частицами потоками, используемыми в зарубежных методиках, к обработке сигналов непредсказуемых по характеристикам светорассеяния естественных взвесей. Только при выполнении этого условия оказалось возможным создать бортовые подводные системы для исследований тонкой микроструктуры гидрофизических полей в океане в натуральных условиях.

Создание лазерных доплеровских информационно-измерительных полупроводниковых систем, работающих в режиме обратного светорассеяния от случайных взвесей в потоках, является нетривиальной научной задачей. Ее решение потребовало проведения комплекса мультидисциплинарных и фундаментальных исследований по всему спектру возникающих проблем: информатике, методам обработки сигналов, квантовой и акустооптике, радиофизике, однофотонному приему, системам сбора и обработки данных и т.д. В области обработки и преобразования оптоэлектронных сигналов от случайных взвесей создана группа методов, ориентированных на обработку эргодических процессов, предусматривающих временное разделение операций, отличающихся максимально возможной концентрацией энергии поля в измерительном объеме и максимальным отношением сигнал/шум.

Созданы информационно-измерительные полупроводниковые лазерные доплеровские системы для диагностики многофазных потоков (серия ЛАД-0х) предназначенные для бесконтактного измерения и визуализации двух и трех компонент вектора скорости газожидкостных многофазных, мутных потоков, а также концентрации светорассеивающих частиц. Создан вариант информационно-измерительной схемы трехкомпонентного анемометра на основе комбинации двухкомпонентных систем. Каждая такая система содержит все элементы оптических и электронных подсистем и работает с внешним компьютером по стандартному сетевому каналу. За счет реализации протокола ТСР физические эксперименты могут проводиться в дистанционном режиме, в закрытых и опасных зонах и на полигонах, эффективно использоваться в системе дистанционного образования.

Информационно-измерительные полупроводниковые лазерные доплеровские системы ЛАД-0х внедрены и используются во многих научных и учебных организациях России: ОАО «Силловые машины» (СПб, контроль и создание гидротурбин), Институте гидродинамики (диагностика вихрей и внутренних волн) СО РАН, Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (теплообмен, безопасность атомной энергетики, нанотехнологии), Пермском государственном университете (исследования конвекции), Томском государственном университете (исследования лесных пожаров), Исследовательском центре проблем энергетики Казанского НЦ РАН, Самарском государ-

ственном аэрокосмическом университете имени академика С. П. Королева (диагностика авиадвигателей) и т.д.

Научный и технический уровень достигнутых результатов иллюстрирует тот факт, что в 2012 г. Государственный первичный эталон воздушного потока России (ВНИИМ, СПб) был оснащен прецизионным лазерным полупроводниковым диагностическим комплексом (ЛАД-015). Выполнена завершенная разработка и созданы средства прецизионной лазерной диагностики первичного Государственного эталона единицы скорости воздушного потока России ГЭТ-150-2012 на основе методов прецизионной полупроводниковой лазерной доплеровской анемометрии. Многие характеристики созданной системы прецизионной лазерной диагностики и калибровки превышают характеристики лучших мировых аналогов.

За счет применения ряда оригинальных идей, методов и технических решений обеспечена расширенная неопределенность обновленного первичного эталона на уровне 0,14–0,3 % при измерении скорости воздушного потока в диапазоне 0,05–100 м/с ($P = 0,95$, $k = 2$). Успешно пройден этап государственных испытаний, первичной аттестации и сдаче обновленного государственного первичного эталона ГЭТ-150-2012 в эксплуатацию, завершается подготовка метрологами нового ГОСТа «Государственная поверочная схема для средств измерения скорости воздушного потока» в рамках государственной системы обеспечения единства измерений РФ.

В результате выполненных работ обновленный Государственный первичный эталон России ГЭТ-150-2012 вышел на лидирующие позиции в мире, что подтверждено результатами международных ключевых сличений национальных эталонов единицы скорости воздушного потока СИРМ ССМ-FF-КЗ, в которых принимали участие первичные эталоны шести стран – Японии, Кореи, Сингапура, Тайваня, США и России.

Уровень созданных лазерных доплеровских полупроводниковых анемометров отвечает современным требованиям инновационных и импортозамещающих промышленных технологий, а также прогнозируемому развитию фундаментальной и прикладной науки в обозримой перспективе.

II. Лазерные доплеровские измерители скорости и длины горячего проката для металлургии

Оптико-лазерные измерительные технологии существенно улучшают эффективность общих технологических процессов в металлургии, обеспечивают экономию металла, повышение качества и конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. Однако получение прецизионной информации о скорости и геометрии горячего проката в металлургии представляет собой совокупность сложных мультидисциплинарных научно-технических проблем.

Светорассеивающая поверхность горячего проката является совокупностью случайных шероховатостей. Результирующий оптический сигнал образуется как суперпозиция световых волн, рассеянных со случайными фазами на множестве центров, одновременно находящихся в пределах зондирующего оп-

тического поля. Множественная интерференция приводит к росту фазовых шумов, формирует мультифрактальный малоконтрастный сигнал и снижает точность измерений. На поверхности горячего металла непрерывно идут процессы окисления, влияющие на светорассеяние и возмущающие доплеровские спектры. Прокат при линейном смещении участвует во множественном движении, присутствуют вибрации, повороты, наклоны и изгибы, формирующие оптоэлектронные сигналы с очень большим динамическим диапазоном по энергии. Конвективные потоки вблизи горячего проката вызывают значительную рефракцию, пространственно и фазово модулирующую свет, содержат перемещающийся взвешенный аэрозоль, в изобилии присутствуют грязь и вода, в том числе в виде текущих пленок. Измерение размеров также связано с непростой научной проблемой точного динамического распознавания границ объекта и устойчивой интерполяции выпадений сигнала. Наконец, огромные массы и энергии, вовлеченные в металлургические процессы, требуют высочайшей надежности и устойчивости работы информационно-измерительных комплексов в целом.

Отмеченные факторы обуславливают достаточно высокую стоимость диагностического оборудования и систем, реализующих оптико-лазерные измерительные технологии в металлургии. Фактически, подобные диагностические системы обеспечивают получение первичной информации о непростой физике многофакторных производственных процессов, связанных с горячим и холодным металлом. Системы принципиально мультидисциплинарны и, с точки зрения производителей, требуют научно-технического авторского сопровождения (хотя бы на уровне периодических консультаций). Именно с этим фактором связана «экологическая ниша» для отечественных наукоемких предприятий. Зарубежные компании, пытаясь продать в России весьма дорогостоящее оборудование, как правило, не могут обеспечить требуемый уровень последующего научно-технического сопровождения. Очевидно, что внедрение отечественных наукоемких оптико-лазерных измерительных технологий в металлургии должно быть приоритетным направлением дальновидной технической политики, определяющим ее успех.

Первые в России лазерные доплеровские измерители скорости и длины горячего проката «Квазар-М», успешно эксплуатировавшиеся на Новосибирском металлургическом заводе (НМЗ) до 2007 г., были впервые разработаны и внедрены автором и коллегами в 1986 г. В 1985–1987 гг. были разработаны, реализованы и испытаны в условиях металлургического производства первые лазерные бесконтактные доплеровские измерители скорости и длины проката серии «Альтаир» на полупроводниковых лазерах разработки ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе (Ж. И. Алферов, Д. З. Гарбузов). Эти системы на момент создания обладали мировой новизной.

Представляет интерес сделанная еще в 1986 г. Институтом экономики и организации промышленного производства СО АН СССР оценка экономического эффекта от внедрения созданных оптико-лазерных измерительных технологий в черную металлургию в масштабах отрасли. Получены результаты: эко-

номия металла 1 422 744 тонн/год, общая экономическая эффективность от внедрения по отрасли – более 105 000 000 рублей (в ценах 1986 г.). Эффект получился столь впечатляющий, что в 1986 г. произошло принятие Министерством приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР Программы работ по созданию и МИНЧЕРМЕТОМ СССР по внедрению созданных лазерных доплеровских измерительных систем для металлургии в масштабах отрасли.

Для измерения скорости и длины проката на базе гелий-неоновых и полупроводниковых лазеров были разработаны оптоэлектронные доплеровские информационно-измерительные системы серий: «Квазар», «Альтаир», «ЛИ-803». В измерителях «Квазар» и «ЛИ-803» в качестве источника когерентного излучения использованы гелий-неоновые лазеры. Был выполнен полный цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и выпущены малые серии. Созданы и испытаны в 90-х годах на крупнейших металлургических предприятиях – Нижнетагильском (НТМК) и Западносибирском (ЗСМК) металлургических комбинатах информационно-измерительные системы «ЛИ-803м». Они отличались сверхдальней измерительной дистанцией (до 3–5 м, максимальная дальность зарубежного измерителя – 2 м) и предельной глубиной измерительной зоны (более 200 мм). Разработанные информационно-измерительные системы по основным техническим характеристикам превосходили западные аналоги и были лучше приспособлены к реальным условиям отечественного металлургического производства.

Теоретически и экспериментально обоснованы методы контроля и поверки точностных характеристик информационных систем, ориентированных на промышленные технологии. Проведены неоднократные производственные испытания разработанных систем в режиме «черного ящика» целиком, от базовых научных идей до особенностей практической реализации, когда погрешность в работе какого-либо метода, алгоритма или элемента делает невозможной точную работу системы в целом. В их числе испытания измерителя «Квазар-3М» на ЗСМК на непрерывно-заготовительном стане 850/730/580 после черновой группы клетей. Температура прокатываемых заготовок размером 150 × 150 × 80000 (сталь Ст3 ПС) составляла около 1000°С. Погрешность измерения линейного размера горячего проката созданными системами в реальных производственных условиях оказалась в 25 раз меньше погрешности штатной производственной системы контроля длин раскатов. Испытания показали значительные преимущества лазерных доплеровских измерительных систем по точности и надежности. Экспериментально была доказана возможность информационного мониторинга технологии прокатного производства в реальном времени и качества настройки последовательного ряда прокатных клетей в технологических линиях.

Наиболее полные испытания созданных информационно-измерительных систем были выполнены на НТМК в цехе прокатки широкополочных балок. Этот участок является последним во всей технологической цепочке комбината,

и внедрение инновационной прогрессивной технологии дало максимальную отдачу. Экспериментально было установлено, что среднее отклонение измеренной системой длины проката от истинной составляет не более 0,05 %, а максимальное – не более 0,099 %. Эти погрешности содержали компенсируемую систематическую составляющую, связанную с погрешностями установки при испытаниях оптоэлектронного датчика системы на прокатном стане. С тех пор система информационного лазерного контроля горячего проката ЛИ-803м заменила штатный измерительный комплекс, обладая на порядок более высокими функциональными характеристиками, точностью и надежностью.

На ЗСМК в 1997 г. впервые была получена информация о пространственных распределениях поперечных размеров горячего проката в обжимном цехе после клетей чистовой группы. С 1994 г. и по сей день информационно-измерительные комплексы ЛИ-803м находятся в непрерывной эксплуатации в системе учета продукции цеха широкополочных балок НТМК. За счет бесперебойной надежной работы информационно-измерительной системы обеспечены точные измерения скорости и длины горячего и холодного проката с общей погрешностью, не превышающей 0,1 % и суточным объемом контролируемой продукции \$ 3 000 000 (в ценах 1995 г.). В ходе работ по внедрению информационной системы было экспериментально установлено, что экономический эффект достигал величины \$ 100 000 в сутки, а срок окупаемости не превысил двух суток.

На основе оригинальной научной идеи об измерении размера через оценку интегральной энергетической светимости объекта в ближнем инфракрасном диапазоне разработаны информационно-измерительные системы для контроля поперечного размера горячего проката. Показано, теоретически и экспериментально, что полученные оценки оказываются устойчивыми по отношению к искажениям видимых границ объектов за счет рефракции, дифракции на аэрозоле и т. д. Впервые обеспечены точные измерения поперечного размера горячего проката с погрешностью не более 0,2 % при удалении от опасной зоны на 5–15 м.

Плодотворная научная идея позволила реализовать малогабаритный и недорогой информационно-измерительный комплекс, который доказал работоспособность в ходе испытаний, проведенных на НТМК. Впервые была получена информация о распределениях размеров горячих раскатов и температуры вдоль раската. Впервые были получены изменения высоты полки горячих балок, изменения температуры вдоль раската и пространственные границы «языков». Подобные системы использовались также ОАО «Силовые машины» (контроль геометрии лопаток гидротурбин, 2003–2009), СШ ГЭС (контроль геометрии роторов нагруженных энергоагрегатов (2006–2008) и т.д.

На основе полученных фундаментальных результатов впервые созданы новые оптико-лазерные измерительные технологии для металлургии, информационно-измерительные системы и лазерные аппаратно-программные комплексы для учета и технологического информационного контроля горячего металлургического проката с характеристиками, не уступающими и существенно превосходящими зарубежные аналоги. Измерительные комплексы внедрены и

успешно эксплуатируются на крупнейших предприятиях черной металлургии России НТМК (с 1993 г.), ЗСМК (1992–2001 гг.), НМЗ (с 1986 г.), Первоуральский новотрубный завод (с 2011 г.).

Созданные оптико-лазерные измерительные технологии для металлургии обеспечили получение в реальном времени адекватной и ранее отсутствовавшей информации о скорости и геометрии проката с погрешностью менее 0,1 %, автоматизируя учет, улучшая стабильность и безопасность технологий. Благодаря адекватности и точности полученной информации обеспечена существенная экономия и увеличен выход продукции повышенного качества.

III. Лазерные радиационно-безопасные измерительные комплексы для контроля толщины горячего и холодного проката

Новейшая разработка 2012 г. в области оптико-лазерных измерительных технологий для металлургии – лазерные радиационно-безопасные измерительные комплексы для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-0Р-3. Предназначены в качестве замены на прокатном производстве морально и физически устаревших рентгеновских толщиномеров серий ИГТ-5688, ИГТ-5630 и т.д., обеспечивают полную радиационную безопасность. Измерение толщины производится на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции с многоуровневой спектральной и пространственной фильтрацией. Используются анаморфотные оптические схемы и пассивно-активные аэродинамические ловушки – седиментаторы взвесей и аэрозоля. Комплексы осуществляют в реальном времени прецизионную бесконтактную регистрацию толщины горячего проката и статистическую обработку результатов измерений с ведением архивов и обеспечивают работу в автономном режиме и в информационных сетях.

Лазерный измерительный комплекс ЛАД-0Р3 предназначен для бесконтактных, точных и безопасных для персонала измерений толщины движущегося горячего листового проката в режиме реального времени, осуществляемых в тяжелых условиях окружающей среды: значительных градиентов температур на корпусе измерителя, мощного инфракрасного излучения, высокой влажности воздуха (более 90 %), а также водяного и масляного аэрозоля в зоне измерений.

Измерительный комплекс реализован впервые и основан на использовании новейших российских алгоритмов и методов, а также самых современных полупроводниковых лазеров, фотодетекторов и электроники. Применены инновационные патентно-чистые научные и технические решения, оригинальные алгоритмы собственной разработки, обеспечившие погрешность измерения на уровне 10^{-5} в реальных условиях горячего металлургического цеха и 10^{-6} в условиях лаборатории.

Измерение толщины производится на основе синхронной дифференциальной лазерной облачной триангуляции с многоуровневой спектральной и пространственной фильтрацией. Используется анаморфотная оптическая схема и пассивные аэродинамические ловушки – седиментаторы взвесей и аэрозоля.

По итогам Федерального конкурса 2013 г. на лучшую отечественную разработку в области лазерной аппаратуры и лазерно-оптических технологий работа «Лазерный радиационно-безопасный измерительный комплекс для измерения геометрических параметров горячего и холодного проката ЛАД-ОР 3» удостоена звания «Лауреат конкурса ЛАС 2013 года» в номинации «Лазерное оборудование и технологии для технических измерений, диагностики и контроля процессов» (г. Москва, 2013 г.). Работа также признана победителем конкурса «Старт-2012» Фонда Бортника по Новосибирской области.

Заключение

Создана фундаментальная научно обоснованная база оптоэлектронных информационных систем для научных исследований, инновационных и импортозамещающих промышленных технологий. Результаты работы широко внедрены на крупнейших предприятиях металлургической, машиностроительной и других отраслей, используются для контроля турбин и повышения безопасности отечественной гидроэнергетики и транспорта, информационного мониторинга и учета горячего проката в металлургии, в научно-исследовательских организациях и в вузах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y., Commins H. Z. Localised fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer // *Appl. Phys. Lett.* – 1964. – Vol. 4. – P. 176–178.
2. Meledin V., Bakakin G., Naumov I. A Wide-Aperture Precision Photodetector // *Instruments and Experimental Techniques.* – 1999. – Vol. 42. – № 1. – P. 90–93.
3. Meledin V., Bakakin G., Naumov I., Pavlov V., Sotnikov V. Measurement of volumes of skew fields with topologically similar parallel cuts on optical images on the plane of registration // *Proc. of SPIE «Applications of Digital Image Processing».* – 2000. – Vol. 4115. – P. 669–679.
4. Meledin V., Naumov I., Sotnikov V. Machine Vision system for noncontact weighing // *Proc. ISA 2001. IMEKO Special Millennium Sessions.* – 2001. – ISA Emerging Technologies Conference. – Houston, Texas. – USA. CD ISA. – 2001. – Vol. 415.
5. Meledin V., Bakakin G., Naumov I., Pavlov V., Sotnikov V. Real Time Machine Vision System for Non-contact Measurements of the Masses of Free Falling Hot Glass Drops // *Current Research on Holography and Interferometric Methods for Measurement of Object Properties: 2000-2002.* – Selected Paper of SPIE. – Vol. 5134. – P. 139–149.
6. Meledin V. G., Naumov I. V., Pavlov V. A. An Experimental Investigation of the Flow Produced in a Rectangular Container by Rotating Disk using LDA // *Optical Methods for Data Processing in Heat and Fluid Flow* (Eds. C.Greated, J. Cosgrove and J.M.Buick). Chapter 3. – Suffolk, UK: Professional Engineering Publishing. – 2002. – P. 25–37.
7. Meledin V. G. Optoelectronic computer science in energy saving technologies of industrial corporations // *Energy saving technologies in scientific and technical development for industrial corporations.* – Dortmund: DU Press. – 2006. – P. 35–92.
8. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии // Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН. – 2008. – 75 с.
9. Meledin V. G. Informatics of Optoelectronic Measurements: Science and Innovative Industrial Technologies // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2009. – Vol. 18. – No. 2. – P. 99–128.

10. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии // Деловая слава России. Межотраслевой альманах для организаторов производства. – Выпуск 2010/2011. – 1/6(29). – С. 74–76.
11. Меледин В. Г. 3D-диагностика – просто, точно, доступно / Наука из первых рук. – 2010. – № 2. – С. 23–24.
12. Меледин В. Г. Оптоэлектронные информационные системы в инновационных промышленных технологиях // Деловая слава России. Межотраслевой альманах для организаторов производства. Выпуск 2011. – 4(32). – С. 42–44.
13. Меледин В. Г. Оптико-лазерные измерительные технологии для металлургии // Деловая слава России. Межотраслевой альманах для организаторов производства. Выпуск 2012. – № 4 (37). – С.24–27.
14. Meledin V. G. Optoelectronic Measurements in Science and Innovative Industrial Technologies // Optoelectronic Devices and Properties. ISBN 978-953-307-204-3. – Chapter 18. – Suffolk, UK: INTECH, 2011. – P. 373–399.

© В. Г. Меледин, 2014

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ксения Дмитриевна Волкова

ООО «Оптическое Расчетное Бюро», 630132, Россия, г. Новосибирск, ул. Красный проспект, 200, инженер-конструктор, тел. (923)240-77-94, e-mail: volkova_kd@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Рассматриваются недостатки и преимущества оптических систем с переменными характеристиками. Представлены результаты разработки оптической системы с переменной перископичностью: оптическая схема и результаты оценки качества изображения.

Ключевые слова: переменные характеристики, оптические системы, панкратический, дискретный, прицел, перископ, качество изображения.

OPTICAL SYSTEMS WITH VARIABLE CHARACTERISTICS

Ksenia D. Volkova

Optical Design Office Co Ltd, 630074, Russia, Novosibirsk, Red avenue street 200, design engineer, tel. (923)240-77-94, e-mail: volkova_kd@mail.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Professor at the nanosystems and optical devices department of SSGA, tel. (913)742-34-93, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Advantages and weaknesses of optical systems with variable characteristics are discussed. The results of design for optical system with variable periscopic characteristics, such as optical scheme and results of image quality assessment, are presented.

Key words: variable characteristics, optical systems, zoom-systems, discrete sight, periscope, image quality.

Работа выполнена с целью обоснования выбора направления исследований и разработок оптических систем с переменными характеристиками, направленных на повышение технических характеристик оптических и оптико-электронных приборов.

В последние годы происходит интенсивное развитие производства оптических приборов с переменными характеристиками. Обусловлено это тем, что возможностей одной оптической системы с постоянными характеристиками (традиционной) часто оказывается недостаточно для решения различных зрительных задач, а одновременная работа с несколькими приборами представляется пользователю нецелесообразной с точки зрения эксплуатации, суммарной

цены и транспортировки приборов: масса, габаритные размеры увеличиваются минимум в два раза. Поэтому приборы со сменными характеристиками сегодня широко применяются в различных областях науки и техники: военные приборы, наблюдательные приборы, фотография, кинематография, микроскопия, астрономические приборы, лазерная техника, тепловидение, телевидение, медицинская техника и т. д.

Перечень переменных характеристик, которые реализуются в оптических и оптико-электронных приборах, и современных разработок по созданию оптических систем с переменными характеристиками расширяется: это и традиционные характеристики – увеличение, поле зрения в наблюдательных приборах, прицелах, приборах ночного видения, тепловизионных приборах, микроскопах, офтальмологических приборах, лупах и т. п., фокусное расстояние объективов, окуляров, а также перископичность [1], удаление выходного зрачка [2], рабочий спектральный диапазон [3]. Наличие панкратического увеличения повышает эксплуатационные характеристики оптических и оптико-электронных приборов, обеспечивая возможность поиска объектов при малом увеличении и, соответственно, широком поле зрения и возможность распознавания – при большом увеличении и, соответственно, узком поле зрения. В случае необходимости быстрой смены увеличения, пользователи часто отдают предпочтение приборам с дискретной сменой увеличения. В настоящее время к разработке приборов с дискретной сменой характеристик сохраняется достаточно устойчивый интерес как в сфере приборов военного [4], так гражданского назначений¹.

Недостатком оптических приборов с переменными характеристиками является сложность расчета оптической схемы и трудоемкость изготовления механизмов смены увеличения, длины, поля, перископичности и т. д. В зависимости от вида и величины изменяемой характеристики, в совокупности с остальными оптическими характеристиками и дополнительными требованиями, подходы к композиции оптической схемы могут быть различными, но основная цель расчета состоит в достижении требуемого качества изображения, формируемого оптической системой, для всего диапазона переменной характеристики (панкратические системы) или для нескольких ее значений (оптические системы с дискретной сменой характеристик). При разработке оптических схем с переменными характеристиками принимаются во внимание дополнительные ограничения, например: при расчете наблюдательной телескопической системы с панкратической сменой увеличения одновременно необходимо обеспечить для каждого из увеличений стабильность положения выходного зрачка, обусловленную эксплуатационными требованиями.

Хотя, согласно источнику [5], «прицелов с переменным увеличением, принятых на вооружение, до 2001 г. в нашей армии не было», тогда как еще «к началу 90-х годов большинство снайперского оружия США и НАТО было оснащено прицелами с переменным увеличением 10, 12 и более крат и объективами

¹ zomz.ru

диаметром 40, 50 и 56 мм», сегодня ряд отечественных фирм разрабатывает и выпускает прицелы с панкратической сменой увеличения: ООО «Луггар»², ОАО «Швабе – Оборона и Защита»³ (до 2013 г. – ОАО «ПО НПЗ»), ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»⁴, ОАО «Вологодский оптико-механический завод»⁵, ЗАО «Дедал-НВ»⁶ и др.

Оптические системы серийно выпускаемых прицелов для стрелкового, охотничьего и спортивного оружия, в том числе с переменным увеличением, для смены увеличения в которых осуществляется смещение компонентов обрабатывающей системы только вдоль ее оптической оси [6], построены по принципу широко известного прицела ПСО-1 и его модификаций. Необходимо отметить, что в подобных схемах принципиально не осуществима возможность обеспечить диапазон выверки Δ больше по величине, чем величина поля зрения при максимальном увеличении $2\omega_{\Gamma_{\max}}$, что является ограничением для величины максимального увеличения.

В 2012 г. одним из авторов данной статьи была разработана оптическая схема прицела с панкратической сменой увеличения от 5 до 25 крат [7], диаметром входного зрачка 56 мм, угловым полем зрения от $4^{\circ}12'$ до $50,04'$, углом ввода поправок 0-20, удалением выходного зрачка 95 мм. Оптическая схема построена таким образом, что при вводе углов поправок (изменении направления визирной оси прибора) центр перекрестия сетки прибора не смещается с центра поля зрения, наблюдаемого через окуляр, а положение глаза наблюдателя сохраняется неизменным при смене увеличения. Это обеспечивается качанием в пределах небольшого угла панкратической системы совместно с сеткой вокруг центра качания, совпадающего с передним фокусом окуляра. Для исключения увода визирной линии при смене увеличения прицельная сетка расположена в фокальной плоскости объектива. Конструкция прибора разработана компанией ООО «Луггар» для ОАО «Швабе – Оборона и Защита».

Поскольку в приборах подобного типа большинство характеристик, включая массогабаритные, определяются характеристиками и параметрами оптической системы, то вполне обоснованно можно утверждать, что высокие характеристики прибора ПО 525 по сравнению с известными аналогами (рис. 1), обусловлены его оптикой.

Согласно рис. 1, восемь характеристик из двенадцати максимально реализованы в прицеле ПО 525, а его характеристика $\Delta/2\omega_{\Gamma_{\max}}$ превышает на 27 % аналогичную характеристику Schmidt&Bender 5-25xPMII/LP.

² luggar.org

³ www.npzoptics.ru

⁴ www.zenit-foto.ru

⁵ www.vomz.ru

⁶ nightvision.ru

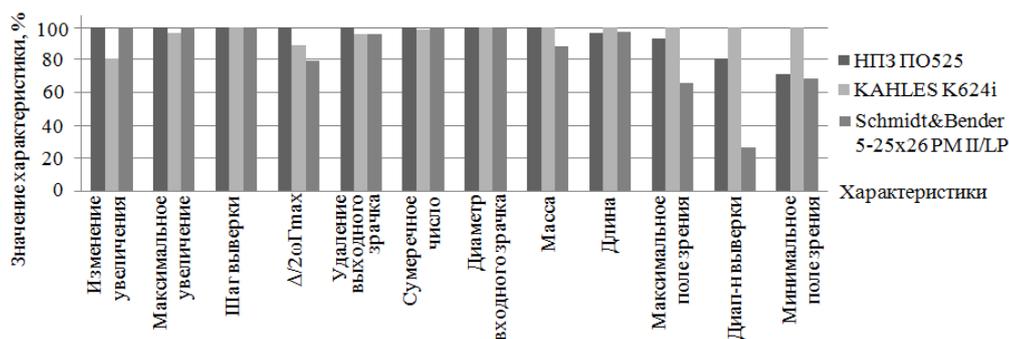


Рис. 1. Сравнение характеристик прицелов

Вышесказанное иллюстрирует скачок, сделанный за последние 13 лет в России в области отечественных разработок по оптическим системам со сменными характеристиками, направленный на ликвидацию имевшего место к концу 20 века отставания в этом направлении от зарубежных разработок. Но и сегодня нельзя утверждать, что весь арсенал оптических и оптико-электронных приборов с переменными характеристиками находится на уровне лучших мировых достижений. Например, актуальной задачей является разработка и производство компактных панкратических инфракрасных телеобъективов с вынесенными выходными зрачками с коэффициентами телесокращения менее 0,5 для тепловизионных приборов с охлаждаемыми матричными приемниками.

Вместе с тем, и более простые с точки зрения разработки оптической системы приборы – малогабаритные перископы – востребованы на рынке оптических приборов. Подобные приборы имеют за рубежом традиционное применение: их используют спецслужбы, армия, полиция, но появились и новые для перископов применения, например, использование на поле для гольфа для удобства наблюдения за игрой и т. п. Количество фирм, производящих малогабаритные ручные перископы, ограничено: три–четыре компании за границей. Российские предприятия их не производят, а последние отечественные модели подобных перископов относятся ко времени Великой Отечественной Войны, и, конечно, среди них нет ни одной модели со сменной характеристикой. Из зарубежных фирм, производящих малогабаритные перископы, только у двух имеются модели с переменными характеристиками: Micro-Times LLC⁷ и Mickelson Group Inc.⁸ Именно поэтому перед одним из авторов статьи была поставлена задача – разработать малогабаритный перископ со сменной перископичностью. Технические характеристики, согласно техническому заданию (ТЗ), а также их значения для двух крайних величин перископичности H разработанного перископа представлены в табл. 1.

Данные таблицы свидетельствуют, что характеристики оптической системы удовлетворяют заданным в ТЗ значениям.

⁷ www.micro-times.com

⁸ www.mickelsongroup.com

Таблица 1

Технические характеристики разработанной оптической системы перископа

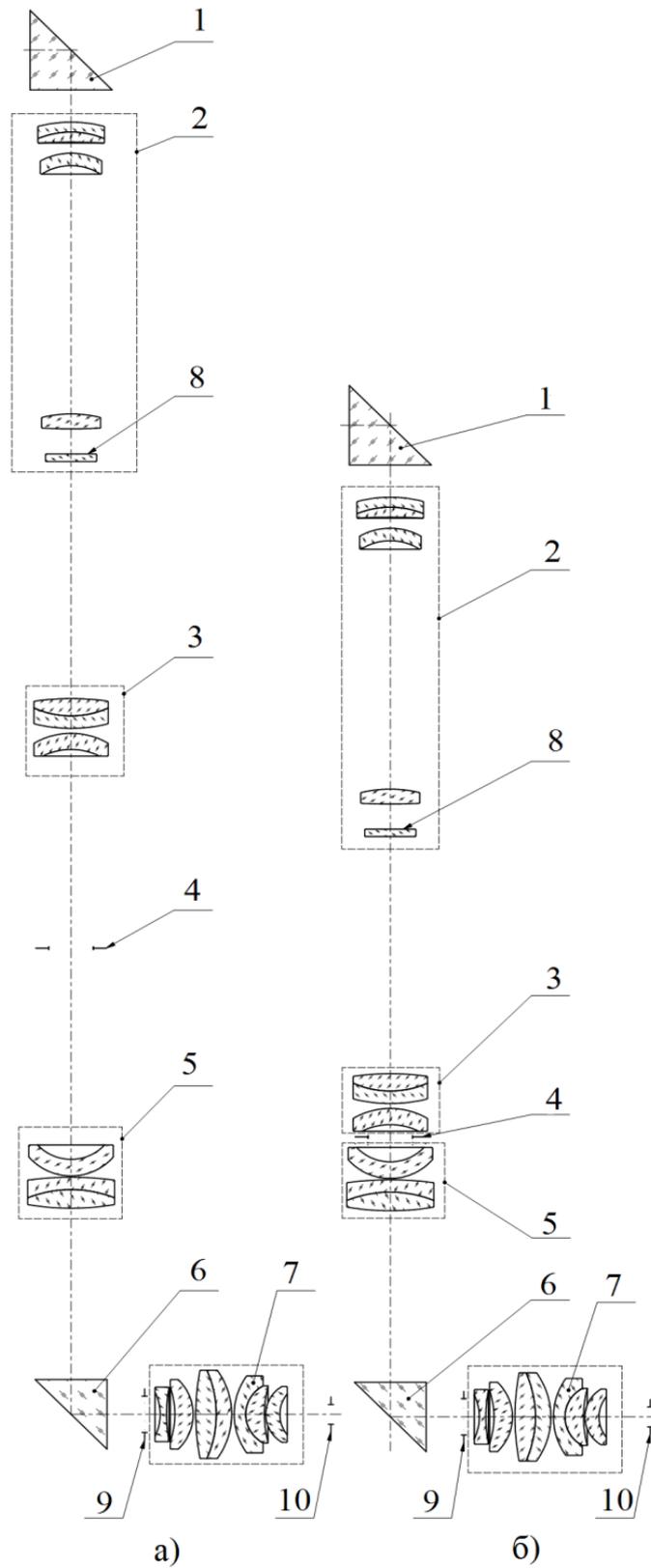
Технические характеристики	ТЗ	Система с $H = 550$ мм	Система с $H = 400$ мм
Увеличение, крат	$6 \pm 0,3$	5,9	5,9
Угловое поле зрения, градус	$8 \pm 0,4$	8,0	8,0
Диаметр выходного зрачка, мм	$4 \pm 0,2$	3,9	3,9
Удаление выходного зрачка, мм	$18 \pm 1,8$	16,4	20,2
H_1 , мм	400_{-40}	-	400
H_2 , мм	550_{-55}	550	-
Рабочий спектральный диапазон	видимый	видимый	видимый

На рис. 2 представлена разработанная оптическая схема перископа в положении ее компонентов, соответствующих наибольшей и наименьшей величине перископичности. Призмы AP-90° 1 и 6 изменяют направление оптической оси, размер по вертикали между центром входного окна и оптической осью окуляра определяет перископичность. Объектив 2 формирует на передней поверхности плоскопараллельной пластинки 8, с нанесенной на ней шкалой, промежуточное изображение удаленных объектов. Первый компонент 3 оборачивающей системы образует совместно с объективом 2 афокальную систему. Вторым компонентом 5 оборачивающей системы формирует второе действительное изображение в плоскости полевой диафрагмы 9, с которой совмещена передняя фокальная плоскость окуляра 7. Для смены перископичности предусмотрено изменение расстояния между компонентами оборачивающей системы 3 и 5 с одновременным изменением положения апертурной диафрагмы 4.

Зависимость аберраций для точек вне оси – кривизны изображения, астигматизма, хроматизма увеличения, дисторсии и комы – от положения апертурной диафрагмы в оптической системе накладывает дополнительные ограничения и требует включения дополнительных коррекционных параметров при балансировке аберраций в изображении.

Синтез отдельных оптических элементов и оптической системы в целом проводился с использованием мультиконфигурационной оптимизации. Для разработки данной оптической системы оказалось достаточно ограничиться при оптимизации двумя конфигурациями, соответствующими крайним значениям перископичности, и осуществить после нее анализ изображения для промежуточных значений перископичности. Результаты расчета среднеквадратических значений пятен рассеяния в изображении точек, расположенных в различных точках поля зрения, представлены на рис. 3, их величины: 1,4' на оси; 2,5' и 2,8' – на зоне и на краю поля зрения. Качество изображения, формируемого оптической системой перископа, отвечает критериям «хорошо» и «отлично»,

рекомендуемым, согласно источникам [10 –13], для полевых наблюдательных приборов.



1, 6 – призма AP-90°; 2 – объектив; 3 – первый компонент оборачивающей системы;
 4 – апертурная диафрагма; 5 – второй компонент оборачивающей системы; 7 – окуляр;
 8 – плоскопараллельная пластинка; 9 – полевая диафрагма; 10 – выходной зрачок

Рис. 2. Оптическая схема малогабаритного перископа:

а) $H = 550$ мм; б) $H = 400$ мм

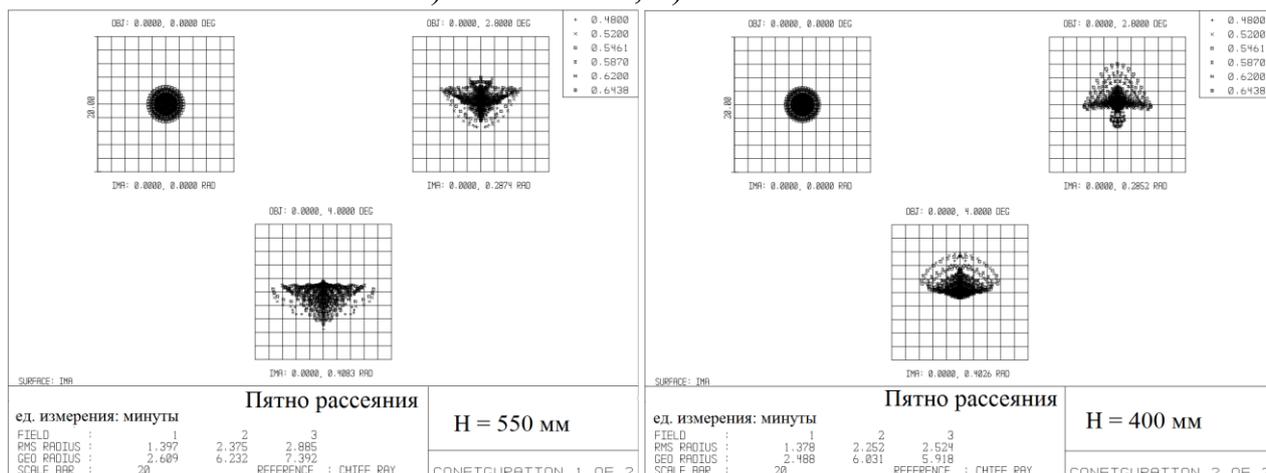


Рис. 3. Формы и размеры пятен рассеяния для крайних значений перископичности

Представленная на рис. 4 матричная диаграмма пятен рассеяния в изображении точек, расположенных в различных точках поля зрения, для 22 конфигураций, соответствующих различным значениям перископичности, свидетельствуют о стабильности качества изображения (изменение размеров пятен рассеяния не превышает 10 %) при изменении перископичности.

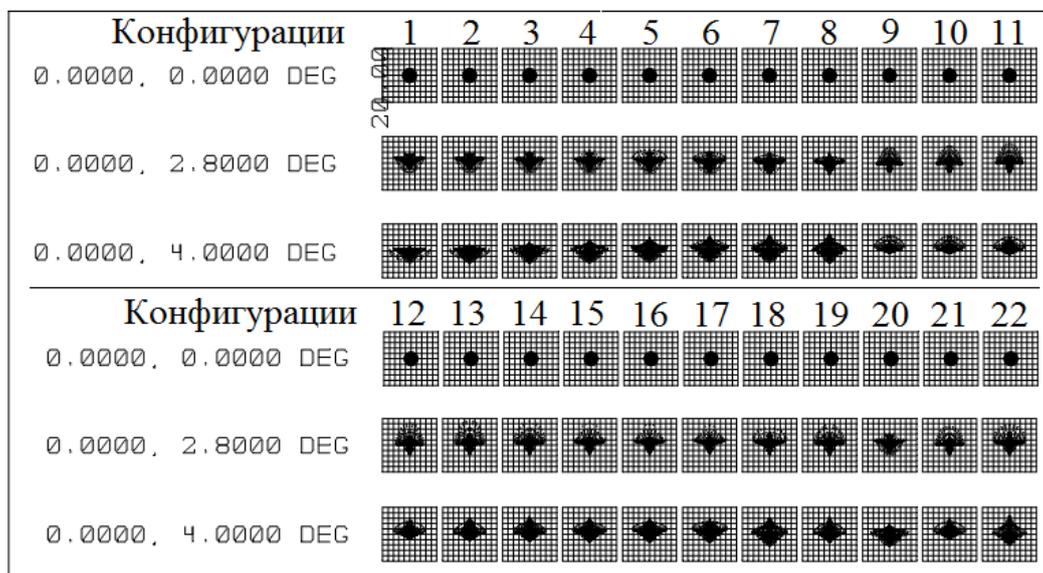


Рис. 4. Диаграмма форм пятен рассеяния для 22 конфигураций, соответствующих различным значениям перископичности

Заключение

Учитывая тенденции в области проектирования современных оптических и оптико-электронных приборов со сменными характеристиками, представляется необходимым совершенствование методики расчета их оптических систем, вплоть до разработки пошагового алгоритма композиции оптики конкретных типов приборов, с целью создания оригинальных оптических схем с форсированными характеристиками: повышением перепада увеличений, уменьшением массогабаритных характеристик, повышением качества изображения, повышением коэффициента пропускания и т. п. В статье приведены два примера разработок. Дальнейшая работа будет направлена на исследование и разработку оптических систем оптических и оптико-электронных приборов с панкратической и дискретной сменой характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова К. Д. Разработка оптической системы перископа сменной перископичности / К. Д. Волкова // LXI студенческая научная конференция СГГА, 8–13 апреля 2013 г.: сборник тезисов докладов: – Новосибирск: СГГА, 2013. – С. 14 – 15.
2. Дружкин Е. В., Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Малогабаритные тепловизионные приборы // Оптический журнал – 2013. – Т. 80. № 6. – С. 20–27.
3. Хацевич Т. Н. Парфенова Т. В. Двухдиапазонные объективы для инфракрасной области спектра // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 69–72.
4. Проспект Raytheon ELCAN Optical Technologies Specter DR Dual Role 1,5 – 6x Combat Sight. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcan.com>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Бельский А. Б. Снайперские панкратические прицелы нового поколения // Вопросы оборонной техники. – 2009. – № 9 – 10, серия 16.
6. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век: Т. XI: Оптико-электронная и лазерная техника / Издательский дом «Оружие и технологии», 2005. – С. 250–269, 270–277.
7. 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 [Текст] / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. А.; патентообладатели Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – № 2012124196/28; заявл. 09.06.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.
8. Хацевич Т. Н. Прикладная оптика: лабораторный практикум. – Новосибирск: СГГА, 2006. - 108 с.
9. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. – М.: Логос, 2000. – 584 с.
10. Верхотуров О. П. Введение в вычислительную оптику: учебное пособие. – Новосибирск, 1998. – 273 с.
11. Кирюшин, С. И. Габаритный и абберационный расчет призматического монокуляра: учеб. пособие для курсового проектирования по курсу «Теория оптических систем»; под ред. Н. П. Заказнова. – М.: МВТУ, 1983. – 36 с.

© К. Д. Волкова, Т. Н. Хацевич, 2014

УДК 681.7.013.624

ФОРМУЛЫ ПАРАКСИАЛЬНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Определены формулы параксиальной оптики для построения двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения с преломляющими и отражающими поверхностями.

Ключевые слова: двухкомпонентная оптическая система, жидкая линза, переменное фокусное расстояние, увеличение.

FORMULAS OF PARAXIAL OPTICS FOR TWO-FLUID SYSTEMS WITH VARIABLE MAGNIFICATION

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383) 344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Diana G. Makarova

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Post-graduate student of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

The formulas of paraxial optics to construct three-fluid systems with variable magnification of refracting and reflecting surfaces are defined.

Key words: two-component optical system, liquid lens, variable focal length, magnification.

Системы изменения увеличения являются важной составной частью вариообъективов и трансфокаторов. Существующие методы разработки оптических систем с переменными характеристиками исходят из предположения, что оптические компоненты, образующие систему, имеют постоянные оптические силы во всем диапазоне изменения увеличения [1]. Переменное увеличение обеспечивается за счет осевого перемещения оптических компонентов. В системах с механическим способом компенсации смещения плоскости изображения перемещаются два компонента, причем один из компонентов перемещается по линейному закону (с помощью винтового механизма), а второй – по нелинейному закону (с помощью кулачкового механизма). В системах с оптическим способом компенсации смещения плоскости изображения перемещаются не менее трех компонентов, и все они перемещаются по линейному закону (с помощью высокоточных электромеханических приводов).

На рисунке в тонких компонентах представлены традиционные схемы построения вариообъективов: входной положительный компонент проецирует изображение удаленного объекта в плоскость предметов (ПП) системы изменения увеличения, первый и второй компоненты которой (с оптическими силами Φ_1 и Φ_2) изменяют масштаб изображения в плоскости изображений (ПИ). Плоскости предметов и изображений могут быть разнесены на некоторое расстояние l или совпадать [1]. Линейное увеличение системы V при заданных (фиксированных) фокусных расстояниях компонентов f'_1 , f'_2 и отрезка $l = -a_1 + d + a'_2$ здесь является функцией трех переменных – отрезков a_1 , a'_2 и расстояния между компонентами d : $V = F(a_1, a'_2, d)$.

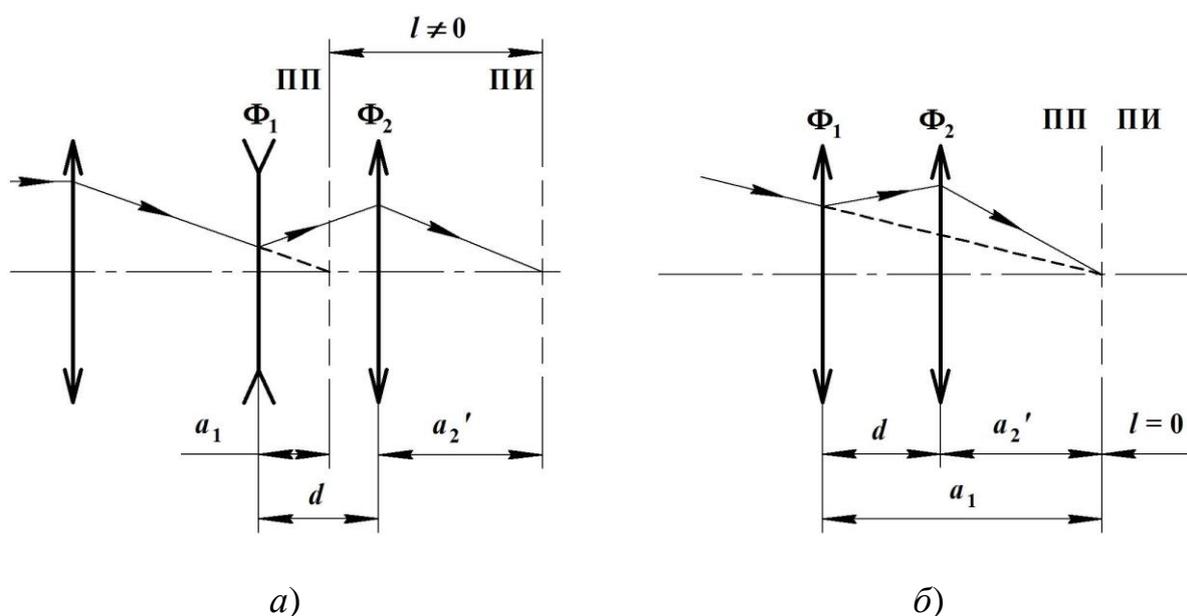


Рис. Принципиальные схемы вариообъективов в тонких компонентах: а) в общем случае ($l \neq 0$); б) с совмещенными плоскостями предметов

и изображений ($l = 0$)

В последнее время повысился интерес к жидким (жидкостным) компонентам (как линзам [2 – 4], так и зеркалам [5, 6]), которые, в отличие от обычных твердотельных линз и зеркал, позволяют при определенных условиях в значительных пределах изменять свое фокусное расстояние. В оптических системах с такими элементами законы изменения увеличения путем перемещения компонентов утрачивают свою силу, и в них начинают действовать другие закономерности, связанные с вариациями f'_1 и f'_2 при постоянных a_1 , a'_2 , d и l .

Для установления требуемых зависимостей были использованы общие соотношения из работы [7] для расчета взаимного расположения элементов классических двухкомпонентных систем переменного увеличения с подвижными вдоль оптической оси преломляющими и отражающими компонентами. В результате их преобразований получено:

$$f'_1 = \frac{n_2 V a_1 d}{n_2 V a_1 - n_2 a'_2 - n_1 V d} \quad \text{и} \quad f'_2 = \frac{n_3 a'_2 d}{n_2 a'_2 - n_2 V a_1 + n_3 d}, \quad (1)$$

где n_1 , n_2 и n_3 – показатели преломления сред до первого компонента, между компонентами и после второго компонента соответственно. При этом контроль постоянства величины l удобно вести непосредственно через переменные фокусные расстояния компонентов по формуле

$$l = a_1^2 \frac{f'_1}{1 + f'_1} + 2a'_2 \frac{f'_2}{1 - a'_2 f'_2}.$$

Если обозначить $f'_1/f'_2 = p$, то, очевидно,

$$\frac{n_2 V a_1 - n_2 a'_2 - n_3 d}{(n_1 d - n_2 a_1) V + n_2 a'_2} V = \frac{n_3 a'_2}{n_2 a_1} p. \quad (2)$$

При заданных n_1 , n_2 , n_3 и a_1 , a'_2 , d формула (2) выражает закон изменения увеличения V в зависимости от соотношения p между фокусными расстояниями компонентов.

Для наиболее типичной ситуации, когда все компоненты разделены воздушными промежутками, в параксиальной области имеем:

$$\frac{a_1 V - a'_2 - d}{(d - a_1) V + a'_2} V = \frac{a'_2}{a_1} p$$

– для линзовых систем ($n_1 = n_2 = n_3 = 1$);

$$\frac{a'_2 - a_1 V - d}{(d - a_1)V + a'_2} V = \frac{a'_2}{a_1} p$$

– для линзово-зеркальных систем ($n_1 = n_2 = -n_3 = 1$);

$$\frac{a_1 V - a'_2 - d}{a'_2 - (d + a_1)V} V = \frac{a'_2}{a_1} p$$

– для зеркально-линзовых систем ($-n_1 = n_2 = n_3 = 1$);

$$\frac{a'_2 - a_1 V - d}{(d + a_1)V - a'_2} V = \frac{a'_2}{a_1} p$$

– для зеркальных систем ($n_1 = -n_2 = n_3 = 1$).

Соответствующие частные формулы для фокусных расстояний f'_1 и f'_2 компонентов в зависимости от текущего значения увеличения V согласно (1) приведены в таблице.

Таблица

Фокусные расстояния компонентов
двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения

f'	Варианты систем			
	линзовая	линзово-зеркальная	зеркально-линзовая	зеркальная
f'_1	$\frac{a_1 V d}{a_1 V - a'_2 - V d}$		$\frac{a_1 V d}{a_1 V - a'_2 + V d}$	
f'_2	$\frac{a'_2 d}{a'_2 - a_1 V + d}$	$\frac{a'_2 d}{a_1 V - a'_2 + d}$	$\frac{a'_2 d}{a'_2 - a_1 V + d}$	$\frac{a'_2 d}{a_1 V - a'_2 + d}$

Найденные взаимосвязи позволяют выбрать значения a_1 , a'_2 , d и l , определив оптимальную комбинацию фокусных расстояний f'_1 и f'_2 при заданных значениях V .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. – 640 с.
2. Pat. 8238033 US. Liquid Lens Device and Manufacturing Method Therefor / Y. Takai, T. Yoshida, M. Shimase, H. Ishiguro. Publication Date: 08.07.2012.
3. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, В. С. Ефремов, И. О. Михайлов, Н. В. Оревкова, Б. В. Федоров, В. Б. Шлишевский // 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. 1. – С. 7–11.

4. Ефремов В. С., Михайлов И. О., Шлишевский В. Б. Жидколинзовый конденсор // 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. 1. – С. 12–15.

5. Пат. 2073268 РФ. Способ управления кривизной адаптивного зеркала и адаптивное зеркало для его осуществления / В. А. Алексеев, З. И. Ашурлы, С. В. Науменко, С. С. Науменко, С. А. Филин. Опубл. 10.02.1997.

6. Pat. 7525722 US. Liquid Mirror / P. R. Colodner, T. N. Krupenkin, O. Sydorenko, J. Taylor. Publication Date: 04.28. 2009.

7. Ефремов В. С. Расчет в параксиальной области двухкомпонентных панкратических систем, содержащих зеркальные компоненты // Оптико-механическая промышленность. 1978. – № 8. – С. 24–26.

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский, 2014

УДК 681.7.015.2

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДВУХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ДИАПАЗОНОВ

Татьяна Валентиновна Парфёнова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, соискатель кафедры наносистем и оптотехники СГГА, тел. +7952-901-24-38, e-mail: tanyap972@list.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники СГГА, тел. (383)343-12-55, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Рассмотрены примеры проектирования ИК объективов для двух тепловизионных диапазонов. Представлены технические характеристики данных объективов, подтверждающие получение изображений высокого качества, при одновременной работе как в диапазоне 3-5 мкм, так и в диапазоне 8-12 мкм при неизменном положении плоскости изображений.

Ключевые слова: двухдиапазонный ИК объектив, двухдиапазонный приемник ИК излучения, тепловизионный прибор.

OPTICAL SYSTEM FOR TWO THERMOVISION BANDS

Tatyana V. Parfyonova

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., post-graduate student, department of nanosystems and optical engineering SSGA, tel. +7952-901-24-38, e-mail: tanyap972@list.ru

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Prof., department of nanosystems and optical engineering SSGA, tel. (383)343-12-55, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Examples of IR lenses designed for two thermovision bands are considered. Technical specifications of lenses, confirming receipt of high quality images, with simultaneous operation as in the range of 3-5 μm , and in the range of 8-12 μm at a fixed position the image plane are presented.

Key words: dual-band IR lens, dual-band IR receiver, thermal imaging device.

Достижения последних десятилетий по созданию охлаждаемых и неохлаждаемых (болومترических) двухдиапазонных приёмников инфракрасного (ИК) излучения [1, 2, 3] явились стимулом к поискам новых схемных решений в области расчета оптических систем, позволяющих достичь коррекцию хроматических aberrаций в расширенном диапазоне длин волн – от 3 до 12 мкм – с

одновременным условием обеспечения в плоскости чувствительной площадки приемника излучения дифракционного качества изображения как в диапазоне 3-5 мкм, так и в диапазоне 3-12 мкм [4, 5, 6]. Такие, двухдиапазонные, ИК объективы в совокупности с появлением серийно выпускаемых двухдиапазонных приемников излучения создадут элементную базу для проектирования и выпуска нового поколения тепловизионных приборов.

Тепловизионный прибор – это сложная взаимосвязанная конструкция [7], обеспечивающая взаимодействие таких блоков и элементов как:

- оптическая система формирования изображения;
- матричный приемник излучения;
- модули предварительной (преобразование принятого излучения) и финальной обработки изображения;
- модуль управления, обеспечивающий в совместной работе с модулями обработки изображения возможность выбора и изменения характеристик системы обработки изображения;
- микродисплей с окуляром или интерфейсный разъем с регистрирующим устройством для вывода информации;
- модуль питания.

Обеспечение в тепловизоре работоспособности оптической системы и приемника излучения одновременно в двух ИК диапазонах позволяет повысить качество выходного изображения объектов, используя известные преимущества каждого из диапазонов и совместной обработки изображений. При этом в отличие от двухканальных приборов, использующих два приемника излучения для каждого из каналов и оптические системы - отдельные для каждого из каналов или частично совмещенные, в тепловизорах нового поколения открываются перспективы снижения массогабаритных характеристик.

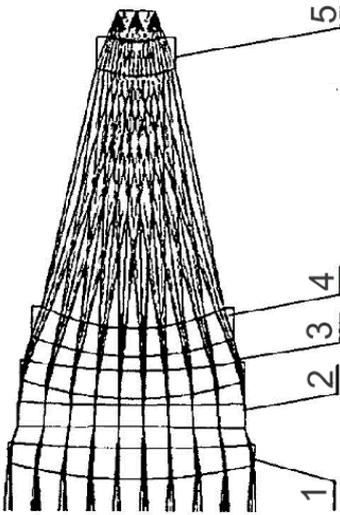
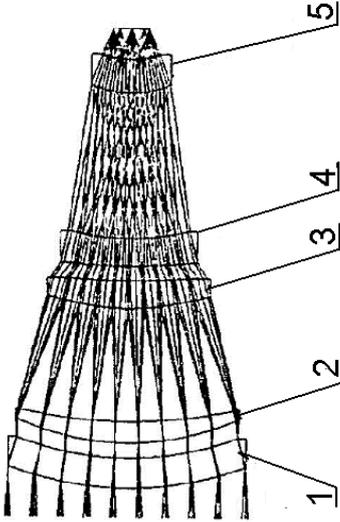
На качество работы ИК объективов одновременно в двух диапазонах влияют многие внешние факторы. Так, например, при работе оптической системы в диапазоне 8-12 мкм исключена проблема существования отраженного солнечного излучения, которое присутствует при наблюдении в видимом, ближнем и средневолновом, 3-5 мкм, диапазонах спектра. Однако, работа оптической системы при условиях повышенной влажности или больших дальностей до объекта может оказаться предпочтительнее в диапазоне 3-5 мкм [2, 3]. Тепловизионный длинноволновый диапазон (8-12 мкм) имеет преимущества при обнаружении объектов, а средневолновый (3-5 мкм) тепловизионный диапазон – при их идентификации. Возможность быстрого переключения из одного диапазона в другой или совместная обработка двух изображений расширяет функциональные возможности тепловизионного прибора.

На основании проведенных исследований средних и частных дисперсий оптических материалов, пропускающих излучение в спектральном диапазоне от 3 до 12 мкм, в работах [8, 9] определены параметры оптических систем, удовлетворяющие условию хроматической коррекции для трех длин волн указанного спектрального диапазона. Эти системы использованы в качестве исходных для

проектирования трех объективов, для которых в табл. 1 представлены оптические схемы, оптические силы входящих в них линз и результаты оценки качества изображения. Расчеты по оптимизации исходных систем выполнены в программе «Zemax 13 Release 2 SP1 Professional» (версия октябрь 2013 г.).

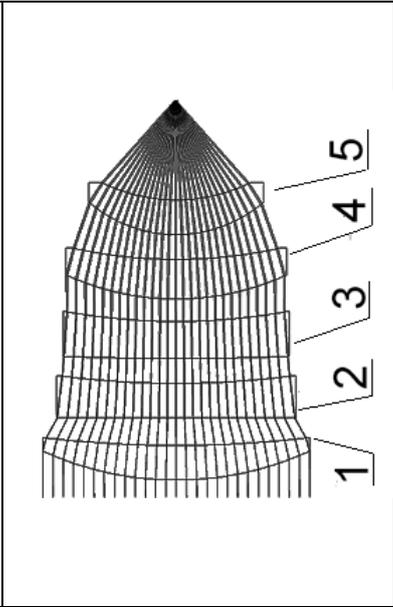
Таблица 1

Оптические системы для двух тепловизионных диапазонов

<p>Двухдиапазонный инфракрасный объектив (ОБ/100/0,78/3)</p> <p>Патент RU 2503047, 27.12.2013 [11]</p>	<p>Двухдиапазонный инфракрасный объектив (ОБ/100/0,78/2)</p>																																																																																				
																																																																																					
<p>Параметры двухдиапазонных ИК объективов</p>																																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Линза</th> <th>Материал</th> <th>Ф. ств.</th> <th>F3-5</th> <th>F8-12</th> <th>P 3-5</th> <th>P 8-12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>АМТГК1</td> <td>0,69</td> <td>198,33</td> <td>116,94</td> <td>0,39</td> <td>0,52</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>ГЕРМАНИУМ</td> <td>0,51</td> <td>107,29</td> <td>795,97</td> <td>0,31</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>АМТГК1</td> <td>0,66</td> <td>198,33</td> <td>116,94</td> <td>0,39</td> <td>0,52</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>РБЕ2</td> <td>0,23</td> <td>46,39</td> <td>8,64</td> <td>0,55</td> <td>0,33</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>АМТГК1</td> <td>0,90</td> <td>198,33</td> <td>116,94</td> <td>0,39</td> <td>0,52</td> </tr> </tbody> </table>	Линза	Материал	Ф. ств.	F3-5	F8-12	P 3-5	P 8-12	1	АМТГК1	0,69	198,33	116,94	0,39	0,52	2	ГЕРМАНИУМ	0,51	107,29	795,97	0,31	0,37	3	АМТГК1	0,66	198,33	116,94	0,39	0,52	4	РБЕ2	0,23	46,39	8,64	0,55	0,33	5	АМТГК1	0,90	198,33	116,94	0,39	0,52	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Линза</th> <th>Материал</th> <th>Ф. ств.</th> <th>F3-5</th> <th>F8-12</th> <th>P 3-5</th> <th>P 8-12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>ГЕРМАНИУМ</td> <td>0,114</td> <td>107,29</td> <td>795,97</td> <td>0,31</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>КРС5</td> <td>0,776</td> <td>320,28</td> <td>2667,9</td> <td>0,32</td> <td>0,35</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>КРС5</td> <td>1,181</td> <td>320,28</td> <td>2667,9</td> <td>0,32</td> <td>0,35</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>ГЕРМАНИУМ</td> <td>2,062</td> <td>107,29</td> <td>795,97</td> <td>0,31</td> <td>0,37</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>ГЕРМАНИУМ</td> <td>1,600</td> <td>107,29</td> <td>795,97</td> <td>0,31</td> <td>0,37</td> </tr> </tbody> </table>	Линза	Материал	Ф. ств.	F3-5	F8-12	P 3-5	P 8-12	1	ГЕРМАНИУМ	0,114	107,29	795,97	0,31	0,37	2	КРС5	0,776	320,28	2667,9	0,32	0,35	3	КРС5	1,181	320,28	2667,9	0,32	0,35	4	ГЕРМАНИУМ	2,062	107,29	795,97	0,31	0,37	5	ГЕРМАНИУМ	1,600	107,29	795,97	0,31	0,37
Линза	Материал	Ф. ств.	F3-5	F8-12	P 3-5	P 8-12																																																																															
1	АМТГК1	0,69	198,33	116,94	0,39	0,52																																																																															
2	ГЕРМАНИУМ	0,51	107,29	795,97	0,31	0,37																																																																															
3	АМТГК1	0,66	198,33	116,94	0,39	0,52																																																																															
4	РБЕ2	0,23	46,39	8,64	0,55	0,33																																																																															
5	АМТГК1	0,90	198,33	116,94	0,39	0,52																																																																															
Линза	Материал	Ф. ств.	F3-5	F8-12	P 3-5	P 8-12																																																																															
1	ГЕРМАНИУМ	0,114	107,29	795,97	0,31	0,37																																																																															
2	КРС5	0,776	320,28	2667,9	0,32	0,35																																																																															
3	КРС5	1,181	320,28	2667,9	0,32	0,35																																																																															
4	ГЕРМАНИУМ	2,062	107,29	795,97	0,31	0,37																																																																															
5	ГЕРМАНИУМ	1,600	107,29	795,97	0,31	0,37																																																																															
<p>$f'=100$ мм; $L=150$ мм; D: $f'=1:0,78$; $s'=10$ мм</p>	<p>$f'=100$ мм; $L=150$ мм; D: $f'=1:0,78$; $s'=10$ мм; две асферические поверхности (компонент 3)</p>																																																																																				

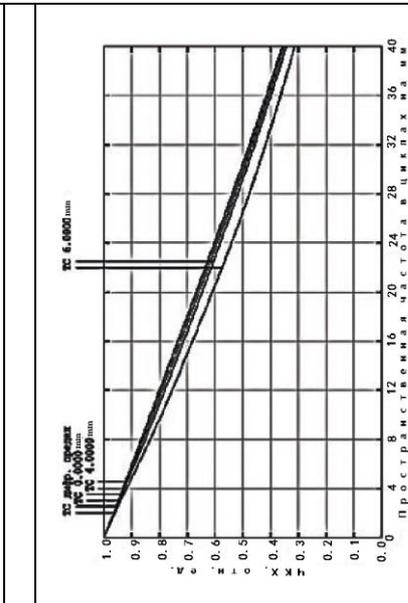
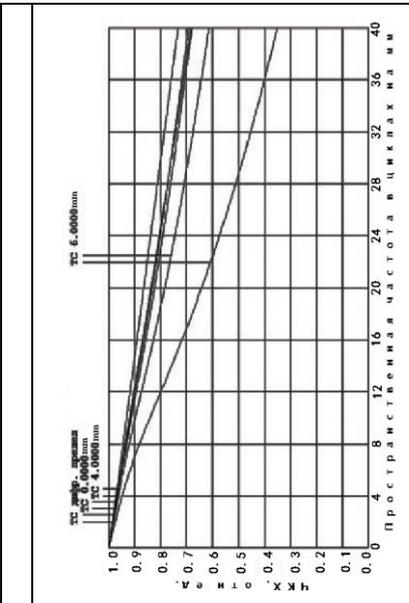
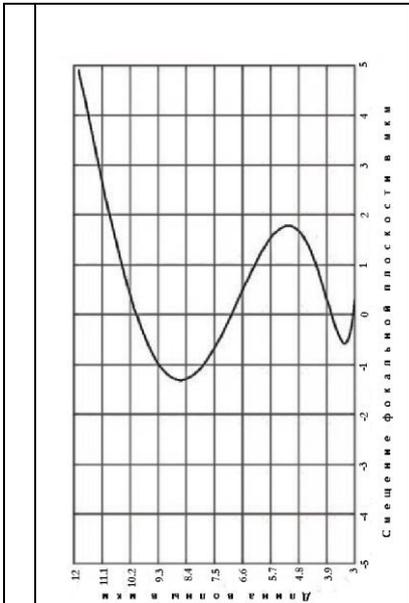
Двухдиапазонный инфракрасный светосильный объектив (ОБ/40/0,75/3)

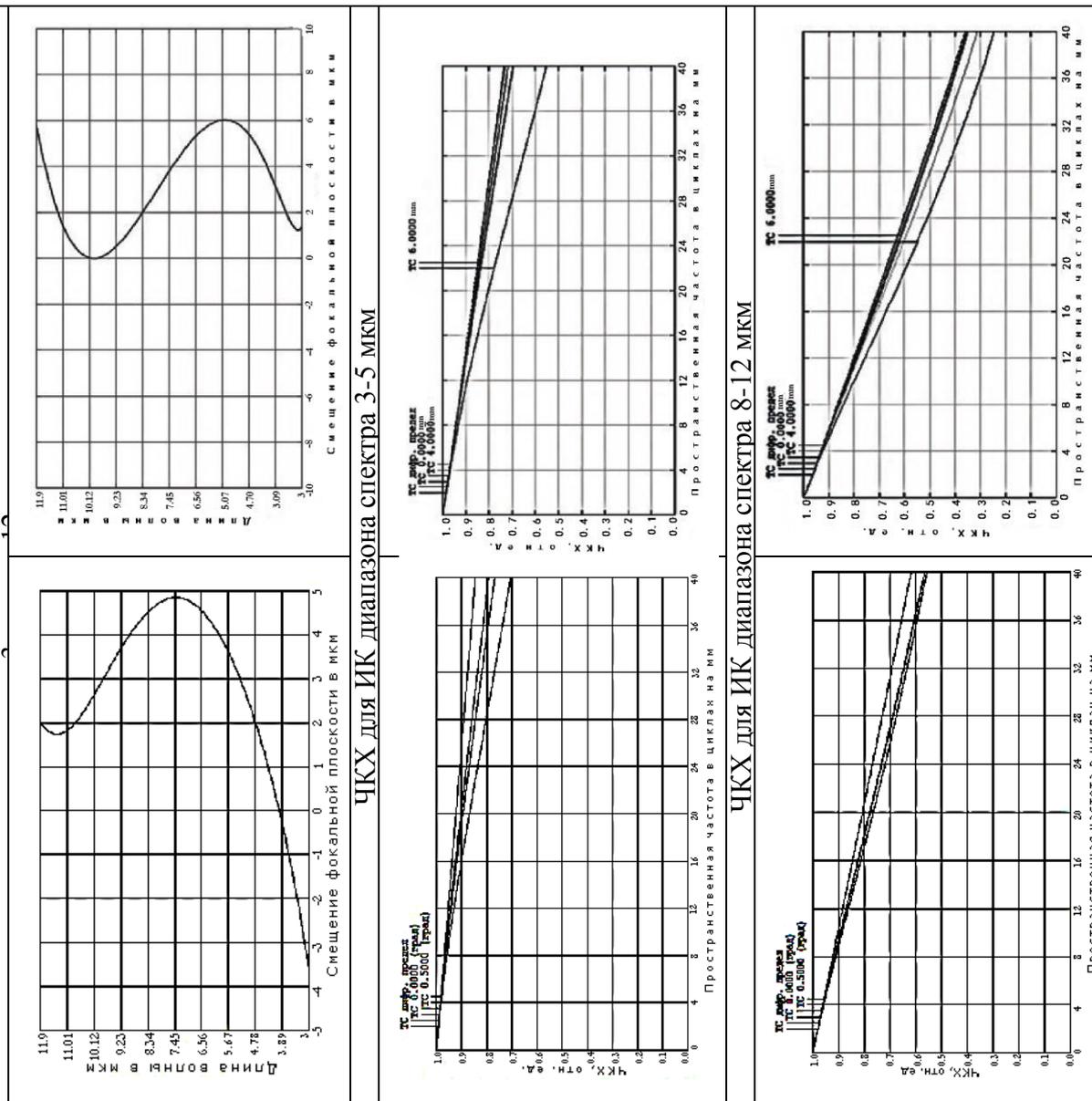
Патент RU 2475787, 20.02.2013 [10]



Линза	Материал	Ф. ств.	F3-5	F8-12	P 3-5	P 8-12
1	AMTR1	0,70	198,33	116,94	0,39	0,52
2	GERMANIUM	-0,68	107,29	795,97	0,31	0,37
3	PBF2	-0,17	46,39	8,64	0,55	0,53
4	AMTR1	0,58	198,33	116,94	0,39	0,52
5	AMTR1	0,74	198,33	116,94	0,39	0,52

$f' = 40\text{mm}$; $L = 76,5\text{ mm}$; $D: f' = 1:0,75$;
 $s' = 20\text{ mm}$





В обозначении объективов указаны значения следующих характеристик: «фокусное расстояние/диафрагменное число/количество материалов».

Характер кривых продольной хроматической aberrации свидетельствует о том, что в разработанных ИК объективах в указанном спектральном диапазоне обеспечивается апохроматическая коррекция. Так, величина остаточного продольного хроматизма изображения в объективе ОБ/40/0,75/3 составляет 0,006 мм, т.е. 1/6660 от фокусного расстояния; в объективе ОБ/100/0,78/3 – 0,0072 мм, т.е. 1/13000 от фокусного расстояния, в объективе ОБ/100/0,78/2 – 0,0031 мм, т.е. 1/32000 от фокусного расстояния.

Приведенные графики ЧКХ свидетельствуют, что рассматриваемые двух-спектральные ИК объективы обеспечивают качество изображения, близкое к дифракционному пределу в каждом из указанных диапазонов, без смещения плоскости изображения.

В объективе ОБ/40/0,75/3 в диапазоне 3-5 мкм для пространственной частоты 30 лин/мм коэффициент передачи контраста для точки на краю не менее 0,8; для точки на оси превышает 0,85. В пятне диаметром 0,015 мкм система обеспечивает величину функции концентрации энергии для всех точек поля более 80%. В диапазоне 8-12 мкм для пространственной частоты 20 лин/мм коэффициент передачи контраста для точки на оси превышает 0,8; для точки на краю имеет величину не менее 0,75. В пятне диаметром 0,025 мкм система обеспечивает величину функции концентрации энергии для всех точек поля не менее 85%.

В объективе ОБ/100/0,78/3 в диапазоне 3-5 мкм для пространственной частоты 30 лин/мм коэффициент передачи контраста для точки на оси составляет 0,8; для точки на краю превышает 0,65. В пятне диаметром 0,015 мкм система обеспечивает величину функции концентрации энергии для точки на краю не менее 0,8; для точки на оси не менее 0,85. В диапазоне 8-12 мкм для пространственной частоты 20 лин/мм коэффициент передачи контраста для всех точек поля более 0,6. В пятне диаметром 0,0025 мкм величина функции концентрации энергии для всех точек поля лежит в диапазоне от 75% до 80%.

В объективе ОБ/100/0,78/2 в диапазоне 3-5 мкм для пространственной частоты 30 лин/мм коэффициент передачи контраста для точки на краю не менее 0,55; для точки на оси – превышает 0,8. В пятне диаметром 0,015 мкм система обеспечивает величину функции концентрации энергии для точки на оси не более 80%; для точки на краю – более 60%. В диапазоне 8-12 мкм для пространственной частоты 20 лин/мм коэффициент передачи контраста для всех точек поля превышает 0,6. В пятне диаметром 0,025 мкм система обеспечивает величину функции концентрации энергии в диапазоне от 75% до 78%.

Заключение

Результаты выполненных расчетов подтверждают возможность сопряжения объективов с болометрическими двухдиапазонными приемниками ИК излучения, обеспечивающими работу в двух диапазонах ИК спектра 3-5 мкм и 8-12 мкм, без смещения плоскости изображений при переходе от одного спектрального диапазона к другому, и формирование качественного изображения в каждом из диапазонов. Разработанные двухдиапазонные инфракрасные объективы могут представлять интерес для разработчиков современных тепловизионных приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Латышев А.В., Асеев А.Л. Современные разработки ИФП СО РАН в области электроники // Материалы XI отраслевой научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития отечественной микроэлектроники». – Томск: Аграф-пресс, 2012. – С. 71–84.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.

3. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Университетская книга; Логос, 2004. – 444 с.
4. Патент RU 2410733 С1 Российская Федерация, МПК G02В 13/14 (2006.01), G02В 9/64 (2006.01). Двухспектральный инфракрасный объектив с вынесенной в пространство изображений апертурной диафрагмой [Текст] / Хацевич Т.Н., Терешин Е.А.; заявители и патентообладатели Хацевич Т.Н., Терешин Е.А. - 2010101899/28; заявл. 21.01.2010; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 16 с.: ил.
5. Хацевич Т. Н. Оптика для тепловизионных приборов // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 36–39.
6. Терешин Е. А., Хацевич Т. Н. Оптические системы тепловизоров // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5, ч. 1. – С. 41–42.
7. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Малогобаритные тепловизионные приборы // Оптический журнал, 2013. – Т. 80, № 6. – С. 20–27.
8. Хацевич Т. Н., Парфёнова Т. В. Двухдиапазонные объективы для инфракрасной области спектра // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 69–72.
9. Парфёнова Т. В. Линзовый двухдиапазонный ИК объектив // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 87–93.
10. Патент RU 2475787, Двухдиапазонный инфракрасный светосильный объектив / Хацевич Т. Н., Парфёнова Т.В.; опубл. 20.02.2013
11. Патент RU 2503047, Двухдиапазонный инфракрасный объектив. / Хацевич Т. Н., Парфёнова Т. В.; опубл. 27.12.2013.

© Т. В. Парфёнова, Т. Н. Хацевич, 2014

УДК 681.7.015.2

ИК-ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ШИРОКОФОРМАТНЫХ ОХЛАЖДАЕМЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ДИАПАЗОНОВ 3–5 МКМ И 8–12 МКМ

Елена Олеговна Ульянова

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383)330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

Павел Алексеевич Алдохин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383)330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

В статье рассмотрены ИК-объективы для тепловизионных приборов на основе широкоформатных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств для работы в спектральных диапазонах 3 – 5 и 8 – 12 мкм.

Ключевые слова: объектив, фотоприемное устройство, характеристики.

IR-LENSES FOR THE LARGE-FORMAT COOLED PHOTODETECTOR ARRAYS FOR THE SPECTRAL RANGES 3–5 μm AND 8–12 μm

Elena O. Ulyanova

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, “Technological Design Institute of Applied Microelectronics” (NB ISP SB RAS “TDI AM”), 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, second researcher, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: helen@oesd.ru

Pavel A. Aldoshin

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, “Technological Design Institute of Applied Microelectronics” (NB ISP SB RAS “TDI AM”), 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1, Prosp. Akademika Lavrentieva, second researcher, department of thermal imaging and television, tel. (383)330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

The lenses for thermal imaging devices based on the large-format cooled photodetector arrays operating in the spectral ranges 3 – 5 μm and 8 – 12 μm are presented in the paper. The optical schemes of the lenses, their main parameters and technical characteristics are given in the article as well as evaluation of their image quality.

Key words: lens, photodetector, characteristics.

Современный уровень развития тепловизионных приборов и систем предполагает совершенствование объективов тепловизоров. В связи с тенденцией увеличения формата современных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ) и уменьшением размера фоточувствительных элементов возникает необходимость в разработке новых объективов для сопряжения с широкоформатными МФПУ.

В докладе представлены два объектива для широкоформатных охлаждаемых МФПУ для работы в спектральных диапазонах 3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм. Приводятся основные параметры и характеристики разработанных объективов, а также приведены их оптические схемы и оценка качества изображения.

Первый объектив, разработанный в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ», рассчитан для спектрального диапазона 3,6 – 4,9 мкм (рис. 1), формирует изображение в плоскости охлаждаемого МФПУ с форматом кадра 640 × 512 элементов с шагом 25 мкм. В качестве прототипа был выбран наиболее близкий по характеристикам двухкомпонентный объектив, состоящий из семи линз [2].

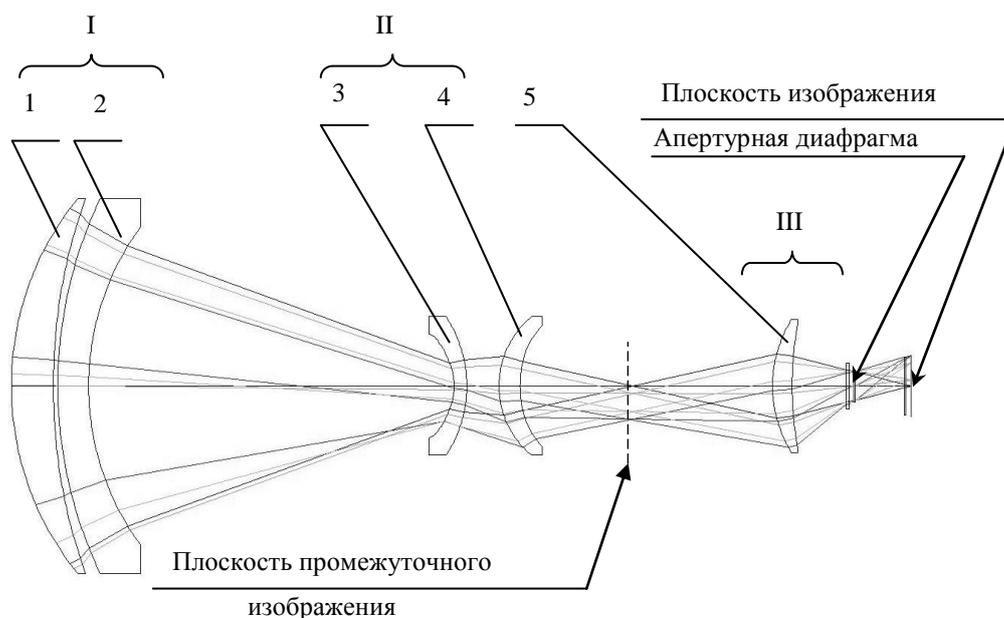


Рис. 1. Оптическая схема объектива для широкоформатного охлаждаемого МФПУ для спектрального диапазона 3 – 5 мкм:
1-4 – фронтальная часть объектива; 5 – проекционная часть объектива

Объектив содержит три последовательно расположенных на оптической оси компонента. Первый компонент состоит из положительного и отрицательного менисков (поз. 1 и 2) соответственно. Второй компонент содержит отрицательный и положительный мениски (поз. 3 и 4) соответственно. Третий компонент – положительный мениск (поз. 5). Объектив имеет четыре асферических поверхности. Линзы объектива изготовлены из двух оптических материалов (монокристаллического германия и кремния).

Выходной зрачок объектива совпадает с охлаждаемой диафрагмой криостата МФПУ, что обеспечивает отсутствие виньетирования для наклонных пучков лучей и минимизирует поступление на МФПУ фонового ИК излучения.

В табл. 1 приведены основные характеристики и параметры оценки качества изображения.

Таблица 1

Основные характеристики и параметры качества изображения объектива

Характеристики	
Рабочий спектральный диапазон, $\Delta\lambda$, мкм	3,6...4,9
Фокусное расстояние, f' , мм	250
Относительное отверстие, D/f'	1:2
Линейное поле зрения, $2y'$ (по диагонали кадра), мм	20,5
Масса, кг	1,435
Длина, мм	320

Параметры качества изображения	
Геометрический радиус пятна рассеяния для осевой точки, мкм, не более	3,9
Геометрический радиус пятна рассеяния на краю поля зрения, мкм, не более	17
ЧКХ при 60 лин/мм для осевой точки, отн.ед.	0,35
ЧКХ при 60 лин/мм на краю поля зрения, отн. ед.	0,1
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм для осевой точки, отн. ед.	0,85
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм на краю поля зрения, отн. ед.	0,81

Второй объектив (рис. 2), разработанный и изготовленный в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ», рассчитан для спектрального диапазона 7,7 – 10,3 мкм, формирует изображение в плоскости охлаждаемого МФПУ с форматом кадра 640×512 элементов с шагом 25 мкм. В качестве прототипа была выбрана оптическая система, рассмотренная в работах [3, 4].

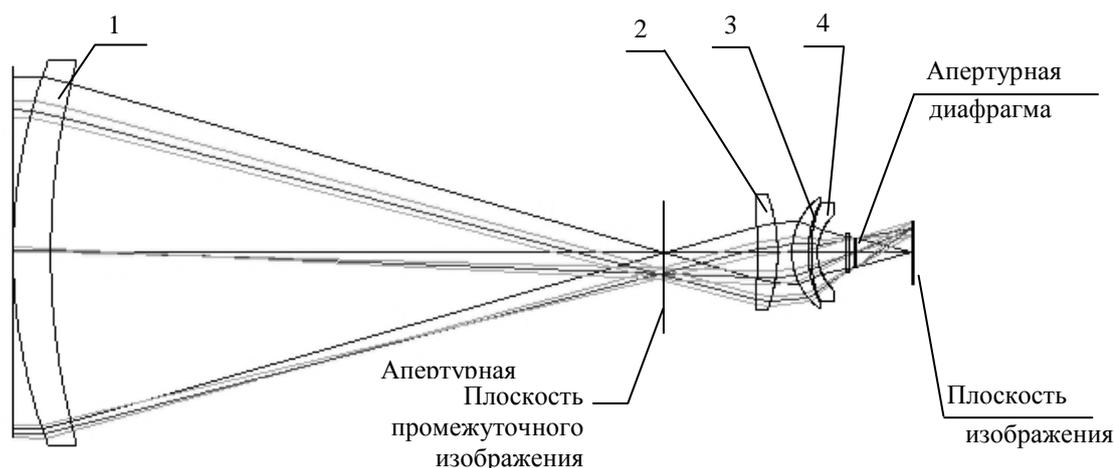


Рис. 2. Оптическая схема объектива для широкоформатного охлаждаемого МФПУ спектрального диапазона 8 – 12 мкм:

1 – фронтальная часть объектива; 2-4 – проекционная часть объектива

Объектив содержит два последовательно расположенных на оптической оси компонента. Первый компонент - положительный мениск (поз. 1). Второй компонент - два положительных (поз. 2, 3) и один отрицательный (поз. 4) мениски соответственно. Объектив имеет три асферических поверхности. Линзы объектива изготовлены из двух оптических материалов (монокристаллического германия и селенида цинка).

В табл. 2 приведены основные характеристики и параметры оценки качества изображения.

Таблица 2

Основные характеристики и параметры качества изображения объектива

Характеристики	
Рабочий спектральный диапазон, $\Delta\lambda$, мкм	7,7...10,3
Фокусное расстояние, f' , мм	250
Относительное отверстие, D/f'	1:2
Линейное поле зрения, $2y'$ (по диагонали кадра), мм	20,5
Масса, г	950
Длина, мм	310
Параметры качества изображения	
Геометрический радиус пятна рассеяния для осевой точки, мкм, не более	6,2
Геометрический радиус пятна рассеяния на краю поля зрения, мкм, не более	24,1
ЧКХ при 30 лин/мм для осевой точки, отн.ед.	0,32
ЧКХ при 30 лин/мм на краю поля зрения, отн. ед.	0,1
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм для осевой точки, отн. ед.	0,65
Функция концентрации энергии в пятне радиусом 12,5 мкм на краю поля зрения, отн. ед.	0,51

Разработанные объективы для широкоформатных охлаждаемых МФПУ построены по принципу использования промежуточной плоскости изображения. Особенности и преимущества такого принципа построения оптической системы подробно рассмотрены в работах [1 – 4].

Представленные объективы обладают хорошим качеством изображения, позволяющим использовать их с как с зарубежными широкоформатными охлаждаемыми МФПУ, например фирмы «Sofradir», так и с отечественными охлаждаемыми матричными приемниками, разработанными в ИФП СО РАН и ФГУП «НПО «Орион», форматы и технические характеристики которых позволяют создавать отечественные матричные тепловизионные приборы, не уступающие зарубежным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004.
2. Пат. № 2419113 Российская Федерация, МКП G02B13/14. Оптическая система с вынесенной апертурной диафрагмой для среднего ИК диапазона спектра / Хацевич Т. Н., Терешин Е. А.; заявитель и патентообладатель Хацевич Т. Н., Терешин Е. А. – №2009130270/28; заявл.06.08.2009; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14. – 20 с.
3. Ульянова Е. О. Принципы построения схем объективов тепловизионных приборов // 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. 1. – С. 142–145.

4. Ульянова Е.О. Оптические системы для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 8 – 12 мкм // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 6. – С. 14–19.

© Е. О. Ульянова, П. А. Алдохин, 2014

УДК 681.7

ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЫ

Марина Петровна Егоренко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Рассчитана оптическая система, работающая в визуальном и терагерцовом диапазонах спектра для получения комбинированного изображения, используя два спектральных диапазона одновременно.

Ключевые слова: визуальный и терагерцовый диапазоны спектра, комбинированное изображение, двухспектральная оптическая система, решение медицинских задач.

TWO SPECTRAL OPTICAL SYSTEM FOR MEDICAL DEVICES

Marina P. Egorenko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Senior lecturer, Department of Nanosystems and Optical Engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

The optical system that works in the visual and terahertz spectral ranges for the combined image using two spectral range zone simultaneously is designed.

Key words: visual and terahertz spectral ranges, combined image, two spectral optical system, the solution of medical problems.

В последнее время повысился интерес к использованию терагерцового диапазона длин волн для решения медицинских задач. Создание современных медицинских приборов ТГц-диапазона спектра на основе новой оптической элементной базе способно радикально изменить принципы и теоретические подходы к ранней медицинской диагностике и терапии хронических заболеваний (особенно раковых опухолей). В терагерцовом диапазоне спектра возможно определение раковых клеток под кожей больного. Однако, для лечения этих заболеваний, особенно с помощью лазерного излучения, необходимо знать точное расположение раковых клеток, что трудно достижимо по ТГц изображению.

Данную проблему частично можно решить применением двухспектральных оптических систем, которые работают в визуальном и ТГц диапазонах одновременно. Применение визуального диапазона спектра для определения положения раковых клеток позволяет повысить ее точность на 2, 3 порядка, в виду использования коротковолновой области излучения.

Предлагаемая оптическая система выполнена по патенту [1], теория расчета приведена в работах [2, 3]. Двухспектральная зеркально-линзовая система имеет единую оптическую ось, а разделение потока излучения по спектру производится перед фокальной плоскостью. Незначительная корректировка смещения фокальных плоскостей производится линзами Пиацци-Смита. Эта оптическая система позволяет получить изображение одного участка объекта в едином масштабе, но в разных спектральных диапазонах. Дальнейшая электронная обработка изображений позволит получить комбинированное изображение визуального и терагерцового диапазонов спектра.

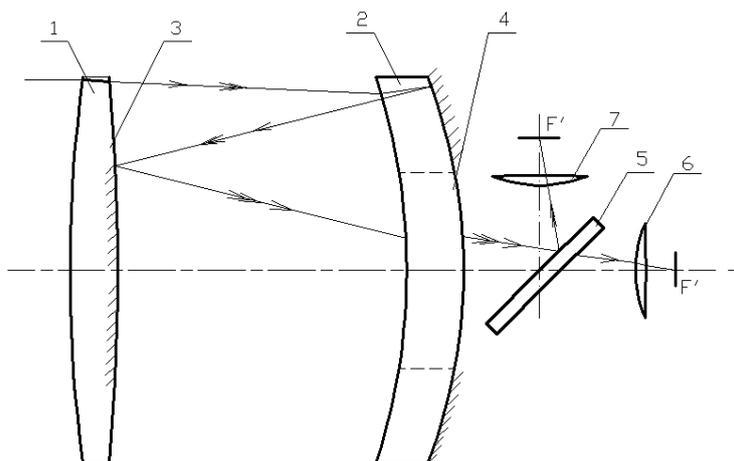


Рис. 1. Двухспектральная зеркально-линзовая система:

1 – положительная линза, выполненная в виде мениска; 2 – отрицательный мениск (зеркало Манжена); 3 – зеркало с наружным отражением, совмещенное со второй поверхностью положительной линзы 1; 4 – компенсатор aberrаций, выполненный расклеенным из отрицательной линзы, являющейся центральной частью отрицательного мениска 2; 5 – спектроразделительное зеркало; 6 и 7 – линзы Пиацци-Смита

Концентрация энергии в aberrационном кружке для визуального диапазона спектра ($\Delta\lambda = 0,486 - 0,9$ мкм) и для терагерцового диапазона спектра ($\Delta\lambda = 100 - 300$ мкм) приведены на рис. 2.

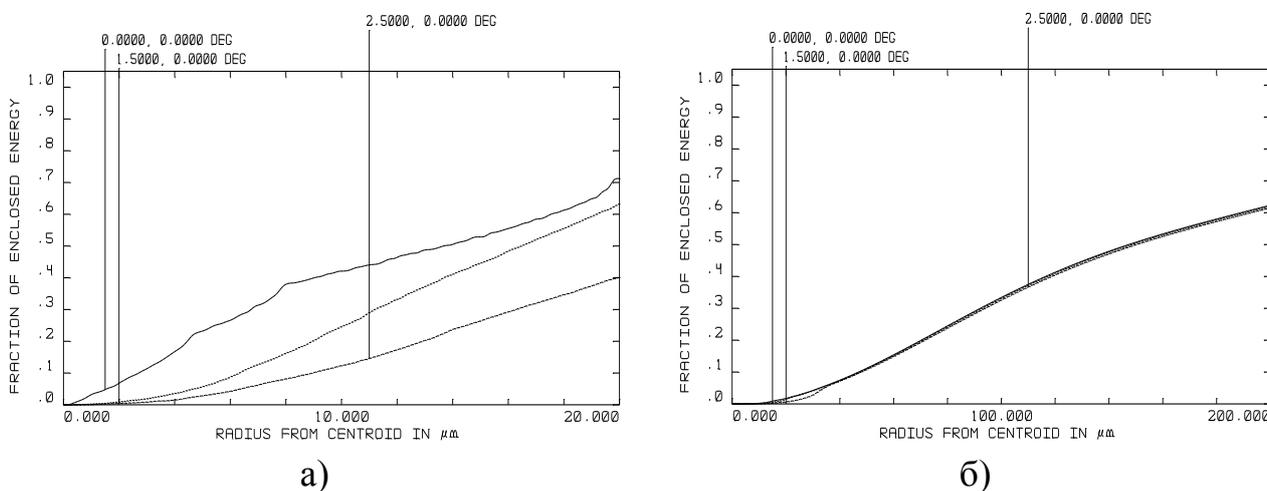


Рис. 2. Графики концентрации энергии в aberrационном пятне:

- а) визуальный диапазон спектра (радиус пятна 20 мкм);
- б) терагерцовый диапазон спектра (радиус пятна 200 мкм)

Результаты моделирования показывают принципиальную возможность разработки единой оптической системы для визуального и терагерцового диапазонов спектра. Разработка современной оптической элементной базы для медицинской аппаратуры позволяет совершенствовать медицинские технологии для диагностики и лечения раковых заболеваний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Пат. № 98072 Российской Федерации на полезную модель МПК⁴G02В 17/00; Двухспектральная зеркально-линзовая система; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – № 2010108755/22 (012273); заявл. 09.03.10; опубл. 27.09.10.

2. Егоренко М. П. Расчет хроматизма увеличения многоспектрального зеркально-линзового объектива // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – № 2. – С. 65–69.

3. Егоренко М. П., Ефремов В. С. Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – № 6. – С. 53–58.

© М. П. Егоренко, 2014

УДК 543.271.08:662.2

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ИК-ДИАПАЗОНА

Юрий Николаевич Пономарев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, доктор физико-математических наук, тел. (382)249-20-20, e-mail: yupon@iao.ru

Антон Владимирович Климкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, кандидат физико-математических наук, тел. (382)249-03-93, e-mail: tosha@asd.iao.ru

Борис Григорьевич Агеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1, кандидат физико-математических наук, тел. (382)249-11-11, доп.12-33, e-mail: ageev@asd.iao.ru

Галина Владимировна Симонова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 6341021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3, кандидат технических наук, доцент кафедры ОЭСИДЗ ТГУ, тел. (382)249-26-53, e-mail: galina_simonova@inbox.ru

В работе рассмотрена оптическая схема двухволнового лазерного газоанализатора для дистанционного обнаружения паров взрывчатых веществ и сопутствующих веществ маркеров. Принцип работы таких газоанализаторов основан на методе дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии с рассеянием излучения от топографической мишени, находящейся на расстоянии 50–100 м. Предложено одно из решений проблемы согласования пучков с разными длинами волн в плоскости тополишени и приемника излучения.

Ключевые слова: дистанционное обнаружение, взрывчатые вещества, метод дифференциальной абсорбционной спектроскопии.

**OPTICAL DESIGN OF DUAL WAVELENGTH LASER
INFRARED RANGE GAS-ANALYZER**

Yuri N. Ponomarev

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634021, Russia, Tomsk, Academician Zuev square 1, Dr., tel. (382)249-20-20, e-mail: yupon@iao.ru

Anton V. Klimkin

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634021, Russia, Tomsk, Academician Zuev square 1, Ph. D., tel. (382)249-03-93, e-mail: tosha@asd.iao.ru

Boris G. Ageev

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634021, Russia, Tomsk, Academician Zuev square 1, Ph. D., tel. (382)249-11-11, e-mail: ageev@asd.iao.ru

Galina V. Simonova

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 634021, Russia, Tomsk, Academichesky ave., 10/3, Ph. D., Assistant Professor of Department Optical Electronic Systems and Remote Sensing TSU, tel. (382)249-26-53, e-mail: galina_simonova@inbox.ru

In this paper optical design of dual wavelength laser gas-analyzer for remote detection of explosive vapors and associated marker agents is discussed. Principle of an operation of such gas-analyzers is based on differential absorption optical spectroscopy technique with radiation backscattering from a topographical target at distances of 50 –100m. One of problem solving of matching of beams with different wavelengths in topographical target and radiation detector flat is proposed.

Key words: remote detection, explosives, method of differential absorption spectroscopy.

Быстрое и точное дистанционное обнаружение следов наличия взрывчатых веществ (ВВ) является важной задачей для безопасности, как в военной, так и в гражданской областях. К настоящему времени предложено большое количество различных методов и технических средств обнаружения таких веществ, однако, не существует метода, способного обеспечить 100 % вероятность их обнаружения. Вследствие этого, разрабатываются новые методы, способные повысить эффективность обнаружения ВВ. Наибольшими возможностями в решении проблемы детектирования и идентификации следов как известных, так и новых типов ВВ, обладают методы лазерной спектроскопии. Существует множество лазерных методов, большинство из них отражено в опубликованных за последнее время обзорных работах [1 – 3].

Методы лазерной инфракрасной (ИК) спектроскопии представляют большой практический интерес для обнаружения и идентификации ВВ. В средней ИК-области колебательно-вращательные спектры поглощения молекул ВВ обладают высокой специфичностью, определяемой их симметрией и химическим составом. Свет в ИК-диапазоне является невидимым для невооруженного глаза, что позволяет проводить незаметное дистанционное обнаружение. Компоненты оптики в ИК-области более дешевые, чем в системах, которые используют рентгеновские лучи или терагерцовые сигналы. Однако для реализации данного метода необходимы перестраиваемые ИК лазерные источники света высокой мощности. Перспективными для применения в системах детектирования ВВ с использованием методов лазерной ИК-спектроскопии являются твердотельные лазеры на алюмо-иттриевом гранате легированном ионами неодима (Nd:YAG), газовые лазеры на парах металлов (ЛПМ) и CO₂-лазеры. Так же в настоящее время появление квантово-каскадных лазеров (ККЛ) позволяет развивать новые направления дистанционного обнаружения следов ВВ.

В работе [4] описан способ обнаружения паров суррогатных ВВ, таких как перекисные соединения типа ТАТП, основанный на методе дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии, где носителем информации является эхо-сигнал рассеянного на топографической мишени лазерного излучения.

Изготовлен макет дистанционного детектора [5] с одним каналом регистрации при зондировании на одной частоте, попадающей в центр полосы поглощения ТАТП на 11,2 мкм. Проведены трассовые эксперименты с целью определения перспективности обнаружения данного вещества. Проведенные работы показывают возможность применения метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии в ИК-диапазоне для обнаружения суррогатных ВВ на расстоянии порядка 100 метров и в широком диапазоне темпера-

тур. Однако при использовании только одного канала зондирования и регистрации не удастся сделать прибор с высокой селективностью. Для повышения селективности такого комплекса и увеличения числа определяемых веществ необходимо расширить диапазон длин волн генерации и области перестройки, а также увеличить число каналов регистрации поглощения.

В данной работе представлена разработанная оптическая схема двухволнового трассового газоанализатора, состоящая из передающей системы и системы приема (см. рисунок), оптические оси которых разнесены на расстояние 400 мм. Расчет характеристик оптической системы проводился для двух лазерных излучателей, генерирующих на длинах волн вблизи 11,2 и 7,4 мкм и лазера видимого диапазона, осуществляющего наведение на топографическую мишень. Использование двух перестраиваемых лазеров ИК-диапазона позволяет определить присутствие в атмосфере как паров стандартных, так и суррогатных ВВ.

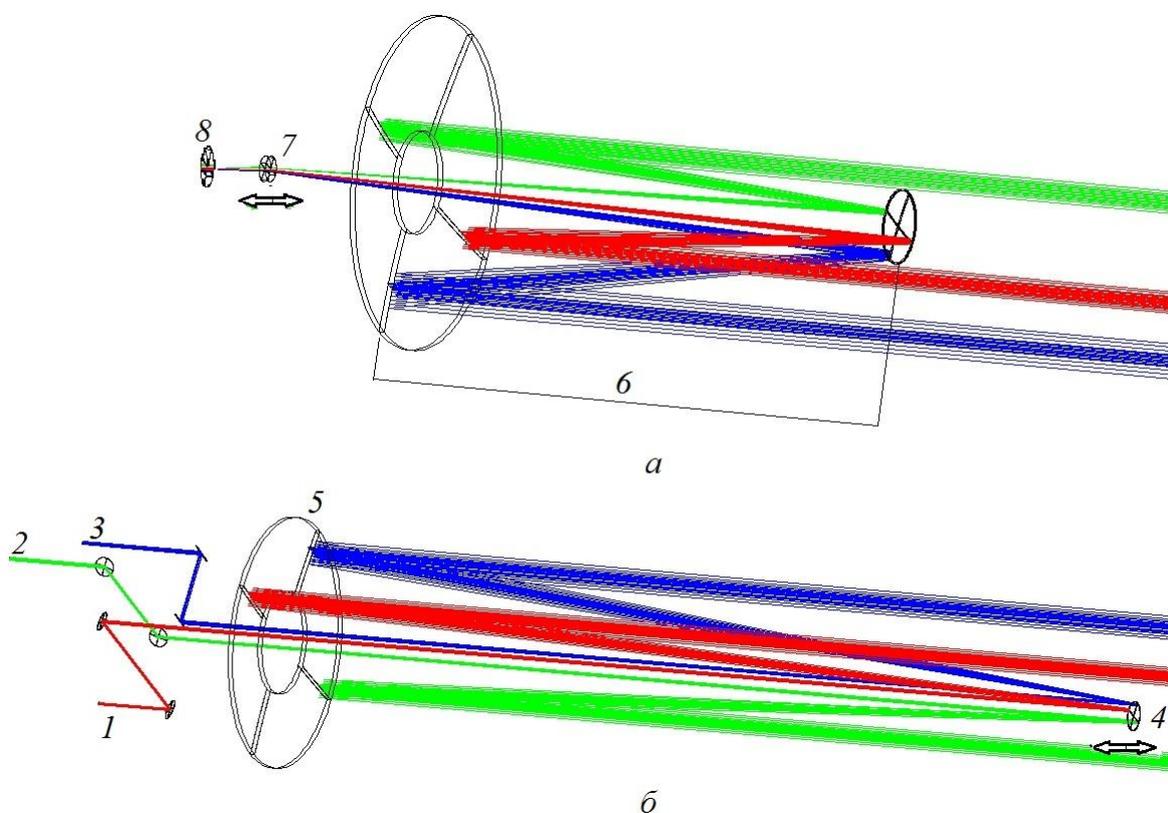


Рис. Оптическая схема двухволнового газоанализатора

(*a* – приемная система, *б* – передающая система): 1 – лазер CO_2 ($\lambda = 10,2$ мкм); 2 – квантово-каскадный лазер ($\lambda = 7,4$ мкм); 3 – юстировочный лазер ($\lambda = 0,632$ мкм); 4, 5 – сферические зеркала; 6 – объектив Кассегрена; 7 – компенсационный клин; 8 – фотоприемное устройство (ФПУ)

Передающая система газоанализатора состоит из перечисленных выше источников излучения и компактной зеркальной двухкомпонентной перестраиваемой коллимирующей оптической системы (рис. б), позволяющей одновременно проводить зондирование на разных перестраиваемых частотах.

Подфокусировка излучения на требуемую дистанцию (50 – 100 м) обеспечивается передвижением зеркала 4 вдоль оптической оси на расстояние ± 5 мм помощью линейного транслятора с шаговым двигателем. Зеркальная оптика выполнена из сферических зеркал, позволяющих фокусировать излучение на топографическую мишень.

Система приема (рис. а) представляет собой телескопический объектив Кассегрена с высокочувствительным ФПУ на основе криогенно- или термоэлектрически охлаждаемых полупроводников. Объектив Кассегрена имеет диаметр главного зеркала 250 мм и сфокусирован на дистанцию 75 м. При исследовании на дистанциях от 50 до 100 м изображения пятен принимаемого излучения перемещаются по оси Y, что вызывает виньетирование на приемной площадке ФПУ. После прицеливания для исключения виньетирования за приемным объективом размещают компенсационный клин с клиновидностью в 2° , выполненный из германия. Перемещение клина относительно фотоприемной площадки вдоль оптической оси приемной системы с помощью двухкоординатного линейного транслятора с шаговым двигателем позволяет для разных дистанций проецировать пятна принимаемого сигнала от двух источников излучения разнесенных по оси X на одну и ту же координату по оси Y, что позволяет разместить стационарно в горизонтальной плоскости два независимых ФПУ.

Разработанная приемо-передающая зеркальная оптическая система дистанционного газового анализатора позволяет использовать различные источники излучения и ФПУ, что способствует развитию новых эффективных подходов создания комбинированных систем, основанных на применении различных лазерных технологий для обнаружения ВВ. По всей видимости, в будущем именно такие системы будут играть определяющую роль.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Munson C. A., Gottfried J. L., De Lucia Jr. F. C., McNesby K. L.; Miziolek A. W. Laser-Based Detection Methods of Explosives, in Counterterrorist Detection Techniques of Explosives; Yinon J. Ed.; Elsevier: Amsterdam. – 2007. – P. 279–321.
2. Скворцов Л. А. Лазерные методы обнаружения следов взрывчатых веществ на поверхности удаленных объектов // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. № 1 – С. 1–11.
3. Moore D. S. Instrumentation for trace detection of high explosives // Rev. Sci. Instrum. V. – 2004. – V. 75. – PP. 2499–2512.
4. Сакович Г. В., Резнев А. А., Чернов А. И., Максимов Е. М., Передерий А. Н., Степанов Е. В., Силантьев С. В., Ворожцов А. Б., Павленко А. А., Максименко Е. В., Ворожцов Б. И., Бобровников С. М., Горлов Е. В., Макогон М. М., Клишкин А. В., Осипов К. Ю., Пономарев Ю. Н., Капитанов В. А., Агеев Б. Г. Оптические методы дистанционного обнаружения паров взрывчатых веществ в атмосфере // Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: К 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН: сб. научных трудов. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 246–259.
5. Сакович Г. В., Чернов А. И., Силантьев С. В., Ворожцов А. Б., Павленко А. А., Максименко Е. В., Макогон М. М., Клишкин А. В., Осипов К. Ю., Пономарев Ю. Н., Капитанов В. А., Агеев Б. Г. Макет дистанционного детектора взрывчатых веществ на основе изотопного CO_2 -лазера // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – С. 38–46.

УДК 004.92, 004.932

**О Контрасте Комбинированных Изображений в 3D Дисплеях,
Стимулирующих Аккомодацию Глаза**

Евгений Владимирович Власов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (893)134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Аристарх Михайлович Ковалев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41;
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, просп. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: amkov@ngs.ru

Рассматривается контраст линейной комбинации изображений на двух планах, разнесенных вдоль зрительной оси глаза для стимулирования аккомодации. Предложен способ повышения контраста при заданном диаметре зрачка глаза и разрешении изображений.

Ключевые слова: 3D изображение, стимул аккомодации, планы изображений, аккомодация, комбинированные изображения, контраст.

THE CONTRAST OF THE COMBINED IMAGES IN A 3D DISPLAYS WITH EYE ACCOMODATION STIMULATING

Evgenii V. Vlasov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41, Associate Scientist, tel. (893)134-49-38, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Aristarkh M. Kovalev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering (TDI SIE), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya street, 41;
Institute of Automation and Electrometry, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Koptug ave. 1, Ph.D., Chief Scientific Officer, e-mail: amkov@ngs.ru

We consider the contrast of a linear combination of the two planes-images spaced along the visual axis of the eye to stimulate accommodation. A method for increasing the contrast with a given diameter of the eye pupil and the images resolution is providing.

Key words: 3D image, stimulus of accommodation, planes-images, combined images, contrast.

Введение

В трехмерных дисплеях с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции [1 – 4] изображение формируется путем линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределенных по глубине пространства.

В [2, 5] при дифракционном анализе линейной комбинации двух планов изображений показано, что глаз аккомодирует на пиковое значение аксиальной интенсивности при любых абберациях оптической системы «окуляр + глаз». Однако при этом возникают большие потери контраста – от 10 до 45 % [2].

Целью настоящей работы является поиск решений по повышению контраста комбинированных изображений в трехмерных дисплеях.

Комбинации планов-изображений

Рассматривается биплановая система [1], формирующая объемное изображение путем линейной комбинации планов-изображений, отстоящих по глубине пространства на 0,56 дптр при стандартном разрешении изображений 2 угл. мин. и использовании модели глаза Атчисона с типовым входным зрачком 3 мм.

На рис. 1 показаны линейные комбинации аксиальных распределений интенсивностей изображений P1 и P2 для разных значений относительного положения точки β по глубине между планами. Линия *max* – это линия пиковых интенсивностей линейных комбинаций, рассчитанных по формуле (3) из [2]:

$$I(x,y,z) = I(x,y) [PSFA(z - Z_n) (1 - \beta(x,y)) + PSFA(z - Z_f) \beta(x,y)], \quad (1)$$

где $I(x,y)$ – двумерное изображение сцены; $PSFA(z)$ – аксиальное распределение интенсивности; Z_n, Z_f – глубина планов P1, P2 в дптр; $\beta(x,y)$ – относительное положение точки на интервале $[Z_n, Z_f]$. Как видно из кривой *max* в данном случае появляются потери контраста $\leq 20\%$, которые желательно устранить.

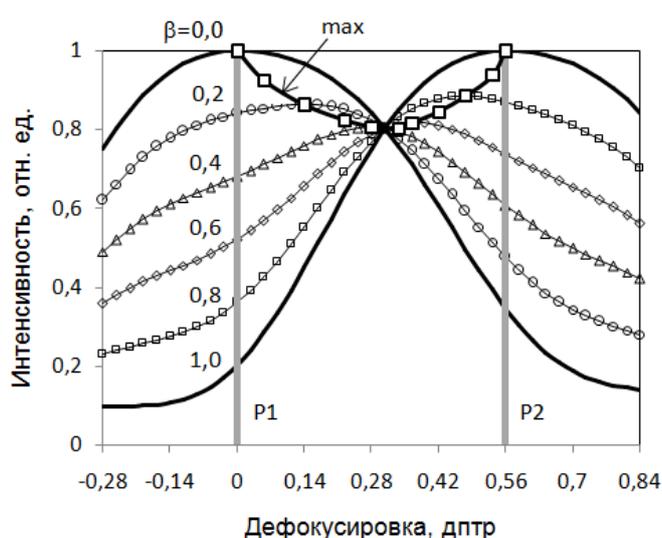


Рис. 1. Линейные комбинации аксиальных интенсивностей изображений

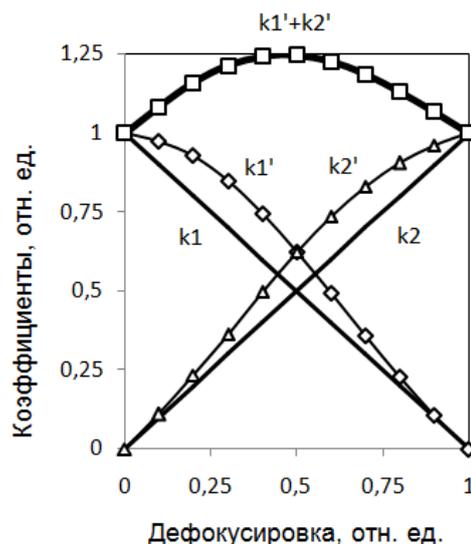


Рис. 2. Нормирование коэффициентов линейной комбинации

Повышение контраста

Одним из способов повышения контраста является нормирование комбинаций (1) с помощью специально заданных коэффициентов. Пусть в линейной комбинации изображений P1, P2 для пиксела, заданного в позиции (x,y) , коэффициенты $k1 = (1 - \beta)$ и $k2 = \beta$ (рис. 2). Тогда, согласно (1):

$$I(z) = I [PSFA(z - Z_n) k1 + PSFA(z - Z_f) k2], \quad (2)$$

и для некоторого значения z' интенсивность $I(z')=I_{max}$, т. е. получено пиковое значение. Нормируем интенсивность (2) по I_{max} : $I'(z)=I(z)/I(z')$, или

$$I'(z) = PSFA(z - Z_n) k1' + PSFA(z - Z_f) k2', \quad (3)$$

где $k1' = k1 \cdot I(z)/I_{max}$ и $k2' = k2 \cdot I(z)/I_{max}$.

Таким образом, «нормированные» коэффициенты $k1'$ и $k2'$ (рис. 2) можно посчитать априори для известной функции аксиального распределения $PSFA(z)$ при заданном диаметре зрачка глаза и разрешении изображения, которые и определяют допустимый интервал между планами $[Z_n Z_f]$ по глубине [6]. В системе обработки изображений нелинейные функции $k1'$ и $k2'$ удобно хранить либо в табулированном виде, либо в виде полиномов 3-й степени.

При использовании нелинейных коэффициентов $k1'$ и $k2'$ в (2) получают комбинации интенсивностей, приведенные на рис 3. Как видно по линии *max* провал контраста устраняется полностью.

К сожалению, данный способ не решает проблемы линейности стимула аккомодации в заданном диапазоне глубины (1, рис. 4). Погрешность стимула аккомодации (2, рис. 4) может достигать 0,06 дптр. Можно заметить, что максимальное отклонение от линейности приходится на ближний план. Это объясняется несимметрией ветвей аксиальной интенсивности $PSFA(z)$ относительно фокуса при $z = 0$.

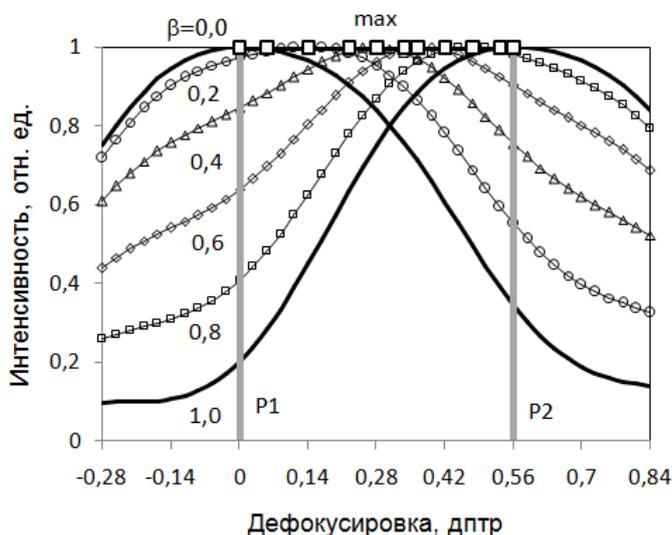


Рис. 3. Линейные комбинации с нормированными коэффициентами для разных значений β при $a = 3$ мм

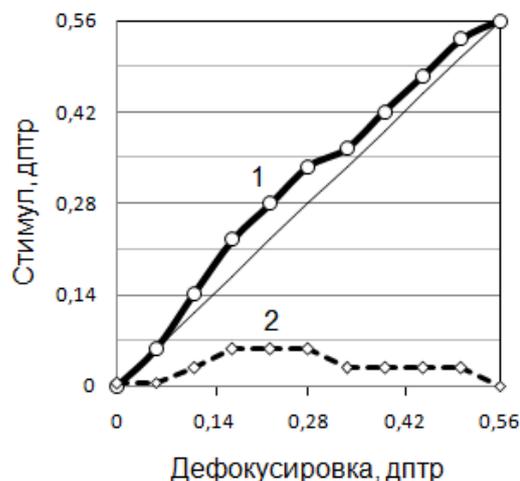


Рис. 4. Зависимость аккомодации от дефокусировки: 1) стимул аккомодации, 2) погрешность стимула

Заключение

В работе рассмотрен способ повышения контраста путем нормирования комбинированных изображений в трехмерных дисплеях. Способ требует априорных сведений о функции аксиального распределения интенсивностей в си-

стеме «окуляр + глаз» и предварительного расчета коэффициентов линейной комбинации планов-изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бифокальный объемный стереоскопический дисплей / А. М. Ковалев, Ю. Л. Кравченко, С. В. Хрящев, Н. А. Елыков, Е. В. Власов, А. О. Морозов // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 94–97.
2. Ковалев А. М. Власов Е. В. О качестве трехмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 33–40.
3. Akeley K., Watt S. J., Girshick A. R., Bancks M. S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. – 2004. – 23, – No.3. – P. 804–813.
4. Love G. D., Hoffman D. M., Hands P. J., Gao J., Kirby A. K., Bancks M. S. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display // Optics Express. – 2009. – 17. – No.18. – P. 15716-15725.
5. Ковалев А. М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. – 2010. – Т. 46, – № 3. – С. 86–94.
6. Ковалев А. М., Власов Е. В. Дифракционная глубина трехмерных изображений, стимулирующих аккомодацию глаза // Автометрия. – 2014. – Т. 50, – №1. – С. 3–8.

© Е. В. Власов, А. М. Ковалев, 2014

УДК 29.31.26

**БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ПРИСТАВКА
ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО МИКРОСКОПА С БЛОКОМ
НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ**

Александр Григорьевич Верхогляд

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Василий Валерьевич Герасимов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, младший научный сотрудник, тел. (383)329-48-39, e-mail: einy@ngs.ru

Марина Андреевна Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Борис Александрович Князев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)329-48-39, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Сергей Николаевич Макаров

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, старший научный сотрудник, заместитель заведующего лабораторией, тел. (383)306-58-66, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Дмитрий Георгиевич Родионов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, аспирант СО РАН, старший лаборант, тел. (383)329-48-39, e-mail: rodionovdmitrii@mail.ru

Описаны состав и устройство ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, конфокальный датчик для измерения расстояния, ближнепольная сканирующая микроскопия.

**NEAR-FIELD SCANNING MODULE FOR TERAHERTZ SPECTROMETER
FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION**

Aleksander G. Verkhoglyad

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Head of Laboratory, tel. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Vasily V. Gerasimov

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 11, Akadem. Lavrent'eva pr., Junior Researcher, tel. (383)329-48-39, e-mail: einy@ngs.ru

Marina A. Zavjalova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior Researcher, tel. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Boris A. Knyazev

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 11, Akadem. Lavrent'eva pr., Dr. Sci., Principal Researcher, tel. (383)329-48-39, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Sergei N. Makarov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Senior Researcher, Deputy of Laboratory Head, tel. (383)306-58-66, e-mail: makarovsn@tdisie.nsc.ru

Dmitry G. Rodionov

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 11, Akadem. Lavrent'eva pr., Post-graduate student of SB RAS, Laboratory assistant, tel. (383)329-48-39, e-mail: rodionovdmitrii@mail.ru

This article presents the design concept of near-field scanning attachment for terahertz spectrometer frustrated total internal reflection.

Key words: terahertz radiation, confocal sensor for distance measurement, near-field scanning microscopy.

Введение

В 1982 г. Дитером Полем (лаборатория фирмы ИВМ, г. Цюрих, Швейцария) был изобретен ближнепольный оптический микроскоп, в котором для преодоления дифракционного предела использовалось явление прохождения света через субволновые диафрагмы (отверстия с диаметром много меньше длины волны падающего излучения) [1]. В настоящее время ближнепольная оптическая микроскопия хорошо развита для видимого спектра электромагнитного излучения. Однако, для исследователей в материаловедении, биологии, медицине большой интерес представляют исследования материалов в диапазонах, выходящих за пределы видимого. Одним из таких диапазонов является диапазон терагерцовых (ТГц) длин волн, в котором можно получить принципиально новые характеристики материалов. В работе [2] обсуждаются результаты экспериментального исследования механизма взаимодействия когерентного ТГц излучения с системой зонд–нанообъект в ТГц безапертурном ближнепольном микроскопе. Получены зависимости дифференциального сигнала ТГц поля от расстояния между зондом и образцом. Однако, созданный ТГц микроскоп ближнего поля относится к контактным и полуконтактным способам измерения и не пригоден для исследования образцов, обладающих малой механической жесткостью. Нашей задачей является построение микроскопа ближнего поля, позволяющего исследовать органические материалы и биологические объекты в сверхтонком слое. Для этого нами предложено объединить два метода – метод ТГц спектро-

скопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [3] и метод ближнепольной сканирующей микроскопии (БЗСМ) [4]. Комбинация этих двух методов дает возможность исследовать спектральные характеристики тонких слоев материалов, обладающих очень большим коэффициентом поглощения в ТГц диапазоне, за счет введения специального зонда в область локализации эванесцентной волны, сканирования поверхности объекта и детектирования результата взаимодействия объекта и зонда. Тем самым, появляется возможность исследовать оптические свойства образца в локальных областях, соответствующих размеру зонда (как правило, диаметр апертуры которого много меньше длины волны излучения).

Целью работы является разработка ближнепольной сканирующей приставки на базе терагерцового микроскопа с блоком НПВО.

Терагерцовый ближнепольный микроскоп с блоком НПВО

Схема собранного терагерцового микроскопа с блоком НПВО показана на рис. 1. Источником терагерцового излучения служит Новосибирский лазер на свободных электронах (н.л.с.э.) [5]. Его излучение представляет собой последовательность 100пс импульсов, следующих с частотой повторения 5,6 МГц. Пучок имеет гауссову форму (радиус 9 мм) и линейно поляризован. Излучение н.л.с.э. – монохроматическое с относительной спектральной шириной 0.3 – 1 % и может плавно перестраиваться по длине волны в диапазонах 120 – 240 и 20 – 100 мкм. Средняя мощность излучения на рабочей станции в стандартных режимах обычно составляет 10 – 100 Вт.

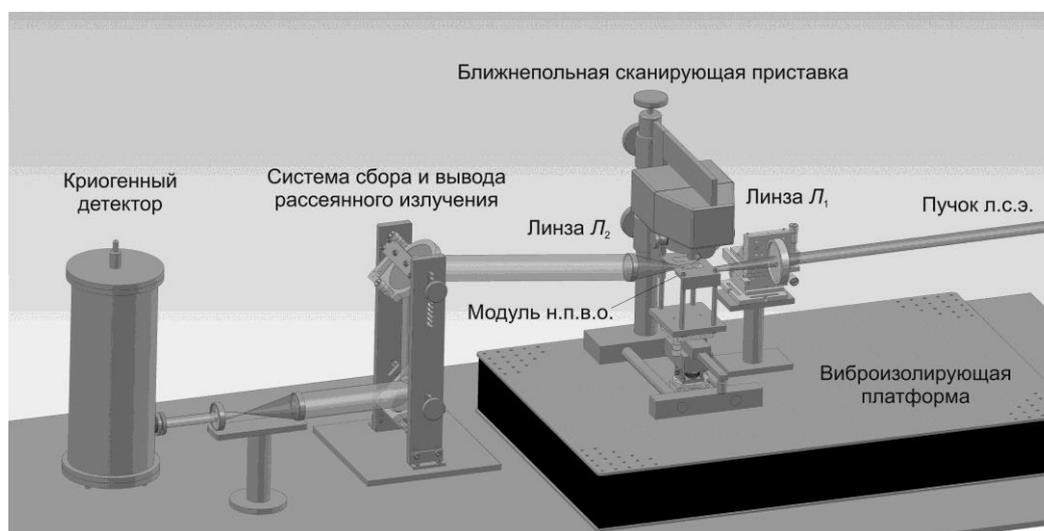


Рис. 1. Схема оптического терагерцового микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения

Излучение н.л.с.э. фокусируется с помощью линзы из полиметилпентена (ТРХ) с фокусным расстоянием $f_1 = 150$ мм на поверхность кремниевой призмы с образцом. В область эванесцентной волны с помощью ближнепольной сканирующей приставки вводится металлический зонд. При длине волны 140 мкм

глубина проникновения эванесцентной волны в воздух составляет 10 – 20 мкм, а значит, размер исследуемых объектов может варьироваться от величины, равной диаметру кончика зонда, до ~ 10 мкм. Субволновой зонд в виде вольфрамовой иглы с диаметром кончика $d = 0,1\text{--}1$ мкм рассеивает излучение, которое собирается с помощью второй линзы с $f_2 = 50$ мм. Диаметр линзы равен 50 мм, что позволяет захватить значительную часть рассеянной волны. Далее с помощью системы сбора и вывода рассеянного излучения пучок направляется на вход детектирующей системы. Модуль н.п.в.о. и ближнеполюсная сканирующая приставка расположены на виброизолирующей платформе с пневматическим подавлением колебаний (модель Newport M-VT-2024-OPT 02 BenchTop™).

Размер освещаемой лазером внутренней поверхности призмы ограничен дифракционным пределом и равен ~ 1 мм, что значительно превышает диаметр зонда, поэтому мощность рассеянного излучения будет очень мала. Для увеличения мощности полезного сигнала, создана система синхронного детектирования рассеянного излучения, модулированного с помощью механических колебаний кончика зонда.

Ближнеполюсная сканирующая приставка

Ближнеполюсная приставка (рис. 2) включает в себя оптический датчик 1, подробно описанный в [6], позволяющий при сканировании достичь чувствительности к изменению уровня поверхности образца порядка 100 нм, XYZ-позиционирующую платформу 2 на основе пьезоподвижек фирмы Physik Instrumente (модель M-663) с шагом сканирования 0,1 мкм в диапазоне 20 мм по трем осям. Она обеспечивает механическое позиционирование субволнового зонда 3 над поверхностью НПВО-элемента 4. Субволновой зонд 3 закреплен на стержне магнитострикционного генератора колебаний 5. Необходимость введения генератора была обусловлена малой величиной радиометрической мощности рассеянного с зонда ТГц излучения на фоне основной мощности. Разработчикам удалось реализовать генератор с частотой первой моды колебаний, а именно $\sim 26 \cdot 10^3$ Гц. При этом амплитуда колебаний концов стержня равна 1 – 3 мкм. Также в состав ближнеполюсной приставки вошел держатель 6 для проецирующей оптики, позволяющей снимать сигналы с острия зонда.

Для калибровки системы в схему введен датчик касания, в котором применен новый метод определения расстояния между острием проводящего зонда и проводящей поверхностью. Метод основан на экспериментально измеренной зависимости установившегося тока отрицательного коронного разряда от расстояния между зондом и поверхностью. Применение данного метода позволяет использовать грубое (с субмиллиметровым шагом) приближение острия зонда к поверхности и, тем самым, сократить время, требуемое для точного приближения, обеспечивающего безопасное касание поверхности.

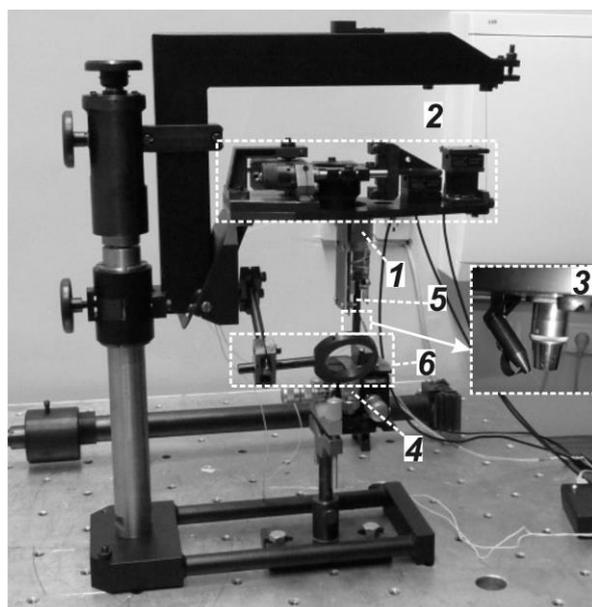


Рис. 2. Ближнепольная сканирующая приставка:
 1 – оптический конфокальный датчик; 2 – XYZ-позиционирующая платформа; 3 – субволновой зонд; 4 – н.п.в.о.-элемент; 5 – генератор колебаний; 6 – проецирующая оптика; 7 – датчик касания

Основные результаты

Нами разработана и изготовлена ближнепольная сканирующая приставка для терагерцового оптического микроскопа, работающего в режиме НПВО, в котором в качестве источника излучения используется перестраиваемый по длине волны лазер на свободных электронах. Основными элементами приставки являются: конфокальный датчик для измерения расстояния с субволновым зондом в виде вольфрамовой иглы, XYZ-позиционирующая платформа, датчик касания и генератор колебаний. Все узлы прошли предварительные испытания. Были проведены первые эксперименты по изучению возможностей терагерцового микроскопа на излучении лазера на свободных электронах с длиной волны, равной 140 мкм, в котором в качестве детектора использовалась ячейка Голея, подключенная к синхронному усилителю SR-830. Это позволило определить источники паразитной засветки. Направлением дальнейших исследований является разработка высокочувствительной системы детектирования терагерцового излучения и модификация регистрирующей системы микроскопа с блоком НПВО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pohl D. W., Denk W., Lanz M. Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$ // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – V. 44. – P. 651–653.
2. Трухин В. Н., Андрианов А. В., Быков В. А., Глубок А. О., Зиновьев Н. Н., Самойлов Л. Л., Сапожников И. Д., Трухин А. В., Фельштын М. Л. Взаимодействие терагерцового

электромагнитного излучения с системой зонд-объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93. – № 3. – С. 134.

3. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004.

4. Герасимов В. В., Князев Б. А. Особенности спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в терагерцовом диапазоне // Вестник НГУ. Сер. Физика. – 2008. – Т. 4. – Вып. 4. – С. 97.

5. Shevchenko O. A., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Dementyev E. N., Dovzhenko V. A., Getmanov Ya. V., Gorniker E. I., Knyazev B. A., Kolobanov E. I., Kondakov A. A., Kozak V. R., Kozyrev E. V., Kubarev V. V., Kulipanov G. N., Kuper E. A., Kuptsov I. V., Kurkin G. Ya., Medvedev L. E., Mironenko L. A., Ovchar V. K., Persov B. Z., Pilan A. M., Popik V. M., Repkov V. V., Salikova T. V., Scheglov M. A., Sedlyarov I. K., Serdobintsev G. V., Serednyakov S. S., Skrinsky A. N., Tararyshkin S. V., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A., Vlasenko M. G., Vobly P. D., Volkov V. N. Budker INP free electron laser facility: current status and future prospects // Proceedings of RUPAC 2012. Saint-Petersburg, Russia, 2012. – P. 136.

6. Верхогляд А. Г., Герасимов В. В., Завьялова М. А., Князев Б. А., Макаров С. Н., Ступак М. Ф. Концепция построения ближнепольной сканирующей приставки для терагерцового спектрометра нарушенного полного внутреннего отражения // Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы: юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2012. – С. 409–427.

© А. Г. Верхогляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова,
Б. А. Князев, С. Н. Макаров, Д. Г. Родионов, 2014

СПОСОБ КОРРЕКЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ХРОМАТИЗМА В ДВУХВОЛНОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Предложено использовать дихроический оптический элемент для коррекции дифференциального хроматизма в двухволновом оптическом интерферометре. Элемент выполнен в виде плоско-параллельной пластинки определенной толщины, установленной в одно из плеч интерферометра. Показано, что разность положений максимумов коррелограмм для двух длин волн, которые соответствуют нулевой разности оптического хода света в опорном и измерительном плечах интерферометра, можно сделать существенно меньше используемых длин волн.

Ключевые слова: интерферометр, двухволновая интерферометрия, измерение нанорельефа.

THE DIFFERENTIAL CHROMATISM CORRECTION METHOD IN THE TWO-WAVE INTERFEROMETER

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Ph. D., tel. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

The using of dichroic optical element for differential chromatism correction in the optical two-wave interferometer has been proposed. This element was designed as a parallel-sided plate of the specified thickness placed in interferometer arm. It was shown that the difference in the position of correlograms maximum for two wavelengths corresponding to zero optical path difference of light in the reference and measurement arms of interferometer can be significantly less than the used wavelengths.

Key words: interferometer, two-wavelength interferometry, nanorelief measurements.

Интерференционные измерения нанорельефа поверхности основаны на расчете фазы автокорреляционной функции интерферирующих волн [1]. В про-

цессе измерения производится сканирование путем изменения разности фаз интерферирующих волн и регистрируется изменение интенсивности света в каждой измеряемой точке (коррелограмма). Погрешность измерений существенно зависит от отношения сигнала к шуму, определяемому видностью интерференционных полос. Для расширения диапазона измерений [2] и решения других задач в интерферометрах часто используется несколько длин волн света. При этом схема интерферометра становится более сложной, и возрастают требования к оптическим элементам. Одна из проблем, которая возникает при использовании в интерферометре нескольких источников излучения с разными длинами волн.

Неодинаковый коэффициент преломления оптических элементов, через которые проходит свет, приводит к тому, что максимумы коррелограмм соответствующие нулевой разности хода для каждой длины волны сдвинуты на некоторую величину друг относительно друга – дифференциальный хроматизм (ДХ). Наличие ДХ усложняет проведение прецизионных измерений, особенно в случае, когда сдвиг между максимумами коррелограмм превышает длину когерентности одного из используемых источников излучения.

Целью данной работы является устранение ДХ. Для этого предложено установить в одно из плеч интерферометра дихроичный элемент в виде плоскопараллельной стеклянной пластинки.

На рис. 1 представлена оптическая схема интерферометра Линника с двумя источниками излучения. Схема включает в себя два источника света 1 и 2 с длинами волн λ_1 и λ_2 , светоделитель 3, коллимирующий объектив 4, светоделитель 5, два микрообъектива с идентичным увеличением 6 и 9, опорное зеркало 7, пьезоэлектрический актюатор 8, объект измерения 10, тубусную линзу 11 и ПЗС матрицу 12.

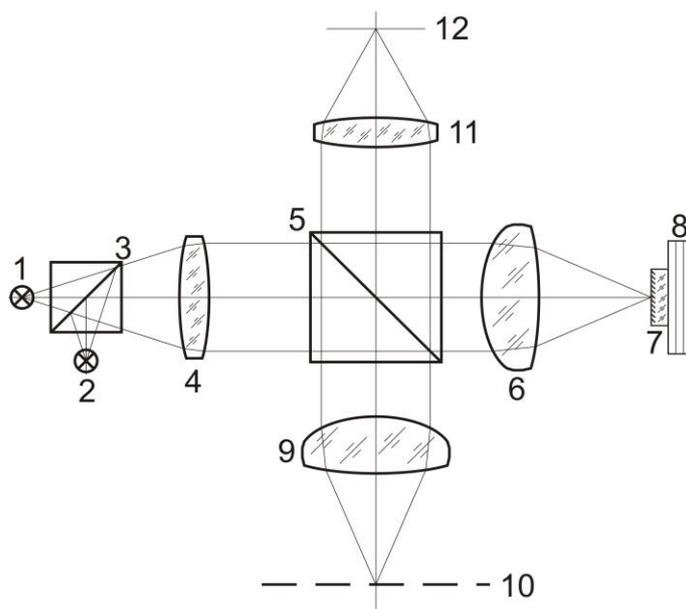


Рис. 1. Схема интерферометра Линника

Толщина плоскопараллельной пластины, корректирующая дифференциальный хроматизм, определяется при помощи зарегистрированных для двух длин волн коррелограмм.

На рис. 2 показано опорное и измерительное плечо интерферометра (рис. 1). Плоскости 10 и 10' обозначают положения поверхности объекта измерения, для которых будет регистрироваться максимум интерференции на длинах волн $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$, соответственно. После установки компенсационной плоскопараллельной пластины в одно из плеч интерферометра, положение поверхности объекта для которого регистрируется максимум интерференции на длинах волн $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$ должно быть одинаково (плоскость 10'').

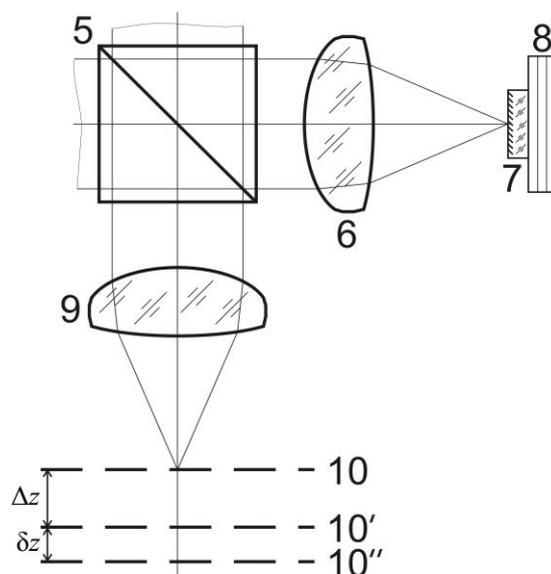


Рис. 2. Опорное и измерительное плечо интерферометра Линника: положения поверхности объекта измерения

Толщина d компенсационной плоскопараллельной пластины определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} 2 \cdot d \cdot n(\lambda_1) = \Delta z + \delta z \\ 2 \cdot d \cdot n(\lambda_2) = \delta z \end{cases}$$

$$d = \frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta n},$$

где Δz – смещение между максимумами коррелограмм зарегистрированных на длинах волн $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$ без установки компенсационной плоскопараллельной пластины, величина $\Delta z + \delta z$ – смещение максимумов коррелограмм для длин волн $\bar{\lambda}_1$ и $\bar{\lambda}_2$ после установки компенсационной плоскопараллельной пластины,

$\Delta n = n(\bar{\lambda}_1) - n(\bar{\lambda}_2)$ – разница показателей преломления компенсационной плоскопараллельной пластины.

На рис. 3 показаны экспериментальные результаты коррекции дифференциального хроматизма. Регистрация коррелограмм выполнялась в интерферометре Линника с двумя источниками излучения $\bar{\lambda}_1 = 631,4$ нм и $\bar{\lambda}_2 = 476,7$ нм. В опорном и измерительном плече интерферометра использовались микрообъективы Olympus MPLFLN 5^x. Для компенсации дифференциального хроматизма была использована пластинка толщиной 0,18 мм, материал пластинки К8. Исходное положение максимумов коррелограмм показано на рис. 3, а, скорректированное – на рис. 3, б.

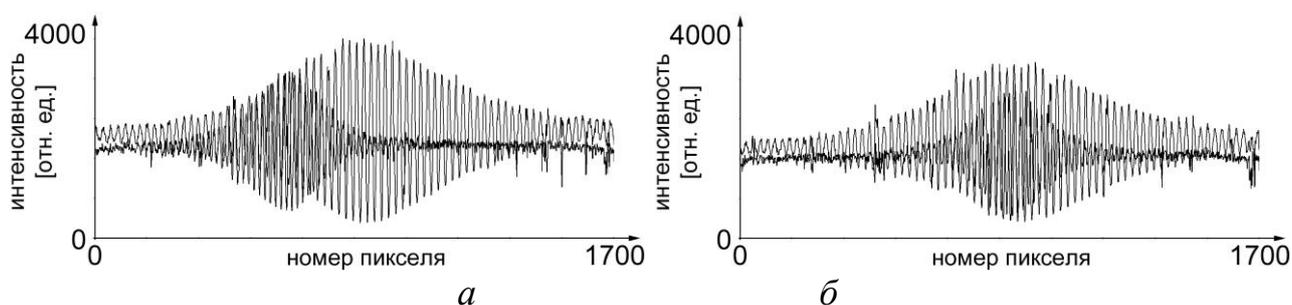


Рис. 3. Экспериментальные результаты:

а – исходное положение коррелограмм, б – скорректированное положение коррелограмм

Из рис. 3 видно, что использование компенсационной стеклянной пластинки позволило снизить разность положений максимумов коррелограмм почти на порядок – с $\sim 3,32$ мкм до $\sim 0,26$ мкм.

Заключение

Показано, что использование оптического элемента в виде плоскопараллельной пластинки определенной толщины, устанавливаемой в одно из плеч интерферометра Линника, позволяет устранить разность оптического хода при использовании двух длин волн.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании прецизионных интерференционных оптических систем с несколькими источниками частично-когерентного света.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – № 1. – С. 107.
2. Niehues J., Lehmann P., Bobey K. Dual-wavelength vertical scanning low-coherence interferometric microscope // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46. – Issue 29. – P. 7141–7148.

© Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, 2014

ПОВЫШЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ 3D РЕЛЬЕФА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Предложен способ повышения поперечного разрешения при измерении 3D нанорельефа поверхности. Для предварительной обработки интерферограмм используется пространственная спектральная фильтрация на основе алгоритмов деконволюции. Экспериментально показано улучшение поперечного разрешения более чем на 20 %.

Ключевые слова: измерение рельефа, поперечное разрешение, деконволюция.

IMPROVEMENT OF LATERAL RESOLUTION OF 3D RELIEF MEASUREMENT BY INTERFEROMETRIC METHOD

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Ph. D., tel. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior Researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

The way of lateral resolution improvement for 3D nanorelief measurement is presented. The method consists in interferogram preprocessing by spatial phase filtration algorithm based on deconvolution. The results obtained have shown the improvement of lateral resolution better than 20 %.

Key words: relief measurement, lateral resolution, deconvolution.

Методы низкокогерентной интерферометрии широко используются для измерения 3D рельефа поверхностей. Высокое разрешение по высоте достигается путем измерения фазы автокорреляционной функции интерферирующих волн в каждой измеряемой точке.

В интерферометрах продольного сдвига измерение высоты рельефа осуществляется либо путем перемещения всего интерферометра относительно измеряемой поверхности, либо изменением положения опорного зеркала интерферометра вдоль оптической оси. При этом шаг сканирования может быть зна-

чительно меньше длины волны света, используемого в интерференционных измерениях.

Современные интерференционные микроскопы позволяют измерять рельефы поверхности с разрешением по высоте менее 0,1 нм, а при использовании атомно-гладких поверхностей в качестве опорного зеркала – менее 0,03 нм [1].

Поперечное разрешение, так же как и продольное, определяется взаимовлиянием фазы рассеянных волн близлежащих точек измеряемой поверхности. Это влияние определяется инструментальной фазовой функцией оптической схемы интерферометра.

С появлением возможности оцифровки изображений и компьютерной обработки больших массивов информации появилась возможность учета влияния инструментальной функции на получаемые изображения. Это привело к существенному повышению разрешения в приложениях 2D микроскопии, фотографии, астрономии, медицины [2 – 4].

Способ учета инструментальной функции оптической системы G основан на том, что результат изображения I объекта измерения I_0 определяется как результат свертки (без учета шума в I) – конволюция:

$$I(x, y) = G(x, y) \otimes I_0(x, y).$$

Тогда восстановить I_0 можно применяя операцию обратную свертке – деконволюцию:

$$I_0(x, y) = F^{-1} \left(\frac{F(I(x, y))}{F(G(x, y))} \right),$$

где F – преобразование Фурье, F^{-1} – обратное преобразование Фурье, а деление спектров I и G выполняется поэлементно (почастотно).

Очевидно, что для того чтобы получить разрешение лучше, чем это позволяет сделать функция G , необходимо произвести ее измерение с высоким разрешением. Кроме того, поперечная дискретизация изображения объекта также должна производиться с разрешением много большим, чем поперечный размер функции G .

На практике для регистрации изображений часто используются CCD матрицы. При получении изображения для последующей цифровой обработки высокая детализация достигается тем, что оптическая проекция пикселя CCD матрицы в область наблюдения делается много меньше функции G .

При измерении рельефа поверхности интерференционными методами производится расчет фазы интерферирующих волн, рассеянных каждой точкой измеряемой поверхности. Расчет производится по регистрируемой амплитуде интенсивности I , на величину которой влияет функция G .

В данной работе предложено повышение поперечного разрешения при измерении 3D нанорельефа путем предварительной обработки набора интерферограмм с применением алгоритмов деконволюции.

В реальных регистрирующих системах к оптическим искажениям добавляется также шумовая составляющая N :

$$I(x, y) = I_0(x, y) \otimes G(x, y) + N(x, y).$$

Для снижения влияния шумов в интерферограммах производилась фильтрация спектров интерферограмм на основе фильтра Винера [5]:

$$I_1(x, y) = F^{-1} \left(\frac{F(I(x, y))}{F(G(x, y))} \frac{F(G(x, y))^2}{F(G(x, y))^2 + C} \right),$$

где I_1 является приближением I_0 , C – константа, зависящая от соотношения сигнал-шум.

Для тестирования данной методики, в качестве объекта измерения был выбран образец структуры кремния, имеющий резкий край. Измерение рельефа производилось микроскопом «МНП-1» [6], оптическая схема которого приведена на рис. 1.

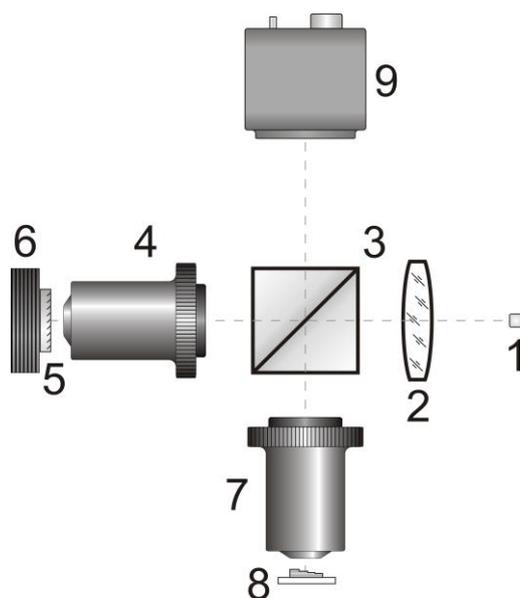


Рис. 1. Схема интерферометра:

1 – источник частично-когерентного света (светодиод), 2 – объектив осветителя, 3 – светоделитель, 4, 7 – микрообъективы с увеличением $20\times$ и числовой апертурой 0.4, 5 – опорное плоское зеркало, 6 – пьезо-керамический актуатор, 8 – объект измерения, 9 – ПЗС-камера

Эффективность применения предложенного способа оценивались по методике, описанной в работе [7], в которой поперечное разрешение измеряется по полуширине производной высоты 3D нанорельефа в поперечном направлении в области резкого края.

Приближение функции G выбиралось в виде функции Эйри, параметры которой определялись числовой апертурой оптической системы, а также длиной волны света:

$$\frac{\sin^2 r}{r^2},$$

где r определяется уравнением $r = \pi R(x, y)$, R – функция расстояния от центра, нормированная на величину D :

$$D = \frac{\lambda}{2NA},$$

где $\lambda = 630$ нм – длина волны света, $NA = 0,4$ – числовая апертура объектива 7 (см. рис. 1). Проекция пикселя в зону измерения имеет размер 300×300 нм². В результате вычислений $D = 787,5$ нм. Сечение функции G в масштабной сетке, привязанной к размеру проекции пикселя, представлено на рис. 2.

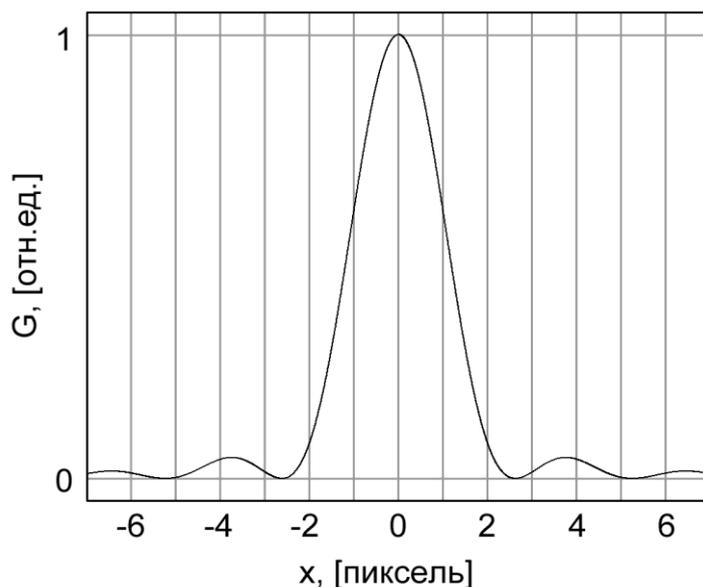


Рис. 2. Сечение функции G в поперечном направлении

Сравнение результатов измерения рельефа в области резкого края без использования и с использованием предложенного способа приведено на рис. 3.

На рис. 4 приведены графики производных высоты 3D рельефа.

Из рис. 4 видно, что применение предложенного метода позволяет улучшить поперечное разрешение более чем на 20%.

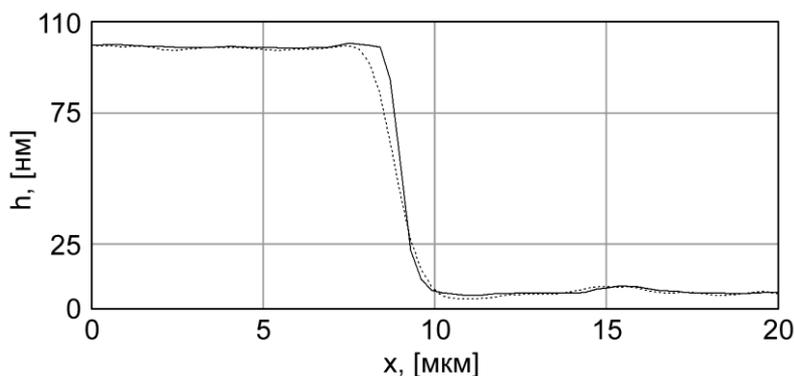


Рис. 3. Высота измеренного рельефа в области резкого края: сплошная линия – с применением деконволюции интерферограмм, пунктирная – без применения

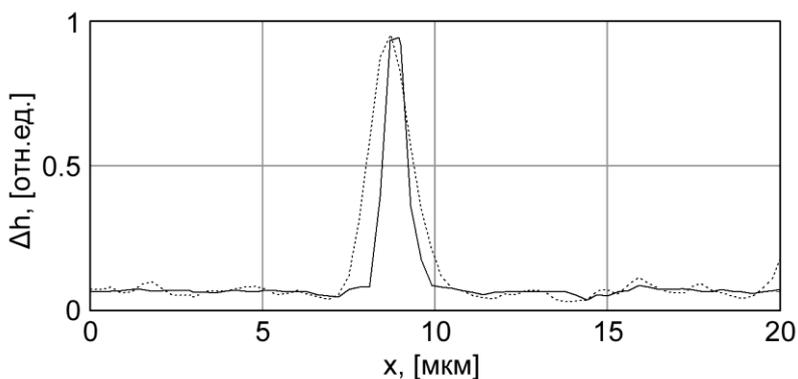


Рис. 4. Модуль производной функции высоты рельефа в области резкого края: сплошная линия – с применением деконволюции интерферограмм, пунктирная – без применения

Заключение

Показано, что применение алгоритмов деконволюции к интерферограммам позволяет преодолеть дифракционный предел поперечного разрешения при измерении 3D нанорельефа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сысов Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Латышев А. В. Использование атомно-гладкой поверхности для существенного снижения систематической погрешности измерения нанорельефа интерферометром продольного сдвига // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: тезисы докладов научно-технической конференции – М.: Логос, 2013. – С. 160–161.
2. Liviu-Teodor Chira. Resolution improvement of ultrasound images using deconvolution and super-resolution algorithms // Acta Technica Napocensis Electronics and Telecommunications. – 2011. – Number 4. – Vol. 52. – P. 7–12.

3. Li Xu, Jiaya Jia. Two-Phase Kernel Estimation for Robust Motion Deblurring // ECCV 2010. – Part I, LNCS 6311. – P. 157–170.
4. D. Srinivasa Rao, K. Selvani Deepthi, K. Moni Sushma. Deep Application of Blind Deconvolution Algorithm for Image Restoration // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – March – Vol. 3. – No 3. – P. 1878–1884.
5. Atam Prakash Dhawan, Rangaraj M. Rangayyan, Richard Gordon. Image restoration by Wiener deconvolution in limited view computed tomography // Applied Optics. – 1985, December 1. – Vol. 24. – No 23. – P. 4013–4020.
6. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 119–128.
7. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н., Моисеев Н. Н., Минаев В. Л. О латеральном разрешении интерференционного микроскопа // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 16–19.

© Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, 2014

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕРМОГРАММ

Василий Михайлович Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Любовь Васильевна Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Юрий Александрович Фесько

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кафедра наносистем и оптотехники, тел. 8913-752-92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

В работе рассматривается методика дистанционного измерения температуры сложных поверхностей с использованием поляризационных термограмм. Методика основана на анализе термограмм с азимутами поляризации 45 и 90 градусов, использовании закона Стефана-Больцмана и теории отражения Френеля. Приведены результаты экспериментальных исследований температуры сложной поверхности носовой части фюзеляжа самолета С-80, которые подтверждают справедливость предлагаемой методики.

Ключевые слова: поляризационная термограмма, азимут поляризации, собственное тепловое излучение, сложная поверхность, абсолютная температура.

METHODS AND RESULTS OF TEMPERATURE MEASURING COMPLICATED SURFACE BASED ON POLARIZATION THERMOGRAM

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Lyubov V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)352-11-59, e-mail: fantasy_2000@ngs.ru

Yuri A. Fesko

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Nanosystems and Optical Devices Department, tel. 8913-752-92-38, e-mail: y.a.fesko@gmail.com

The technique for remote temperature measurement of complicated surfaces using polarized infrared images is considered. It is based on thermogram analysis with polarization azimuth of 45

and 90 degrees, using the Stefan-Boltzmann law and the theory of Fresnel reflection. The experimental results of a complex surface temperature of the forward fuselage of aircraft S-80, which confirm the validity of the proposed method are shown.

Key words: polarization thermogram, polarization azimuth, own thermal radiation, complicated surface, absolute temperature.

Важнейшей и актуальной задачей современной науки, техники, медицины и производства является точное измерение абсолютной температуры различных объектов. В современной оптической пирометрии и тепловидении [1, 2] разработаны и исследованы ряд методов и схем для неконтактного измерения абсолютной температуры поверхности объектов, которые позволяют сократить перечень априорной информации об измеряемом объекте и снизить погрешность результатов измерения для объектов из различных конструкционных материалов. Тем не менее, для объектов с неплоскими поверхностями имеется ряд ограничивающих обстоятельств, которые определяются неоднозначностью значений сигналов, формируемых на выходе регистрирующих измерительных систем и температурой поверхности объекта.

В общем виде сигнал, регистрируемый тепловизионным измерительным прибором, равен (1):

$$U_{\Sigma} = \pi^{-1} \tau_a \tau_o S dA \cos(\psi) W^o(T) \varepsilon(\psi) = K \cdot W^o(T) \varepsilon(\psi), \quad (1)$$

где $W^o(T)$ – функция Планка для интегральной светимости АЧТ; $\varepsilon(\psi)$ – индикатриса коэффициента излучения материала поверхности объекта; K – постоянная прибора и условий наблюдения объекта; ψ – угол ориентации нормали к элементу dA поверхности объекта по отношению к наблюдателю; S – интегральная чувствительность приемника излучения тепловизора; τ_a и τ_o – коэффициенты пропускания слоя атмосферы между тепловизором и объектом и оптической системы тепловизора.

Поскольку сигнал, регистрируемый измерительной аппаратурой, зависит от температуры, индикатрисы коэффициента излучения материала, а также формы поверхности (угла ψ) объекта, то в общем виде имеется неоднозначность в определении, как формы поверхности, так и абсолютной температуры. Для определения необходимой и достаточной информации при измерении температуры исследуемого объекта нами предлагается использовать разработанные методы определения трехмерной формы объектов [3–5], которые позволяют определить вначале ориентацию элементов поверхности объекта и в последствии форму поверхности наблюдаемой поверхности и значение индикатрисы $\varepsilon(\psi)$. В предложенных методах информацию об ориентации элементов поверхности объектов получают из анализа регистрируемого их поляризованного собственного излучения прошедшего через поляризационный фильтр.

Фактически анализируются поляризационные термограммы объектов, полученные при различных линейных азимутах поляризации, а также при исполь-

зовании комбинированного фильтра, содержащего ахроматическую четверть-волновую ($\lambda/4$) пластину и ИК поляризатор [3–5].

На основе анализа двух поляризационных термограмм с азимутами 45° и 90° определяется угол ψ ориентации элементов поверхности объекта по следующей формуле:

$$\psi = \arccos \left[1 - \frac{1 - U_2}{a \cdot \cos \left\{ \arctg \left[\frac{1 - U_1}{U_2 - 1} \right] \right\}} \right], \quad (2)$$

где U_1 и U_2 – величины видеосигналов поляризационных термограмм элементов изображения; a – параметр, зависящий от материала и шероховатости поверхности объекта.

Для нахождения значения индикатрисы коэффициента излучения $\varepsilon(\psi)$ при измеренном угле ψ воспользуемся следующими соображениями.

На основе теории отражения Френеля и закона сохранения энергии величины сигналов для параллельной и перпендикулярной компонент собственного излучения можно записать в виде:

$$U_{\parallel} = K \cdot W^0(T) \varepsilon_{\parallel}(\psi);$$

$$U_{\perp} = K \cdot W^0(T) \varepsilon_{\perp}(\psi).$$

Причём, параллельная $\varepsilon_{\parallel}(\psi)$ и перпендикулярная $\varepsilon_{\perp}(\psi)$ компоненты коэффициента излучения материала в зависимости от оптических свойств материала поверхности определяются выражениями (3) и (4) [1,2]:

$$\varepsilon_{\parallel}(\psi) = \frac{4n \cos \psi}{(n \cos \psi + 1)^2 + k^2 \cos^2 \psi}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\perp}(\psi) = \frac{4n \cos \psi}{(n + \cos \psi)^2 + k^2}, \quad (4)$$

где n и k – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления материала поверхности объекта.

Из выражений (3) и (4) следует зависимость коэффициента излучения поверхности не только от материала, но и от направления ее наблюдения относительно вектора нормали поверхности. Таким образом, применение метода определения формы поверхности объекта уточняет значение коэффициента из-

лучения, который используется для определения температуры в пирометрии и тепловидении как элемент априорной информации об объекте.

Рассмотрим это более подробно. На основании закона Стефана-Больцмана для собственного теплового излучения зависимость видеосигнала интегральной по длинам волн термограммы от температуры поверхности объекта может быть представлена в виде:

$$U = K \cdot \varepsilon(\psi) \sigma T^4. \quad (5)$$

С учетом (3) и (4) индикатрису коэффициента излучения можно найти:

$$\varepsilon(\psi) = [\varepsilon_{\perp}(\psi) + \varepsilon_{\parallel}(\psi)] \eta / 2, \quad (6)$$

где η – параметр, зависящий от шероховатости поверхности объекта.

Тогда температуру поверхности можно определить следующим образом:

$$T = \sqrt[4]{U / (K \sigma \varepsilon(\psi))}. \quad (7)$$

Приведем формулу (7) к инженерному виду. Для этого, выражение (5) необходимо нормировать на постоянную величину σK :

$$U' = U / K \sigma;$$

тогда значение абсолютной температуры определяется по формуле:

$$T = \sqrt[4]{U' / \varepsilon(\psi)},$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Таким образом, на основании анализа поляризационных термограмм с азимутами $t_{\text{п}}=45^{\circ}$ и $t_{\text{п}}=90^{\circ}$, закона Стефана-Больцмана и теории Френеля, разработана методика измерения абсолютной температуры наблюдаемых сложных поверхностей. Данная методика может найти широкое применение при тепловых испытаниях поверхностей авиационной техники, а также при измерении теплозащитных свойств строительных и энергоемких объектов.

Экспериментальные исследования абсолютной температуры сложной поверхности летательных аппаратов проводились на базе ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина».

В качестве опытного объекта в эксперименте использовалась носовая часть фюзеляжа летательного аппарата С-80, фотография которого и профиль с маркерами измерения температуры приведены на рис. 1.

Среднеарифметические результаты измерения температуры по маркерам, согласно рис. 1б, оптическим пирометром Thermopoint и тепловизионной камерой InfraCam при нормальных климатических условиях (НКУ) и при температуре среды 24,4 °С приведены на рис. 2.

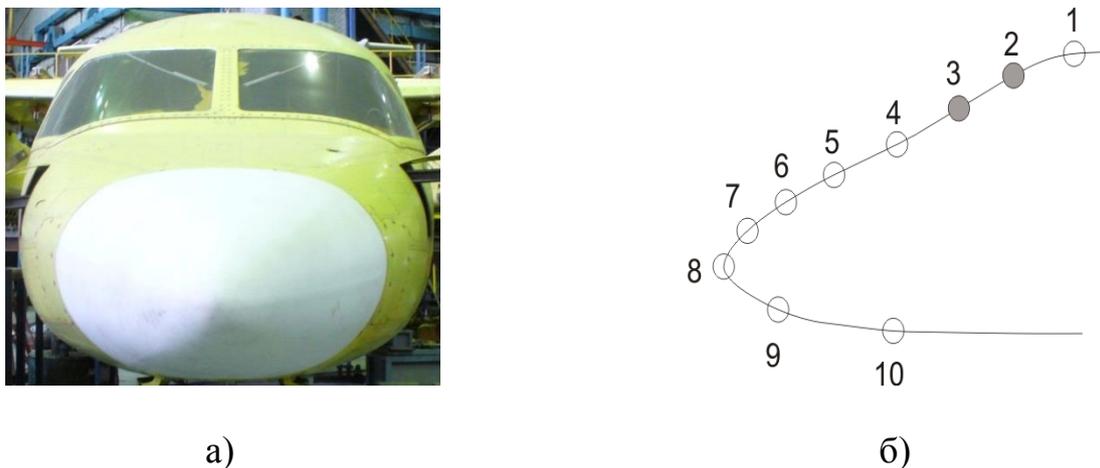


Рис. 1. Носовая часть фюзеляжа ЛА С-80
 а) фотография ЛА; б) контур профиля с маркерами

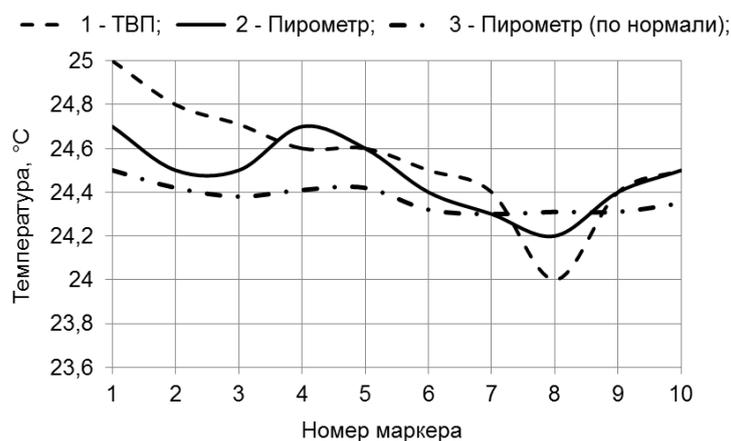


Рис. 2. Значения температуры носовой части фюзеляжа ЛА С-80

Поверхность объекта выполнена из различных по излучательным характеристикам материалов. Этим объясняется достаточно резкое изменение температурной кривой в области от маркера 1 до маркера 10. При этом следует отметить участок 6-10, который выполнен из стеклопластика и имеет выпуклую форму с изменяющимся углом ψ между нормалью и направлением измерения, поэтому здесь выражена характерная зависимость изменения температуры от ориентации излучающей площадки. Угловая индикатриса коэффициента излучения материала (маркеры 6-10, рис. 2) приведена на рис. 3а.

На основе описанной методики измерения температуры с учетом формы поверхности выполнены эксперименты, конечные результаты которых приведены на рис. 3б.

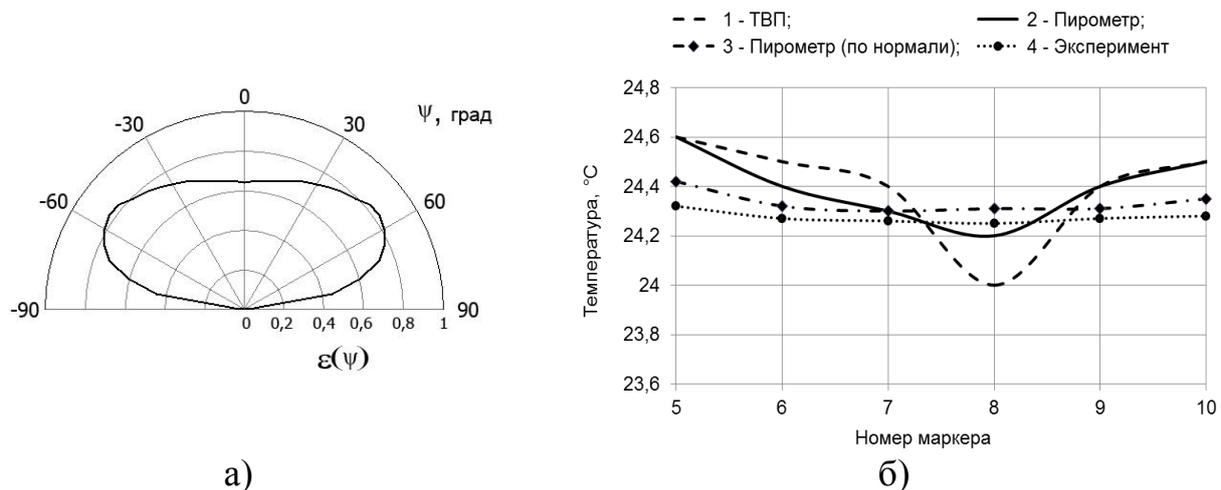


Рис. 3. Индикатриса коэффициента излучения и результаты измерения температуры сложной поверхности ЛА С-80

В целом, на рис. 3б приведены следующие данные температуры поверхности объекта: 1 – результаты измерения тепловизионной камерой (ТВП) без учета ориентации элементов поверхности; 2 – результаты измерения температуры пирометром при наблюдении элементов поверхности ЛА с позиции наблюдения ТВП (кривая 2); 3 – результаты измерения температуры пирометром при наблюдении элементов поверхности по их нормали; 3 – результаты измерения температуры по предлагаемой методике на основе поляризационных термограмм. При этом полученные поляризационные тепловизионные изображения объекта приведены на рис. 4.

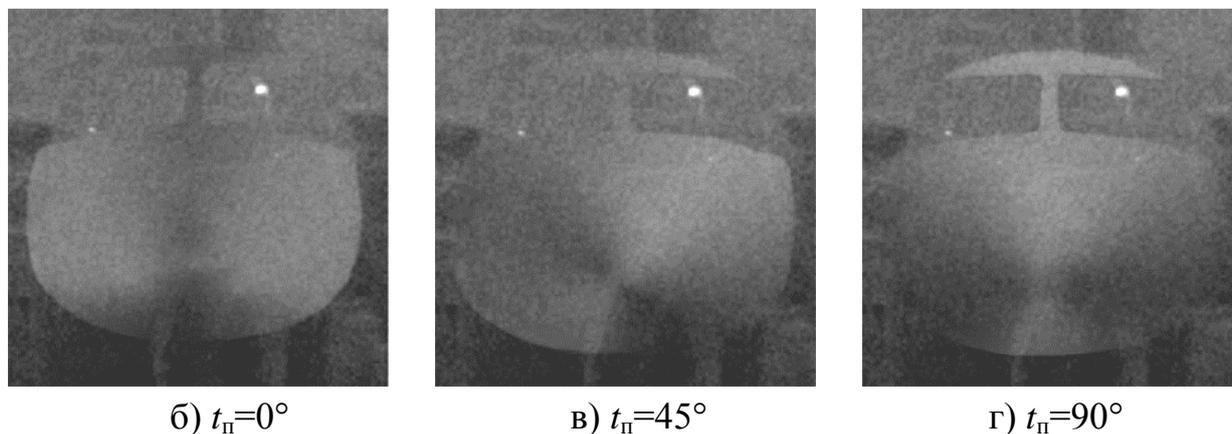


Рис. 4. Поляризационные тепловые изображения самолета С-80

Кроме того, следует отметить, что пирометр «Thermopoint» был откалиброван по излучению эталонного источника, который входил в комплект контрольно-юстировочной аппаратуры к тепловизору «Радуга-ЭВМ» («Азовский оптико-механический завод», Россия).

Анализ измерений и данных графиков (рис. 2 и 3б) подтверждает различие значений температуры поверхности от угла наблюдения относительно её вектора нормали, а также возможность определения температуры сложных поверхностей на основе предложенной методики с использованием поляризационных термограмм. Измерение температуры с использованием предложенной методики позволяет сократить перечень априорной информации об измеряемом объекте и снизить погрешность результатов измерения как для объектов из различных конструкционных материалов, так и для объектов с неплоскими поверхностями, имеющих ряд ограничивающих обстоятельств, которые определяются неоднозначностью значений сигналов, формируемых на выходе регистрирующих измерительных систем и температурой поверхности объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д. Я. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
2. Снопко, В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности [Текст] / В.Н. Снопко. – Минск : Наука и техника, 1988. – 152 с.
3. Пат. 2410654 РФ, МПК G01J 5/52. Способ измерения температуры [Текст] / В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Ю. А. Фесько, Д. С. Шелковой.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – № 2009134008/28; опубл. 27.01.2011; Бюл. № 3. – 6 с.
4. Пат. 2431936 РФ, МПК H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / Тымкул В.М., Фесько Ю.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – 2010129703/09; заявл. 15.07.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. – 8 с.
5. Пат. 2141735 РФ, МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов / В.М. Тымкул, О.В. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – №95111870; заяв 11.02.95; опубл. 20.11.99, Бюл. № 32. – 4 с.

© В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Ю. А. Фесько, 2014

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВЕ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Михаил Владимирович Киселев

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, кандидат технических наук, директор, тел./факс (383)225-68-40, тел. (383)225-87-46

Владимир Васильевич Золотцев

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник научно-исследовательского отделения, тел. (383)225-87-46, e-mail: z_w_w@mail.ru

Александр Александрович Козлов

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник конструкторско-технологического отдела, тел. (383)216-09-64

Денис Сергеевич Шелковой

Филиал ОАО «ПО УОМЗ» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, кандидат технических наук, ведущий инженер, тел. (383)216-08-57, e-mail: shelden@ngs.ru

Разработан малогабаритный тепловизионный модуль на основе неохлаждаемого микроболометрического ФПУ со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм. Вывод видеоизображения производится в аналоговом и цифровом виде. Конструкция модуля предусматривает использование в жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: тепловидение, тепловизор, микроболометр.

COMPACT THERMAL IMAGING MODULE BASED ON MICROBOLMETER PHOTODETECTOR

Michael V. Kiselev

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Director, Ph. D., tel/fax (383)225-68-40

Vladimir V. Zolotcev

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Chief of Research and Development Division, tel. (383)225-87-46, e-mail: z_w_w@mail.ru

Alexander A. Kozlov

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Chief of Design and Technology Department, tel. (383)216-09-64

Denis S. Shelkovoy

Branch «Production Association «Urals Optical & Mechanical Plant» «Ural-SibNIIOS», 630049, Russia, Novosibirsk, 179/2 D. Kovalchuk St., Leading Engineer, Ph. D., tel. (383)216-08-57, e-mail: shelden@ngs.ru

A compact thermal module based on microbolometer FPA is developed. Output video is produced in both analog and digital. Module design provides using in severe environment operation.

Key words: thermography, thermal camera, microbolometer FPA.

Открытое акционерное общество АО «ПО «Уральский оптико-механический завод» (ОАО «ПО «УОМЗ»») является разработчиком и поставщиком оптико-электронной аппаратуры ведущих российских производителей авиационной техники, таких как обзорно-пилотажные, обнаружительные круглосуточные оптико-электронные системы турельные (ТОЭС) и гиростабилизированные (ГОЭС) [1]. В состав данных систем входят тепловизионные каналы с охлаждаемыми фотоприемными устройствами (ФПУ).

В последние годы всё большее распространение в системах тепловидения находят неохлаждаемые микроболометрические матричные фотоприёмные устройства (ФПУ). Микроболометрические ФПУ не требуют криогенной системы охлаждения, и, следовательно, тепловизионный прибор имеет меньшие энергопотребление, габариты и массу. Производство микроболометрических ФПУ на основе оксида ванадия или на кремниевой основе значительно дешевле, чем охлаждаемых ФПУ [2]. Разработка малогабаритных тепловизионных модулей на основе современных неохлаждаемых микроболометрических ФПУ и их применение в ТОЭС и ГОЭС позволит улучшить массогабаритные показатели всей системы в целом.

В Филиале ОАО «ПО «УОМЗ»» «Урал-СибНИИОС» разработан малогабаритный тепловизионный модуль на основе неохлаждаемого микроболометрического ФПУ фирмы ULIS (Франция). Формат устанавливаемого ФПУ может быть 384×288 или 640×480 пикселей.

Конструкция тепловизионного модуля позволяет легко интегрировать его в состав различных комплексов оптико-электронных систем для OEM-производителей комплектного оборудования. Также данный модуль может использоваться автономно, например, для охранных систем, в БПЛА для обнаружения очагов лесных и подземных пожаров, при проведении технического мониторинга нефтегазовых трубопроводов и ЛЭП.

Внешний вид образца тепловизионного модуля показан на рисунке, а основные параметры и характеристики приведены в таблице.

Тепловизионный модуль может быть укомплектован как атермализованным объективом производства ОАО «ПО «УОМЗ»», так и различными объективами других производителей.

Применение оригинального программно-математического обеспечения и современных высокопроизводительных электронных компонентов, основными из которых являются программируемая логическая интегральная схема и цифровой сигнальный процессор, позволило сократить время выхода на рабочий режим модуля до одной секунды, при этом потребляемая мощность не превышает 2 Вт.



Рис. Внешний вид тепловизионного модуля на испытательном кронштейне с установленным атермализованным объективом с углом поля зрения $15 \times 20^\circ$

Таблица

Основные параметры и характеристики тепловизионного модуля

Наименование параметра	Вариант модуля с ФПУ формата 384×288	Вариант модуля с ФПУ формата 640×480
Спектральный диапазон, мкм	от 8 до 14	
Размер пикселя, мкм	25	17
NETD (F/1, 300 К, 30...50 Гц), мК	менее 100	менее 75
Время выхода на рабочий режим (до получения изображения), не более, с	1	1
Вывод видеоизображения	аналоговый по ГОСТ 7845-92 и цифровой DVI	
Цифровое увеличение, крат	×4	×2
Внешнее управление	RS-232 и RS-422	
Напряжение питания, В	12 ± 5	
Потребляемая мощность, Вт, не более	1,8	2,0
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 40 до плюс 60	
Габаритные размеры, мм (без объектива)	57×57×67	
Масса, кг, не более	0,27	

Корпус модуля выполнен из алюминиевого сплава, на задней стенке корпуса расположены соединители: для подачи электропитания, выходы видеоизображения в цифровом стандарте DVI и в аналоговом виде по ГОСТ 7845-92, управление по протоколу RS-232 и RS-422. Предусмотрена возможность обработки видеосигнала и работа с автоматами захвата и сопровождения цели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каталог специальной продукции УОМЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uomz.ru/download/Katalog_spec_RUS_ENG_web.pdf
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3 (85). – С. 1–13.

© М. В. Киселев, В. В. Золотцев, А. А. Козлов, Д. С. Шелковой, 2014

КОНСТРУКЦИЯ МИНИАТЮРНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ОБЪЕКТИВА-МОНОБЛОКА С ЖИДКИМИ ЛИНЗАМИ

Андрей Вячеславович Голицын

Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, тел. (383)333-17-01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Игорь Олегович Михайлов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: mio@sibmail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Обсуждаются некоторые особенности оптимального конструирования миниатюрных оптических систем на основе жидких (жидкостных) линз с изменяемым фокусным расстоянием.

Ключевые слова: жидкая линза, конструкция, оптическая система, переменное фокусное расстояние, радиус кривизны.

THE DESIGN OF THE MINIATURE LENSES-MONOBLOCK BASED ON OF LIQUID LENSES

Andrey V. Golitsyn

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics», 630090, Russia, Novosibirsk, 2/1 Lavrentiev avenue, tel. (383)333-17-01, e-mail: golitsyn@oesd.ru

Igor O. Mikhailov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, Russia, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)344-29-29, e-mail: mio@sibmail.ru

Viktor B. Shlishevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Some peculiarities of the optimal design of miniature optical systems based on liquid lenses with variable focal length have been discussed in this paper.

Key words: liquid lens, construction, optical system, variable focal length, radius of curve.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной оптотехники является разработка и создание оптических систем на основе жидкостных оптических элементов, которые при определенных условиях позволяют в значительных пределах изменять радиусы кривизны своих преломляющих поверхностей, а вместе с ними – и свое фокусное расстояние [1].

Уже отдельно взятая капля жидкости сама по себе образует криволинейную поверхность и, следовательно, может быть использована в качестве линзы. Ее форма определяется величиной поверхностного натяжения и свойствами подложки, на которую она помещается.

Для управления поверхностным натяжением существует несколько методов, но наибольший интерес проявляется к эффекту электросмачивания из-за высокой скорости реакции и низкого энергопотребления. Электросмачивание (electrowetting) – это технология, позволяющая контролировать и регулировать поверхностное натяжение в капле жидкости с помощью электрических потенциалов [2]. За счет изменения внешнего электрического поля между жидкостью и основанием, на котором она находится, изменяется смачиваемость основания, что приводит к изменению радиуса кривизны капли и ее фокусного расстояния.

Однако жидкостную (жидкую) линзу (ЖЛ) в виде отдельной капли не так легко получить строго заданного размера и еще сложнее надежно зафиксировать ее форму. Кроме того, на открытом воздухе она будет постепенно испаряться и, следовательно, менять свои характеристики.

На рис. 1 показан конструктивный вариант ЖЛ, заключенной в герметичную камеру [3]. Здесь роль линзы играет объем специальной токонепроводящей жидкости (например, масла), граничащей с несмешиваемой токопроводящей жидкостью (например, водой) вместо воздуха, что снимает проблему испарения. Поверхностное натяжение между обеими жидкостями задается и контролируется посредством специальных электропроводящих контактов.

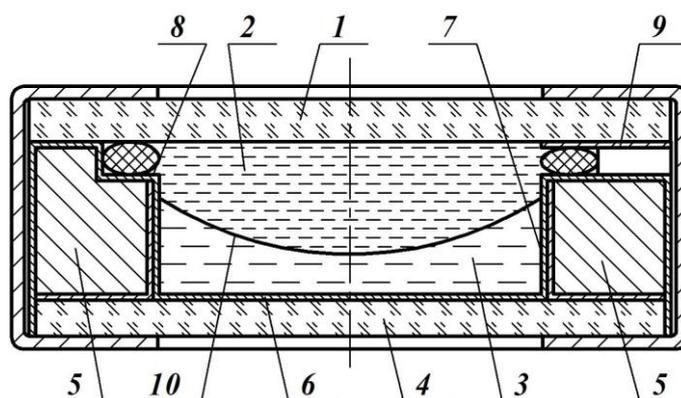


Рис. 1. ЖЛ в герметичной камере:

1, 4 – защитные стекла; 2 – токопроводящая жидкость; 3 – токонепроводящая жидкость; 5 – корпус; 6 – изолирующий слой; 7 – токопроводящий слой; 8 – изоляторы; 9 – электроконтакты; 10 – управляемая преломляющая поверхность ЖЛ

Подобная конструкция представляет собой автономный жидколинзовый модуль (ЖЛМ), по оптическим свойствам фактически эквивалентный двухлинзовой склейке с регулируемым радиусом кривизны общей поверхности. Функции защитных стекол могут также выполнять твердотельные линзы различной формы из разных материалов, и тогда система усложняется.

Нашей задачей являлась разработка компактной и жесткой конструкции миниобъектива с ЖЛ.

Так как перефокусировка оптических систем с ЖЛ осуществляется без линейного перемещения оптических компонентов, а размеры ЖЛ достаточно малы, то наиболее перспективной для них выглядит сборка типа «моноблок», с элементами, ориентированными относительно друг друга с необходимой степенью точности и жестко соединенными между собой клеем.

Анализ типовых компоновок линзовых оптических систем и особенностей их юстировки, позволил предложить принцип конструирования миниатюрных оптических систем на базе ЖЛМ, который поясняется на рис. 2 на примере простейшего двухкомпонентного оптического блока, состоящего из предварительно отрегулированного ЖЛМ и отдельной твердотельной линзы.

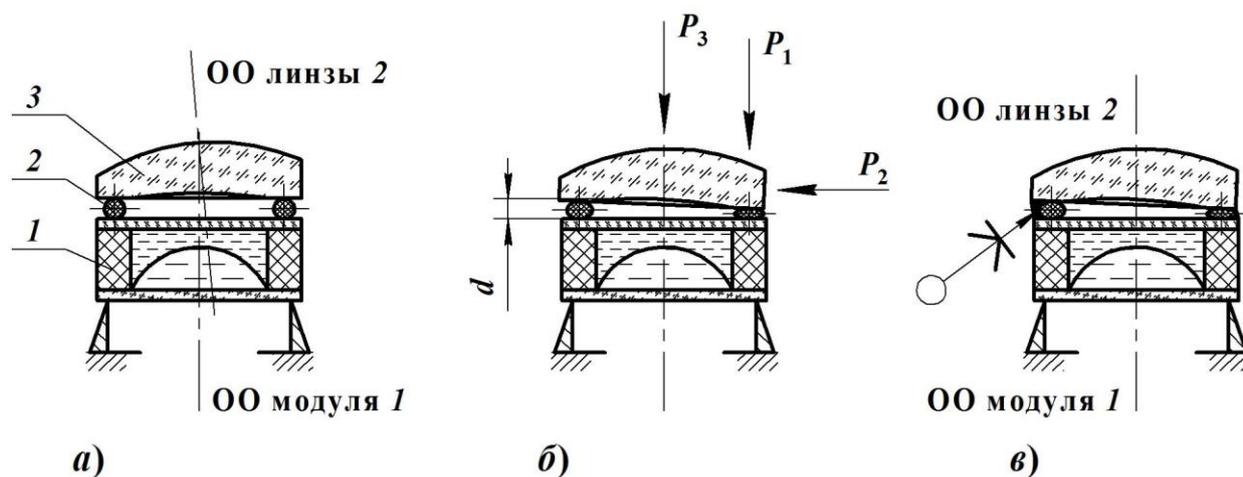


Рис. 2. Принцип сборки и юстировки двухкомпонентного оптического блока:

1 – ЖЛМ; 2 – эластичное кольцо (резиновое или силиконовое); 3 – твердотельная линза;

P_1 – P_3 – прилагаемые силы, обеспечивающие необходимые юстировочные подвижки

Для получения качественного изображения при юстировке используется не только поперечное перемещение линз, но и их наклон с одновременной регулировкой воздушного промежутка между оптическими компонентами.

В начальном положении (рис. 2, а) все элементы – ЖЛМ, эластичное кольцо сечения, согласованного с заданным воздушным промежутком между оптическими компонентами, и линза – устанавливаются последовательно и свободно, причем, как видно, оптические оси ОО компонентов 1 и 3 не совпадают, т. е. система не центрирована. В процессе юстировки системы (рис. 2, б) ис-

пользуются упругие свойства эластичного кольца: наклон выполняется приложением силы P_1 , с помощью силы P_2 осуществляется центрирование оптических компонентов, силой P_3 регулируется воздушный промежуток между ними. Центрирование и наклон контролируются каким-либо известным оптическим методом, а величина воздушного промежутка d – при помощи индикатора часового типа. Достигнутое положение деталей фиксируется клеем, залитым в зазор по контуру (рис. 2, в). Полученный монолитный оптический блок вклеивается в специальную стеклянную оправу, дополнительно усиливающую конструкцию, а та, в свою очередь, помещается в защитный пластиковый корпус, позволяющий закрепить весь узел на монтажной основе.

Когда расстояние d между компонентами 1 и 3 превышает допустимую толщину (диаметр сечения) кольца 2, между ним и ЖЛМ может быть установлено дополнительное жесткое пластиковое или стеклянное кольцо требуемого размера; сущность и последовательность регулировок, а также общее конструктивное исполнение, от этого не изменяются. Вариант такого рода конструкции сложной комбинированной оптической системы с ЖЛ показан на рис. 3.

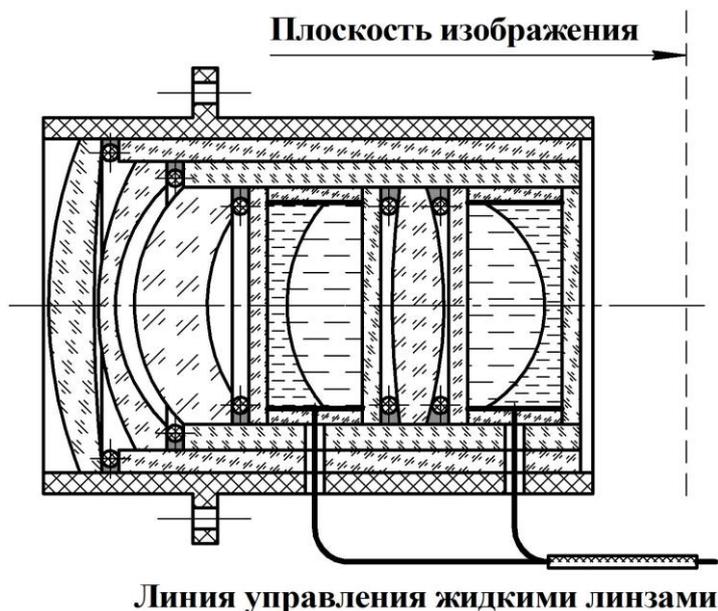


Рис. 3. Вариант конструкции сложной комбинированной оптической системы с ЖЛ

Заключение

Собираемые по предлагаемой методике конструкции оптических систем должны обеспечить высокую стабильность оптических параметров, поскольку все их элементы закрепляются жестко и изготавливаются из материалов (жидкостей, стекла, пластика) с близкими по значениям температурными коэффициентами линейного расширения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, В. С. Ефремов, И. О. Михайлов, Н. В. Оревкова, Б. В. Федоров, В. Б. Шлишевский // 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. 1. – С. 7–11.

2. Chioua P. Y., Moonb H., Toshiyoshic H., Kimb C.–J., Wua M. C. Light actuation of liquid by optoelectrowetting // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – V. 104 (3). – P. 222–228.

3. Pat. 8238033 US. Liquid Lens Device and Manufacturing Method Therefor / Y. Takai, T. Yoshida, M. Shimase, H. Ishiguro. Publication Date: 08.07.2012.

© А. В. Голицын, И. О. Михайлов, В. Б. Шлишевский, 2014

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптотехники, e-mail: gricew@mail.ru

Полина Александровна Звягинцева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. +7923-135-79-78, e-mail: polina11-03@mail.ru

Рассматриваются вопросы уменьшения погрешности измерения координат точечных объектов с учетом искажений, вносимых оптической системой матричного фотоэлектронного координатора.

Ключевые слова: матричный фотоприемник, погрешность измерения, оптимальное согласование, функция рассеяния точки.

DEVELOPMENT OF METHOD OF VIRTUAL TESTING OF OPTOELECTRONIC POSITION MEASURING SYSTEM

Evgenij V. Grickevich

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Cand.Tech.Sci., ass prof, department of nanosystems and optotechnic SSGA, e-mail: gricew@mail.ru

Polina A. Zviagintseva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., post-graduate student, department of nanosystems and optotechnic SSGA, e-mail: polina11-03@mail.ru

The issues to reduce the error of measuring the coordinates of point objects considering the distortions introduced by the optical system of the photoelectron matrix coordinator.

Key words: matrix detector, measurement error, the optimal alignment, point spread function.

Использование матричных фотоприемников в современных дистанционных измерительных системах позволяет решать задачи определения координат объектов с погрешностью меньшей, чем структурная погрешность, определяемая каждым из элементов оптико-электронного тракта. К числу таких структурных погрешностей можно отнести: диаметр функции рассеяния точки объектива, шаг расположения элементов фотоприемной матрицы и т. п. [1, 2]. Разработанная ранее компьютерная модель позволяет решать задачи оптимального согласования параметров объектива и ФПМ, обеспечивающего максимальную точность измерения координат точечного светящегося объекта [3]. В основу применяемого метода положена известная методика определения энергетиче-

ского центра изображения объекта [4], прообразом которой является способ определения центра масс системы материальных точек [5].

Интерполяционный алгоритм определения энергетического центра распределения освещенности $E(x, y)$ в плоскости анализа изображения упрощенно поясняется с помощью рис. 2. На этом рисунке показано примерное распределение освещенности вдоль оси X , создаваемое оптической системой от точечного источника. Кружок рассеяния точки, создаваемый объективом, считается гауссовым и определяется радиусом, при котором внутри кружка сосредоточено заданное количество всей световой энергии, падающей на фотоприемник. Величина темнового заряда, накапливаемого в каждом элементе, задается в долях от максимального заряда, определяемого объемом потенциальной ямы. Шумы считаются «белыми». Их величина задается в долях от суммарного (сигнального и темнового) заряда, накопленного в отдельной ячейке.

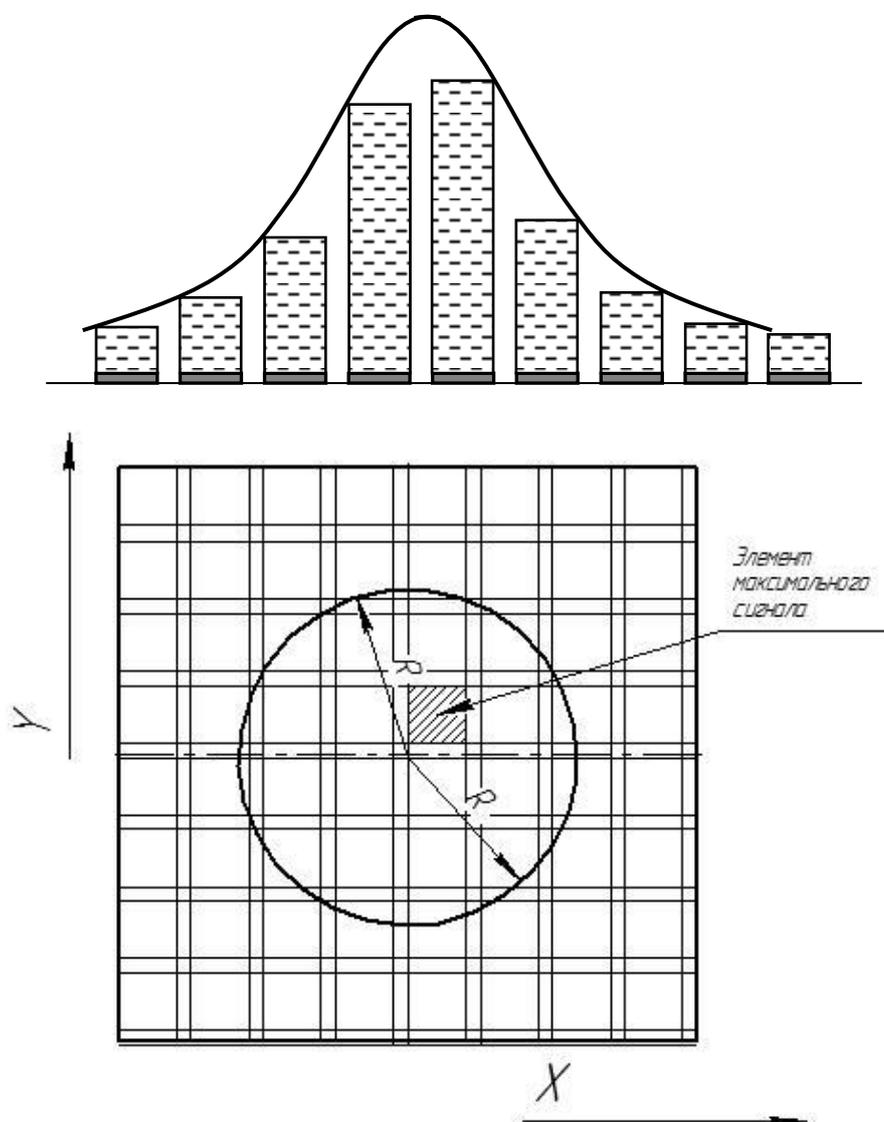


Рис. 1. Распределение освещенности на фоточувствительной площадке фотоприемника и формирование зарядового рельефа

Сначала в матрице отсчетов определяется максимальный элемент. Относительно него выделяются соответствующие строка и столбец матрицы, внутри которых производится обработка зарядовых пакетов. Таким образом, определяются декартовы координаты центра кружка рассеяния в плоскости ФПМ.

Пусть оптическая система приближена к идеальной, т. е. точка в пространстве предметов отображается квазиточкой в пространстве изображений. На рис. 2 показаны два положения квазиточки внутри элементарной светочувствительной площадки ФПМ.

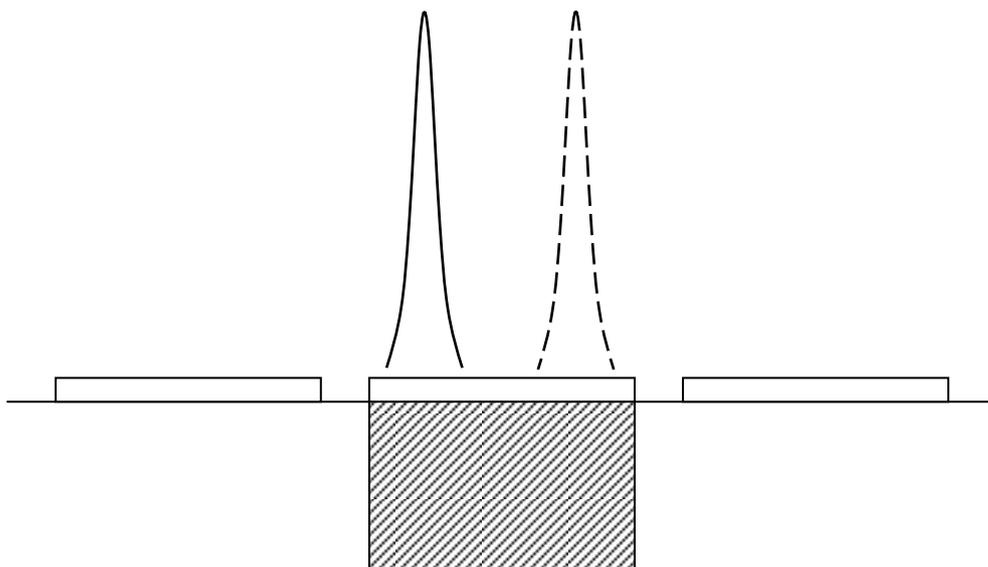


Рис. 2. Положение кружков рассеяния для квазиидеальной оптической системы

Точное положение центра квазиточки определить невозможно, так как на смежные элементы не поступает оптического сигнала. Перемещение точки вдоль элемента не приводит к возникновению дисбаланса зарядовых пакетов в соседних элементах. Именно дисбаланс является обязательным условием нахождения центра пятна рассеяния внутри того элемента, в котором сосредоточен максимальный заряд. В этой ситуации расчетный центр пятна рассеяния будет совпадать с координатой центра элемента, в котором сосредоточено пятно. Если же пятно малого радиуса попадет в зазор между элементами, то объект вообще будет потерян.

Ситуацию можно улучшить, если увеличить размеры пятна рассеяния. Тогда обрабатываемый массив значений зарядовых пакетов будет включать в себя сигналы с соседних элементов, и по дисбалансу между ними можно более точно рассчитать положение центра пятна внутри элемента.

Дальнейшее увеличение радиуса ограничивается шумами системы, например, для случая, представленного на рис. 3. Разница между соседними сигнальными зарядовыми пакетами станет неразличимой из-за шумов. Определить центр пятна в этой ситуации невозможно.

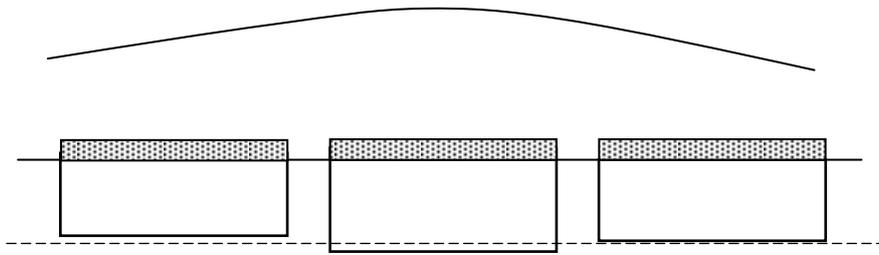
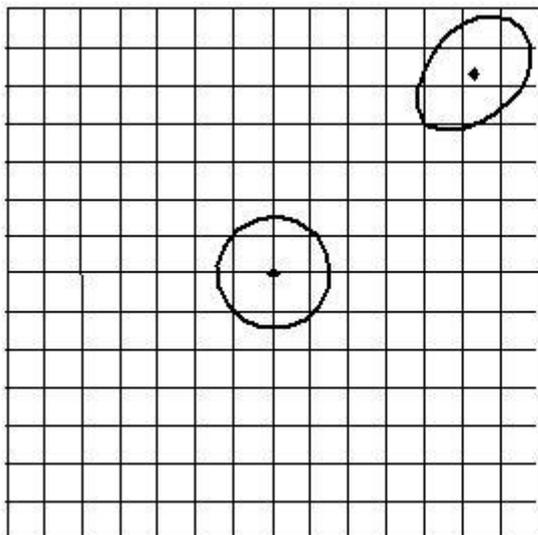


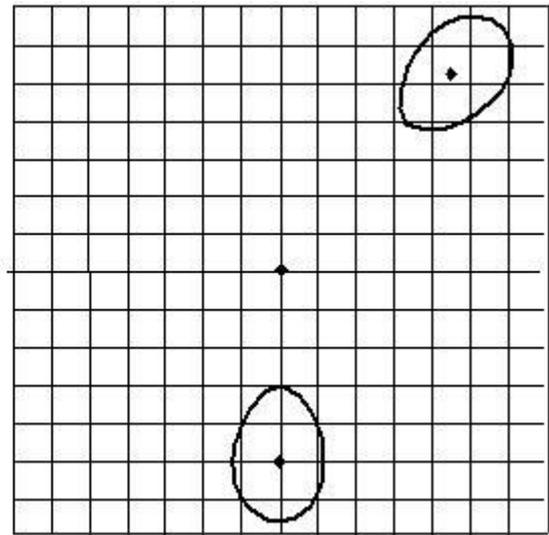
Рис. 3. Формирование зарядового рельефа при большом радиусе пятна рассеяния

Таким образом, существует некий оптимальный размер радиуса кружка рассеяния приемного объектива при заданных параметрах матрицы, который и даст наилучший с точки зрения минимизации погрешности измерения результат.

Очевидно, что в реальных оптических системах приходится учитывать не только сферическую aberrацию в центре поля зрения, но и деформацию пятна (кому) на краю поля зрения. На рис. 4 показаны изображения двух светящихся точечных объектов в плоскости фотоприемной матрицы, для которых необходимо определить координаты.



а) центр и край поля



б) оба пятна на краю поля

Рис. 4. Деформации пятна рассеяния точки на краю поля зрения

Очевидно, что наличие комы приведет к увеличению погрешности измерения, но при этом, зная форму пятна рассеяния в центре и по полю, можно внести соответствующие коррективы в алгоритм определения центров координат обоих пятен.

Таким образом, последовательность компьютерного моделирования подобного рода систем будет включать в себя следующие шаги:

- разыгрывание очередной случайной ситуации распределения зарядовых пакетов матрицы;
- определение локальных максимумов распределения зарядовых пакетов;
- расчет точных энергетических центров абберационных фигур;
- корректировка рассчитанных центров с учетом абберационных характеристик объектива.

В ходе реализации этой методики возникает задача оптимального выбора количества элементов матрицы, применяемых при обработке каждого локального максимума, в зависимости от величины, ориентации и эксцентриситета пятна рассеяния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А. Компьютерная модель оптико-электронного измерителя координат точек на местности // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5, ч. 1. – С. 70–73.
2. Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А. Согласование оптической системы с фотоприемником в измерительных приборах // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 74–80.
3. Грицкевич Е. В., Звягинцева П. А. ISCOL (программа для ЭВМ) Св-во о гос. рег. прогн. для ЭВМ №2011610964 от 26.01.2011.
4. Казанцев Г. Д., Курячий М. И., Пустынский И. Н. Измерительное телевидение. – М.: Высш. шк., 1994. – 288 с.
5. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика : учебник для техн. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 423 с.

© Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева, 2014

ФОРМИРОВАНИЕ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ НА КРЕМНИИ *n*-ТИПА МЕТОДОМ LCVD

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ведущий инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Барьер Шоттки формируется на поверхности кремниевой подложки *n*-типа импульсным LCVD из паров металлоорганического соединения. Приведены характеристики экспериментальных образцов диодов. Обсуждаются вопросы применения лазерно-пиролитических методов при создании структур детекторов излучений терагерцового диапазона спектра.

Ключевые слова: барьер Шоттки, импульсный LCVD, металлоорганическое соединение, детектор излучения, терагерцовый диапазон спектра.

THE CREATION OF SCHOTTKY BARRIER ON *n*-Si BY LCVD METHOD

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Physics department, tel. (383) 361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Valery A. Reichert

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Engineer of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Dmitry M. Nikulin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

The Schottky barrier are forming on surface of n-Si substrate by pulsed LCVD from metal-organic compound vapor. The properties of diode's operative embodiments are showed. The questions of using laser-pyrolytic methods for creation of terahertz spectral range radiation detector's structures are discussed.

Key words: Schottky barrier, pulsed LCVD, metal-organic compound, radiation detector, terahertz spectral range.

Приёмники излучений субмиллиметрового и дальнего ИК излучения на основе диодов на барьере Шоттки относятся к одним из перспективных благодаря своей высокой критической частоте. Созданы и широко применяются детекторы излучений миллиметрового диапазона электромагнитных колебаний, разработаны основы теории диодов Шоттки и технологии изготовления детекторов на их основе [1]. В работе [2] представлены результаты разработки терагерцового матричного формирователя видеосигналов, использующего диоды Шоттки и работающего на частоте 0,86 ТГц. При изготовлении матрицы применена КМОП-технология с 0,13 мкм топологической нормой. Приёмник содержит один пиксель, для получения картинка необходимо сканирование. Детектирующим элементом формирователя видеосигналов является диод Шоттки, соединённый с внутривидеопиксельной антенной.

Имеется патентная информация по детекторам Шоттки для терагерцового диапазона спектра [3,4,5].

Традиционно используемые методы получения переходов «металл – полупроводник» [1] являются многоступенными, включают этапы подготовки поверхности полупроводника к нанесению плёнок путём её отмытки и обработки в вакууме, например, ионной очисткой, нанесение плёнок напылением в вакууме, литографические процессы для получения топологических структур необходимой конфигурации.

Представленная в настоящем сообщении методика формирования барьеров Шоттки путём нанесения тонкой плёнки материала металлического электрода диода на поверхность полупроводника основывается на технологии лазерно-пиrolитического осаждения металлов на поверхность подложки из парогазовой фазы (LCVD) [6].

Особенностью выпрямляющих контактов «металл – полупроводник», отличающих их от *p-n*-переходов, является отсутствие инжекции неосновных носителей в полупроводник при прямых напряжениях.

Таким образом, в диоде Шоттки отсутствуют накопление неосновных носителей заряда в областях диода при прямом напряжении и рассасывание этого заряда при изменении знака напряжения. Это улучшает быстродействие диода, т. е. частотные и импульсные свойства. В целом вольт-амперная характеристика контакта с барьером Шоттки в широких пределах изменения тока соответствует характеристике типа

$$I = I_0 \left[\exp(eU / akT) - 1 \right],$$

где a – коэффициент «неидеальности» перехода, U – напряжение на диоде, k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура диода.

При обратном смещении ток через контакт обычно увеличивается с ростом напряжения.

Во многих случаях контакты получают напылением в вакуумных установках [1]. Перед напылением поверхность полупроводника часто подвергают травлению, и тогда на ней неизбежно остаётся тонкий окисный слой толщиной (1-2) нм; коэффициент неидеальности может быть существенно больше единицы. При изготовлении диодов с помощью высокочастотного ионного распыления (очистка кремния перед нанесением металла) их характеристики оказываются почти идеальными.

В ряде случаев используют химическое и электролитическое нанесение металла, также с получением высокой степени идеальности.

Важным элементом технологии является тепловая обработка изготовленных переходов. Рекомендуются во избежание нарушения границы «полупроводник – металл» не производить нагревание выше температуры образования эвтектики сплавов металл полупроводник. Опасна миграция атомов полупроводника в металл, которая может происходить при температурах существенно ниже эвтектических.

Большинство металлов, включая все переходные, образуют силициды при образовании переходов «металл – кремний» и нагревании. Эти соединения могут образовываться в твёрдой фазе при термодинамических температурах в интервале приблизительно от одной трети до половины температуры плавления данного металла. Благодаря металлической проводимости силицидов контакт с ними полупроводника ведёт себя подобно контакту «металл – полупроводник». Поверхность раздела «силицид – полупроводник» формируется на некотором удалении от поверхности металла, она не содержит поверхностных загрязнений и очень стабильна, контакты обычно имеют высокую степень идеальности.

В качестве контактных металлов при образовании переходов с кремнием использовались алюминий, золото, платина, вольфрам, никель, родий, гафний, и др.

Исследуемый импульсный наносекундный метод LCVD получения барьеров Шоттки является одноступенным. Металл осаждается на подложку локально в пределах пятна лазерного излучения, при этом поверхность подложки на переднем фронте лазерного импульса за счёт теплового воздействия излучения

в течение долей наносекунды термически отжигается и очищается от легколетучих загрязнений и примесей [6], затем в ходе того же импульса происходит лазерно-пиролитический процесс осаждения атомов металла на поверхность; облучение импульсно-периодическое, и на следующих импульсах процессы повторяются. Предполагается, что такое сочетание в одном цикле технологии операций очистки поверхности и нанесения на поверхность материала электрода может обеспечить повышенную степень химической чистоты перехода металл-полупроводник и высокие электрофизические параметры перехода.

В основе разработанной методики лежит использование технологической лазерной установки [6]; в качестве материала диодного электрода используется переходный металл – рений. Процесс лазерного осаждения проводится в вакуумной камере при давлении паров декакарбонила дирения порядка (1–10) Па (температура вакуумной камеры (50–80) °С). Схема камеры показана на рис. 1, а, где: 1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – порошок карбонила, 4 – прозрачное окно ввода излучения, 5 – объектив лазерной установки, 6 – штуцер вакуумной откачки камеры, 7 – уплотнительное кольцо.

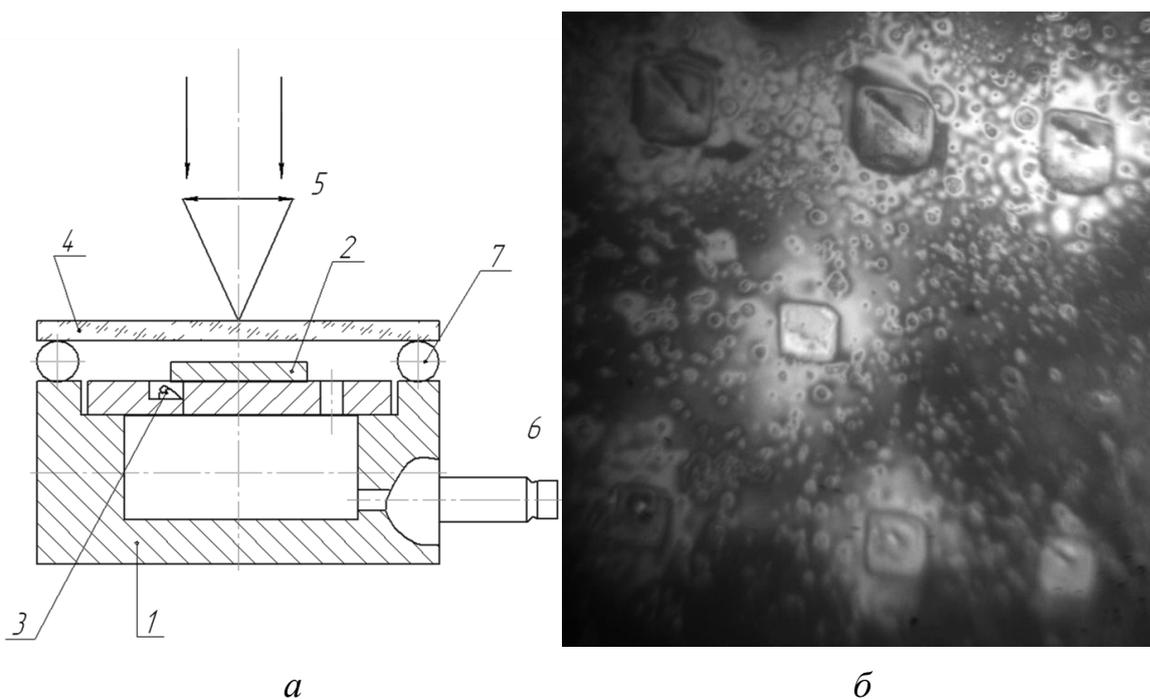


Рис. 1. Формирование электродов диодов Шоттки методом LCVD:

а – конструктивная схема реакционной камеры; б – микрофотография участка кремниевой подложки с нанесённым островком плёнки рения

Подложкой является пластинка, вырезанная из монокристаллического кремния марки КЭФ–0,3; пиролитическое осаждение производится после откачки камеры форвакуумным насосом до остаточного давления порядка 1 Па и нагревания камеры внешним электрическим нагревателем до необходимой

температуры. Излучателем является азотный лазер с длиной волны излучения $\lambda_0 = 337$ нм, длительностью импульса 6 нс, частотой импульсов 1000 Гц, мощностью в импульсе до 10 кВт.

Используется объектив с фокусным расстоянием 16 мм. При осаждении подбирается оптимальное значение интенсивности излучения в облучаемой области на подложке в диапазоне значений $(1-3) \cdot 10^7$ Вт/см², температура поверхности кремния вовремя импульса порядка 500 °С. Размер облучаемой области 20×20 мкм, определяется размером маски, устанавливаемой по ходу лазерного луча. Длительность процесса осаждения составляет около минуты, толщина наносимой плёнки – (0,1–0,3) мкм. Микроснимок области подложки с нанесённым рением показан на рис. 1, б.

При изготовлении экспериментальных образцов одновременно с диодом Шоттки на кремниевой подложке формировался прототип встроенной в чип микроантенны планарного типа. Планарная антенна имеет лепесток диаграммы направленности, ориентированный по нормали к поверхности. При создании приёмников изображения, матрица чувствительных элементов которых располагается в фокальной плоскости объектива оптической системы, предпочтительным может стать вариант планарной антенны; при создании детекторов систем широкополосной связи выбор может быть в пользу антенны – столбика.

Схематичное изображение структуры прототипа планарной антенны показано на рис. 2.

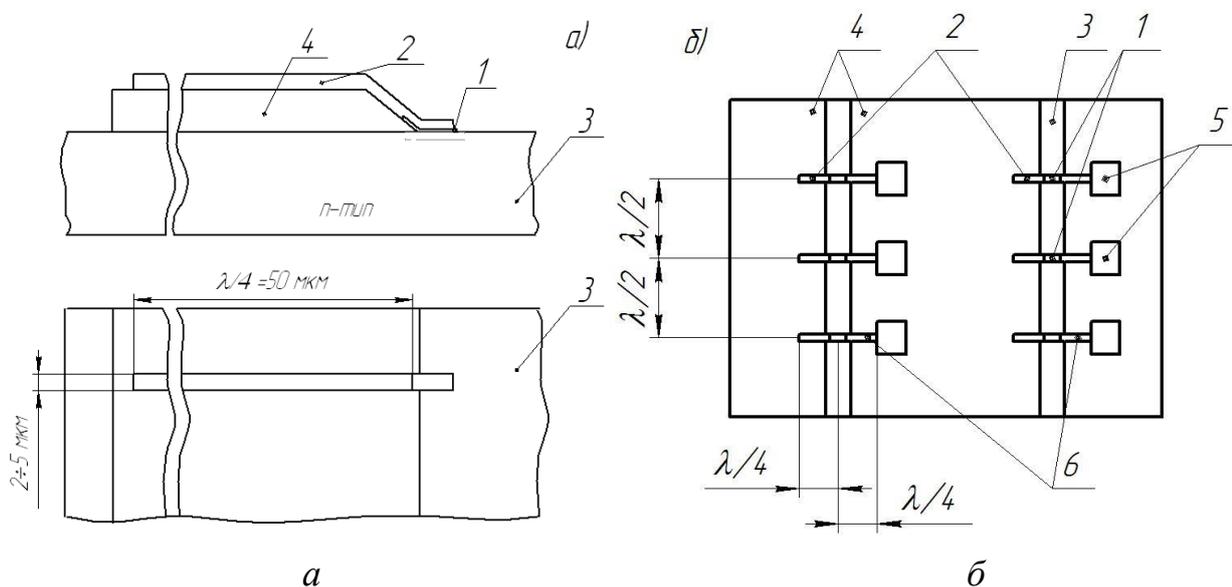


Рис. 2. Прототип планарной антенны:

а – структура встроенной четвертьволновой несимметричной микроантенны; *б* – схема расположения микроантенн и контактных площадок на поле приёмника изображений.
 1 – электрод диода Шоттки, 2 – микроантенна, 3 – полупроводниковая подложка *n*-типа, 4 – слой изолятора, 5 – контактная площадка, 6 – четвертьволновый трансформатор

Изготовление полосковых планарных антенн и электрода диода Шоттки совмещены в одном технологическом процессе лазерно-пиролитического нанесения плёнок.

Площадь электрода экспериментального образца диода 25×25 мкм, длина и ширина полоски прототипа антенны 50 мкм и 10 мкм.

Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 4. ВАХ имеет обычный для диодов вид; обратная ветвь характеристики снималась при напряжении до -1 В, измеренные токи менее 0,1 мкА; прямые токи до 2,2 мкА при напряжении до +1 В. Сплошная кривая представляет собой математическую функцию, выписанную в верхней части графика.

Таким образом, показано, что лазерно-пиролитическая технология может быть применена при создании детекторов терагерцового диапазона спектра электромагнитных волн, представляющих собой структуру расположенных на одном чипе диодов Шоттки и внутрипиксельных антенн.

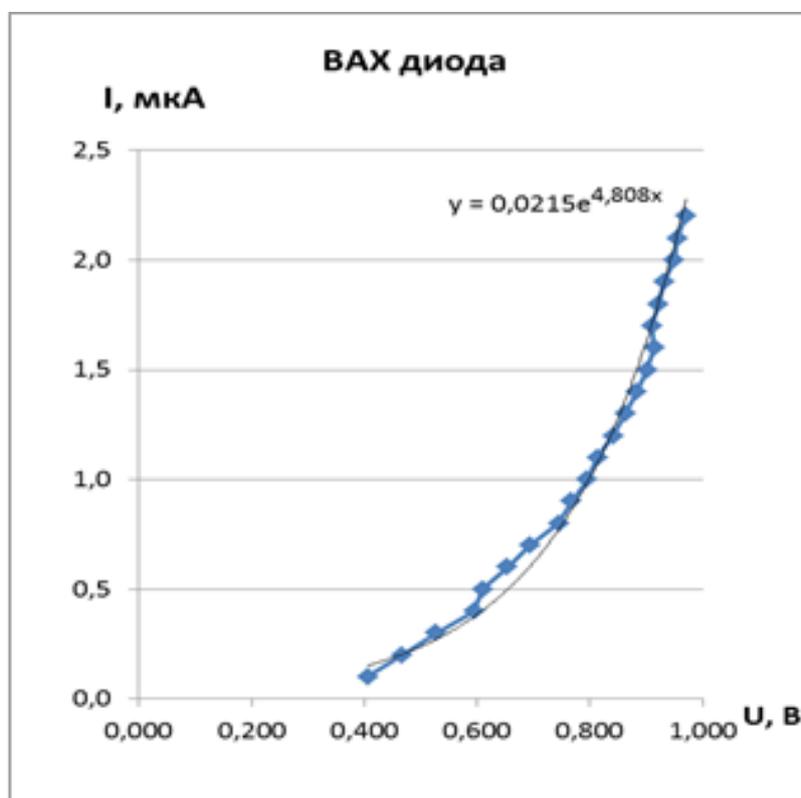


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика диода Шоттки, полученного лазерно-пиролитическим осаждением плёнки металлического рениевого анода на кремний КЭФ 0,3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. – М.: Радио и связь, 1982. – 209 с.
2. A 1kPixel CMOS Camera Chip for 25fps Real-Time Terahertz Imaging Applications / Sherry H. et al. // Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International, 19-23 Feb. 2012, San Francisco, CA. – P. 252–254.

3. Детектор для детектирования электромагнитных волн. US Patent 20110248724 A1. 07.08.2002.
4. Интегральный дипольный детектор для микроволновых приёмников изображения. US Patent 6545646 B1, Апр. 8, 2003.
5. Диод с барьером Шоттки. US Patent 20050179106 A1. Авг. 18, 2005
6. Чесноков В. В., Резникова Е. Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные микротехнологии: монография / Под общ. ред. Д. В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 300 с.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, М. В. Кузнецов, В. А. Райхерт, Д. М. Никулин, 2014

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ С SiC ПОДЛОЖКОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВЫХОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ведущий инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования методов увеличения внешнего квантового выхода излучения полупроводниковых светодиодов. Изучено влияние некоторых типов рельефов на излучающей поверхности светодиодов на эффективность выхода. Рельеф создавался на поверхности подложки из лейкосапфира и на поверхности чипа готового светодиода методами лазерной формовки.

Ключевые слова: внешний квантовый выход излучения, светодиод, поверхностный рельеф.

PROPERTIES OF LED ON SiC SUBSTRATE WITH LASER FORMING OF OUTPUT SURFACE STRUCTURE

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of department of physics, tel. (383)3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Valery A. Raykhert

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., leading engineer of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associated prof. of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

The results of experimental investigation methods of increasing external quantum yield of radiation semiconductor LEDs are present. Effect of any cases of LED's emissive surface reliefs on output efficiency are explore. The relief on leucosapphire substrate's surface and ready-made LED chip's surface was made by methods of laser forming.

Key words: external quantum yield of radiation, LED, surface relief.

В отечественной и зарубежной научно-технической литературе вопросы создания рельефных поверхностей и увеличения эффективности вывода излучения светодиодов широко исследуются. В работе [1] развит метод создания рассеивающего свет микрорельефа на внешней стороне подложек SiC для уменьшения потерь при выводе света из светодиодного кристалла, связанных с эффектом полного внутреннего отражения в структурах AlGaIn/GaN. Предложено использовать тонкие слои фоторезиста в качестве случайных масок для процесса реактивного ионного травления подложки из карбида кремния. Оптимизацией режимов травления на поверхности подложки SiC получен микрорельеф с требуемыми параметрами, что привело к увеличению внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов более чем на 25%.

В работе [1] исследовался лазерно-индуцированный рельеф на поверхности монокристаллического кремния, подвергшейся воздействию излучения пикосекундного Nd-YAG лазера. Структуры были получены под действием излучений с энергиями 0,7; 1,6 и 7,9 Дж/см². Зарегистрировано получение двух типов микрополосок в форме прямых параллельных линий, пересекающих облучаемое пятно, и в форме нанополосок, близких к концентрическим. В работе [3] рассматриваются вопросы повышения светоотдачи светодиодов за счёт увеличения эффективности выхода излучения из объёма кристалла. Широко приме-

няются технологии случайного текстурирования слоя p -GaN и технологии профилированной сапфировой подложки. В последнем случае выращивание эпитаксиальных слоев GaN производится не на гладкой, а на подвергнутой микрообработке подложке, и рельеф границы «эпитаксия – сапфир» работает в качестве центров рассеяния или преломления, что снижает общее внутреннее отражение, а, следовательно, повышается эффективность светоотдачи.

Для повышения эффективности светодиодов прибегают к нанопрофилированию сапфира. Предпринимаются усилия по разработке технологии фотонных кристаллов – использовании периодических или квазипериодических структур с размерами, сравнимыми с длиной волны света, в качестве дифракционных решеток.

В работе [4] предложен усовершенствованный процесс, основанный на использовании наборов самоорганизующихся на поверхности фоточувствительного слоя полимерных наносфер, играющих роль наноразмерных сферических линз.

В статьях [5, 6] проведён анализ отличий светодиодов фирмы Cree, позволивший этим диодам занять монопольное положение на рынке. Cree традиционно использует технологию эпитаксиального выращивания раствора GaN на SiC подложках, Технология выращивания GaN на SiC обладает рядом принципиальных преимуществ перед технологией на сапфире. Во-первых, SiC обладает на порядок большей теплопроводностью (3,8 Вт/см·К у SiC против 0,3 Вт/см·К у сапфира). Это упрощает решение проблемы отвода тепла от активной области кристалла (p - n – перехода), являющейся ключевой для кристаллов с токами более 100 мА. Во-вторых, кристаллическая решетка 6H- SiC обладает лучшим по сравнению с сапфиром сродством с GaN, что принципиально снижает концентрацию дефектов и дислокаций в структуре GaN и повышает квантовый выход кристаллов.

Семейство кристаллов EZBright™ этой фирмы имеет ряд принципиальных технологических отличий, в числе которых травление SiC подложки со слоями GaN через маску до толщины 35 мкм с образованием микролинзовой системы, которая обеспечивает собирание светового потока с поверхности структуры.

В настоящем сообщении рассматриваются результаты экспериментального исследования методов увеличения внешнего квантового выхода излучения полупроводниковых светодиодов, обеспечиваемая некоторыми типами рельефов на выходной излучающей поверхности светодиодов, рельефная поверхность создавалась на поверхности пластины из лейкосапфира, помещаемой с иммерсией на светодиодном излучателе (гибридная конструкция светодиода), и на поверхности полупроводникового кристалла промышленного образца светодиода (монокристаллическая конструкция)

Схематическое изображение гибридной конструкции экспериментальных образцов светодиодных кристаллов приведено на рис. 1. В качестве материала прозрачной рельефной пластины использован лейкосапфир.

Этапы изготовления гибридной конструкции светодиодов и ход лучей показаны на рис. 2.

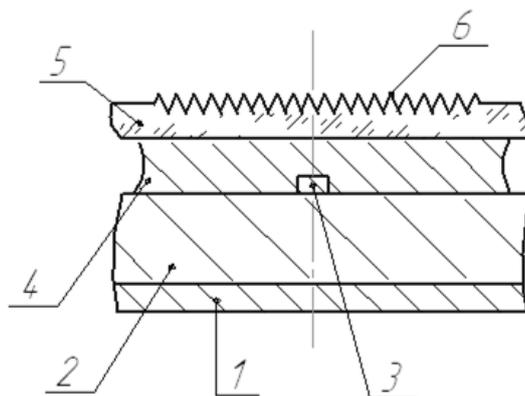
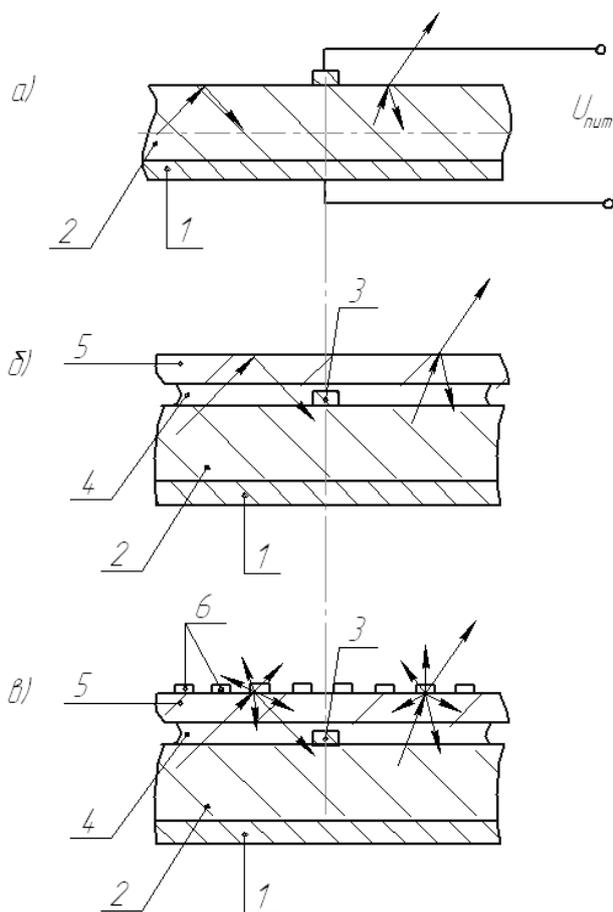


Рис. 1. Гибридная конструкция светодиода:

1, 2 и 3 – элементы светодиода, 4 – иммерсионная среда, 5 – прозрачная полированная пластина, 6 – рельеф на поверхности пластины



1 и 3 – электрические контакты к светодиоду, 2 – полупроводниковый слой кристалла светодиода, 4 – слой иммерсионной жидкости, 5 – накладная оптически полированная плоско-параллельная пластинка, 6 – элементы микро- или нанорельефа на прозрачной накладной пластинке Стрелки отображают ход лучей, возникших при работе светодиода в слое 2 и проходящих структуру гибридного светодиода.

Рис. 2. Этапы изготовления и ход лучей в элементах гибридной конструкции экспериментального образца светодиодного кристалла с рассеивающей рельефной поверхностью:

а – элемент конструкции промышленного светодиода, светодиод подключён к источнику питания $U_{пит}$; *б* – на поверхность светодиода наложена через слой иммерсионной жидкости прозрачная полированная пластинка; *в* – наложена прозрачная пластинка с рельефной поверхностью

Ход лучей в светодиоде, показанный на рис. 2, а, иллюстрирует причину малой эффективности вывода излучения из объёма кристалла. Лучи, падающие на выходную поверхность светодиода под углом более критического угла полного внутреннего отражения (левые на рисунки лучи) отражаются обратно в кристалл и не выходят из него. Если угол падения меньше критического (правые лучи) падающий луч частично отражается, частично преломляется и выходит в окружающую среду. Лучи, вернувшиеся в кристалл, ухудшают эффективность светодиода, уменьшают его внешний квантовый выход.

При наложении на поверхность кристалла через слой иммерсионной жидкости прозрачной полированной пластинки (см. рис. 2, б) лучи входят в пластинку не преломляясь и не отражаясь, если показатели преломления кристалла, иммерсионной жидкости и накладной пластинки одинаковы. На поверхности накладной пластинки свет полностью отражается (левые лучи) или отражается и преломляется (правые лучи); эффективность выхода излучения из устройства остаётся, как у светодиода без накладной пластинки.

При наложении пластинки с рельефной поверхностью (см. рис. 2, в) излучение подвергается рассеянию на элементах рельефа, что приводит к нарушению полного внутреннего отражения и увеличению внешнего квантового выхода светодиода.

На рис. 3 показано распределение яркости на излучающей рельефной поверхности подложки из лейкосапфира гибридного светодиода. Рельеф выполнен в виде системы концентрических колец шириной каждое 25 мкм; поверхность внутри полосы кольца имеет вид неупорядоченной структуры с характерными размерами элементов порядка нескольких микрометров (рис. 4).

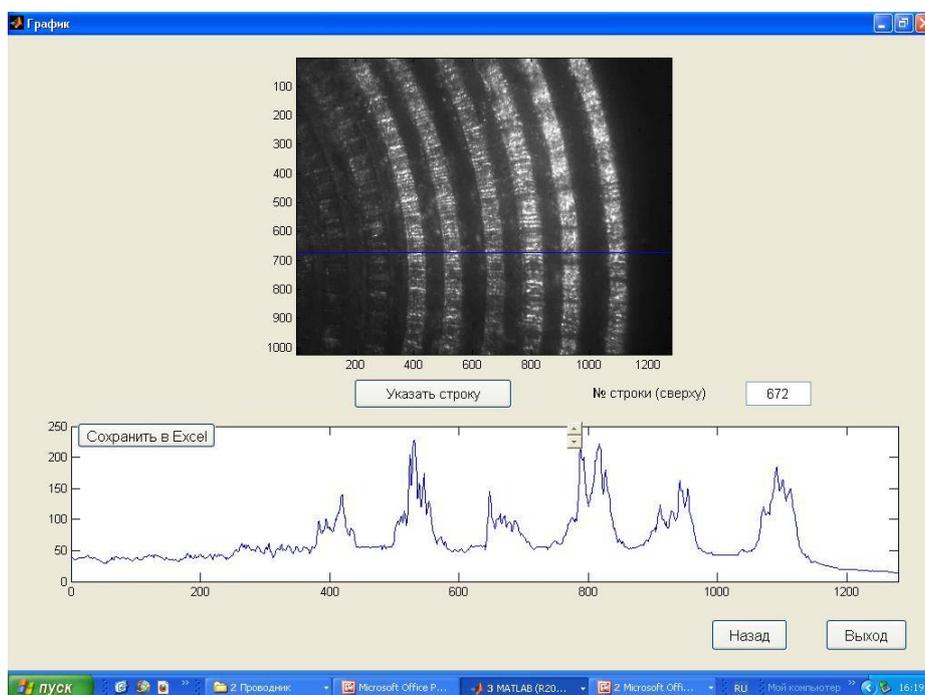


Рис. 3. Распределение яркости на излучающей рельефной поверхности подложки из лейкосапфира гибридного светодиода (по строке № 672 изображения массива)

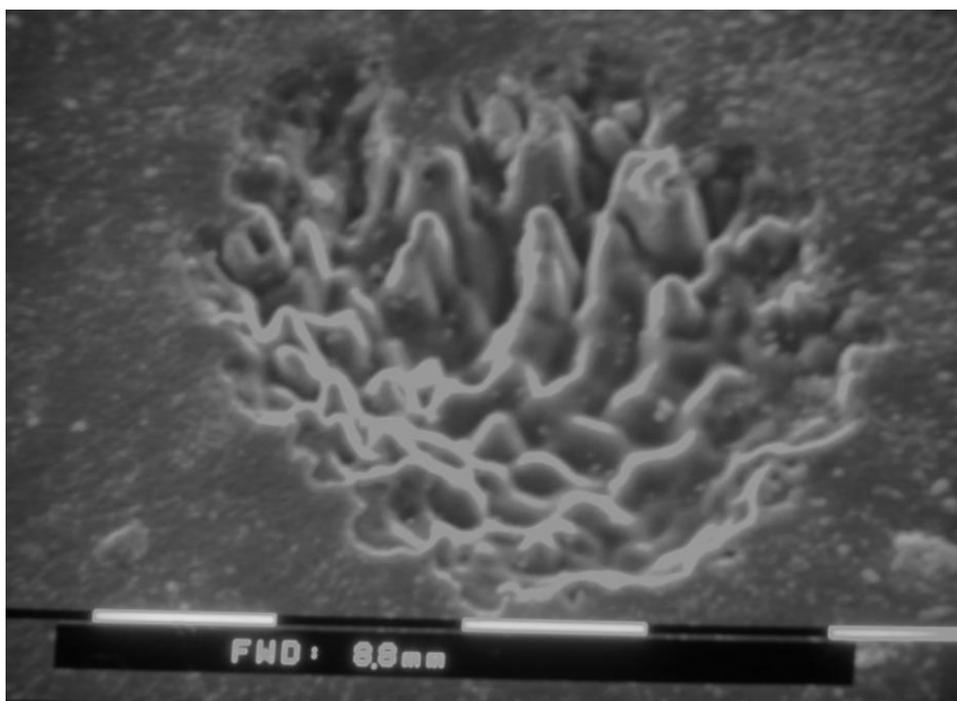


Рис. 4. СЭМ-фотография поверхности лёгосапфировой подложки после импульсного лазерного воздействия

Экспериментальные образцы светодиодных кристаллов монолитной конструкции получались переделкой промышленных светодиодов XPEROY-L1-0000-00 фирмы Cree, имеющих подложку из монокристаллического карбида кремния.

Конструкция экспериментального образца кристалла показана на рис. 5.

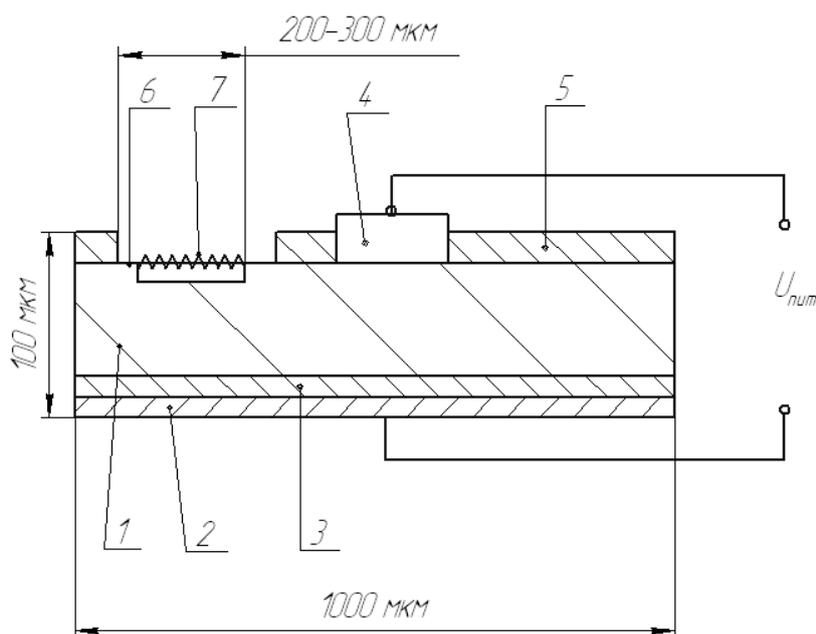


Рис. 5. Конструкция экспериментальных образцов кристаллов светодиодов монолитной конструкции

На рис. 5: 1 – пластина монокристаллического карбида кремния толщиной 100 мкм, 2 – тонкослойная структура излучающей зоны светодиода, 3 – металлический электрод, образующий электрический контакт металл-полупроводник, 4 – металлический электрод, создающий электрический контакт к кристаллу, 5 – имеющийся на поверхности рассеивающий слой светодиода, 6 – окно с размером поперечника 200 – 300 мкм, вскрытое в рассеивающем слое, 7 – зона на подложке монокристалла карбида кремния, обработанная по разработанным лазерным методикам.

При вскрытии окна в рассеивающем слое светодиода обнажалась поверхность монокристаллической подложки карбида кремния.

Поверхность имеет вид матрицы микролинз диаметром каждая 6 мкм (микрофотография на рис. 6).

Эта поверхность при формировании поверхностной структуры экспериментального образца кристалла подвергалась лазерным обработкам, при этих обработках микролинзовая структура поверхности разрушалась.

Электрические соединения кристалла с выводами светодиода восстанавливались.

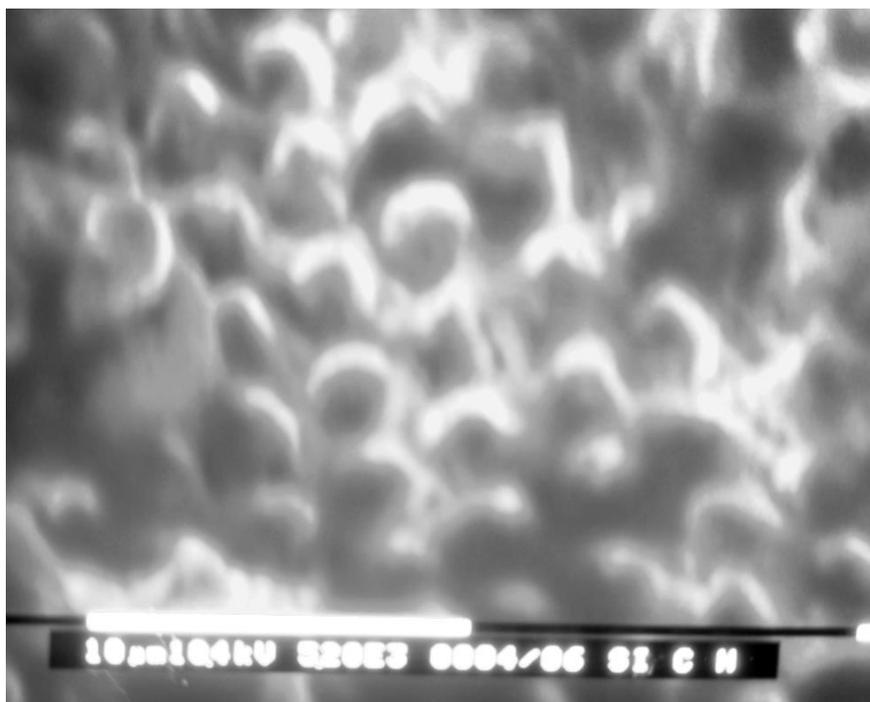


Рис. 6. СЭМ фотография поверхности монокристаллической подложки SiC светодиода фирмы Cree во вскрытом окне в наружном покрытии излучающей поверхности кристалла. Видна микролинзовая структура с линзами диаметром 6 мкм

По измерениям на электронном микроскопе высоты выступов рельефа над средней поверхностью обработанной лазерным воздействием лейкосапфировой подложки находятся в пределах 3 – 5 мкм.

Измерения яркостей в относительных одинаковых единицах проведены на измерительной установке и по методике, представленной нами в [7].

В таблице 1 приведены значения яркостей излучающих рельефной и плоской площадок выходной поверхности кристаллов светодиодов гибридной и монолитной конструкции и эффективностей вывода излучения.

Таблица 1

Измеренные относительные яркости излучающих рельефной и плоской площадок выходной поверхности кристалла светодиода

Конструкция	Координата рельефной площадки	λ , нм	Прямой ток диода, мА	Яркость рельефной площадки, отн. ед.	Яркость плоской площадки, отн. ед.	Увеличение эффективности*, %
Гибридная	180	450	20	120	(30–50)	200
	220			140	(50–60)	150
	280			160	(60–70)	146
Монолитная	120	550	20	175	130	35
	190					46
	190			190	120	58
	270			200	130	54
	1070			160	100	60

* – отношение разности яркостей к яркости плоской поверхности

В случае гибридной конструкции экспериментального образца светодиода измерялась яркость выходной рельефной поверхности прозрачной пластины из сапфира, являющейся излучающей поверхностью гибридного светодиода и, для сравнения, яркость плоской поверхности прозрачной пластины. В случае монолитной конструкции измерялась яркость обработанной лазерным излучением вскрытой поверхности светодиода и яркость не обработанной (не вскрытой) поверхности.

Результаты измерений и вычислений свидетельствуют, что в случае монолитной конструкции светодиодов внешняя квантовая эффективность увеличивается усреднённо по поверхности более чем на 50 %; в случае гибридной конструкции, в которой в качестве материала выходной излучающей поверхности применён сапфир с рельефной поверхностью, эффективность увеличивается в сравнении с плоской поверхностью, в (1,5–2) раза, т.е. на (50–100) %.

Таким образом, лабораторные технологии формирования поверхностных структур с применением лазерно-лучевого воздействия на поверхности позволяют получать поверхностный рассеивающий рельеф на лейкосапфире и карбиде кремния с максимальной достигнутой эффективностью выхода излучения, в сравнении с не рассеивающей поверхностью, большей на (50–200) %.

Лазерно-лучевое воздействие вписывается в базовый технологический процесс изготовления светодиодов на карбиде кремния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC / И.П. Смирнова и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44, вып. 5. – С. 684-687.
2. Периодические структуры на поверхности кристаллического кремния, полученные при помощи Nd-YAG лазерных пикосекундных: импульсов на длине волны 532 нм / M.S. Trtica, et al. // Applied Surface Science. – 2007. – V. 254, I. 5. – P. 1377–1381
3. Ки Донг Ли, Сжодин Р., Эрикссон Т. Нанотравление увеличивает эффективность светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С.22-24.
6. Selectively grown photonic crystal structures for high efficiency InGaN emitting diodes using nanospherical-lens lithography / Wei T.B. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 101, N. 21. – P. 211111 - 211111-5.
5. Полищук А.Г., Туркин А.Н. Новое поколение светодиодов компании Cree для освещения // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 7. – С.20-23.
6. Туркин А.Н. Мощные светодиоды Cree для освещения: основные преимущества и перспективы применения // Полупроводниковая светотехника – 2009. – №2. – С.14-17.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев,
М. В. Кузнецов, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин, 2014

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Проведена оценка эффективности выхода излучения через поверхности полного внутреннего отражения светодиодных кристаллов, модифицированных различными видами рельефов. Рассмотрены массивы сферических, конических, прямоугольных выступов, а также поверхностный анизотропный прозрачный слой.

Ключевые слова: кристалл светодиода, эффективность вывода излучения, полное внутреннее отражение, модификация поверхности, поверхностный рельеф.

THE METHODS OF TRANSPARENCY INCREASING FOR INTERFACES WITH TOTAL INTERNAL REFLECTION

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

An estimation of efficacy of radiation coupling through LED's chip interface with total internal reflection are carry out. An arrays of spherical, conical, rectangular surface asperities and surface's anisotropic transparent layer are considered.

Key words: LED chip, efficacy of radiation coupling, total internal reflection, surface modification, surface relief.

Увеличение внешнего квантового выхода излучения светодиодов на основе полупроводников с высокими показателями преломления достигается созданием рельефов на поверхности полного внутреннего отражения, использованием рассеивающих свет и люминесцирующих сред. Так, в работе [1] рассматриваются теплофизические и оптические свойства микросистем с луночным рельефом, полученным с применением варианта искровой обработки, на подложках из карбида кремния. В работах [2,3] обнаружено увеличение квантовой эффек-

тивности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC, при котором возникает рельеф с характерным размером меньше длины волны светодиода, Технология сверхярких светодиодов компании CREE включает получение микролинзовой поверхности кристалла [4,5]. В работе [6] описывается формирование рельефа на излучающей поверхности с применением фотолитографии, основанной на использовании массивов микросфер.

Представляет интерес теоретическая оценка факторов, ограничивающих эффективность выхода излучения через поверхности полного внутреннего отражения, модифицированные различными видами рельефов.

Возникшее в объёме полупроводникового светодиода излучение выходит в окружающее пространство через границу раздела между полупроводником и воздухом. Излучение возникает вследствие эффекта электролюминесценции определённой зоны в электронно-дырочном переходе полупроводника при прохождении через переход прямого тока вследствие рекомбинации электронно-дырочных пар. Угловое распределение интенсивности излучения при электролюминесценции изотропное, ламбертовское, и световые потоки падают на границу изнутри под всеми возможными углами.

В случае, если свет падает из среды оптически более плотной, излучение полностью отражается от границы, остаётся в первой среде, при углах падения [7]:

$$\theta_2^{kp} \geq \arcsin(n_1/n_2), \quad (1)$$

где n_2, n_1 – показатели преломления среды падения луча и среды преломления, соответственно, на границе сред; θ_2^{kp} – критическое значение угла падения луча. Для границы стекло – воздух этот угол составляет около 40° .

Отношение светового потока Φ_t прошедшего через плоскую поверхность, параллельную плоскости $p-n$ перехода, к потоку Φ_i , возникшему в элементе $p-n$ перехода [8], равно:

$$\frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{n_i} \right)^2 \int_0^{\pi/2} T(\theta_0) \frac{\cos \theta_0 \sin \theta_0}{\cos \theta} d\theta_0. \quad (2)$$

В этой формуле величины с индексом 0 относятся к окружающей излучатель среде.

В плоской конфигурации через границу проходит очень малая доля света, при использовании карбида кремния пройдёт менее 5 % возникшего при люминесценции света (без просветления поверхностей). На рис. 1 показана схема хода лучей в светодиоде, серая полоса – зона люминесценции.

Излучение возвращается в полупроводник, может рециклироваться и вновь попасть на границу, что несколько ослабляет влияние эффекта полного

отражения. Для увеличения внешнего квантового выхода в светодиодах прибегают к различным видоизменениям конструкции.

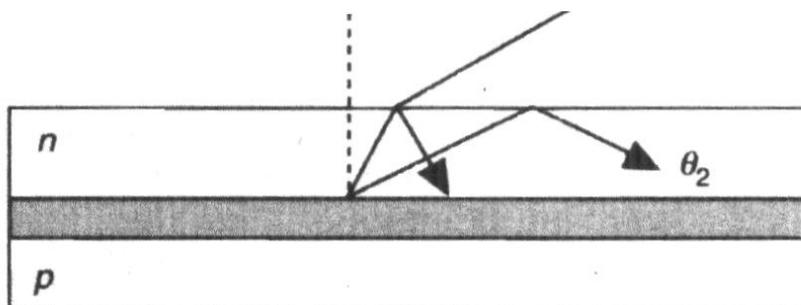


Рис. 1. Иллюстрация эффекта полного внутреннего отражения излучения в светодиоде [8]

При нанесении на поверхность светодиода диэлектрических плёнок последние могут оказывать просветляющее действие, но только на излучения, падающее под углами меньше угла полного внутреннего отражения; однако, критический угол при этом не меняется.

Для увеличения вывода света из полупроводника в работе [8] рекомендуется подбирать геометрию диода таким образом, чтобы свет, излучаемый люминесцентной зоной, попадал на поверхность под углами, меньшими критического, нанесением антиотражающих покрытий на поверхности выхода света, создание шероховатых поверхностей выхода света для увеличения вероятности выхода излучений при многократных отражениях. Среди анализируемых в указанной работе конфигураций светодиодов представлены полусферы, усечённая полусфера, усечённый эллипсоид, усечённый конус, параболоид. Все конструкции характеризуются почти точечным размером излучающей области.

Максимальный квантовый выход обеспечивают полусфера, сфера Вайерштрасса (усечённая полусфера) и параболоид. Эти конструкции имеют квантовый выход в $2n^2$ раз больше, чем плоский диод.

Современные светодиоды с большой площадью излучающей зоны имеют почти плоскую конструкцию [4,5]. Кристаллы светодиодов имеют толщину (100–250) мкм при площади излучающей поверхности до 1 мм^2 .

В случае использования плоской конструкции излучателя светодиода с большой площадью кристалла эффективность вывода излучения из объёма полупроводника может быть улучшена за счёт создания рельефа и шероховатости на выходной для излучения поверхности кристалла; необходимо решать оптико-физическую задачу пропускания света рельефной поверхностью кристалла с учётом явлений полного внутреннего отражения и рассеяния световой волны на элементах рельефа.

Ниже приведён анализ эффективности вывода излучения через плоские поверхности полного внутреннего отражения, модифицированные рельефом в

виде не упорядоченного множества однотипных рельефных фигур типа полусфер, конусов, прямоугольных выступов и впадин поверхности, вертикальных узких выступов поверхности.

На рис. 2 показаны варианты структур рельефов, создаваемых на выходной поверхности светодиода.

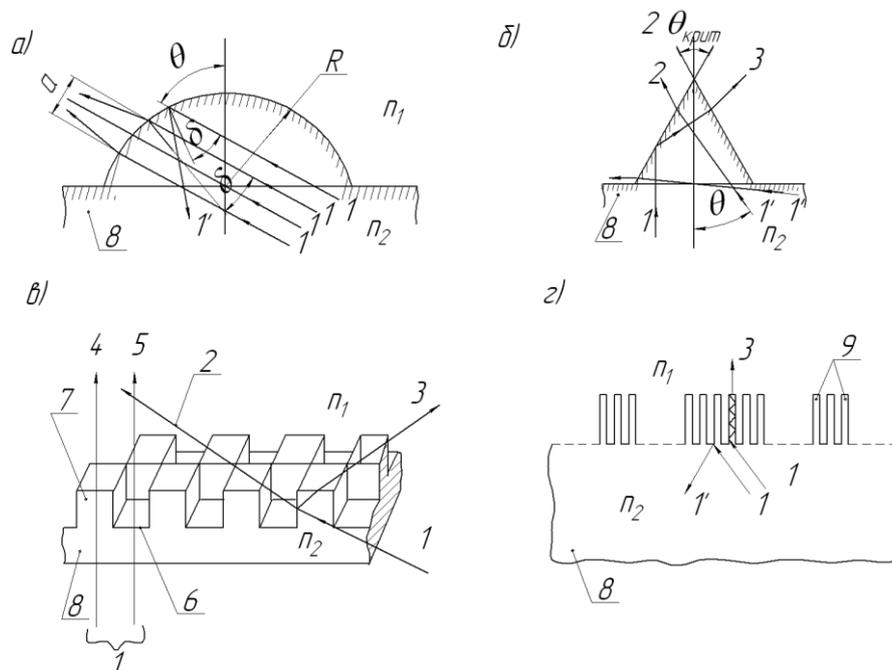


Рис. 2. Рассеяние падающего изнутри подложки света на различных структурах рельефа выходной поверхности светодиода:

а – рассеяние на выпуклостях поверхности типа сферических секторов;
б – рассеяние на конических выступах; *в* – рассеяние на вертикальных выступах поверхности; *г* – рассеяние на вертикальных узких выступах поверхности (вывод излучения с помощью анизотропного слоя подложки)

Обозначения на фигурах рис. 2: *1* и *1'* – лучи в кристалле: падающий изнутри объёма светодиода на выходную поверхность и отражённый от неё, *2* – луч, вышедший из диода после первого преломления, *3* – луч, вышедший из диода после второго преломления, *4* – луч, прошедший через плоский выступ, *5* – луч, прошедший через плоское дно впадины, *6* – дно впадины, *7* – выступ, *8* – подложка (тело светодиода), *9* – анизотропный прозрачный слой на поверхности подложки, θ – угол направления луча относительно нормали к поверхности подложки, R – радиус кривизны сферы, δ – угол падения луча на поверхность, n_1, n_2 – показатели преломления среды преломления и среды падения, соответственно, a – ширина зоны падения группы лучей на поверхность.

Выпуклости представляют собой образования с размерами больше длины волны, излучение падает изнутри подложки на основания выпуклостей под всеми возможными углами в пределах телесного угла 2π ср. На основании по-

лусферического сегмента радиусом R падает группа параллельных лучей под углом θ к оси симметрии сегмента. Лучи, попадающие в область a на поверхности сегмента, падают на поверхность под углами, меньшими угла полного внутреннего отражения, проходят, преломляясь, наружу; показатель преломления n_2 подложки светодиода больше показателя окружающей среды.

Угол падения, соответствующий углу полного внутреннего отражения, в случае карбида кремния составит $\theta_{\text{крит}} = 23,1^\circ$.

Верхний луч на рисунке падает под углом, большим угла полного отражения, зеркально отражается от поверхности, давая луч I'

Из геометрического построения на рисунке можно найти, что угол падения δ луча на внутреннюю поверхность сферического сегмента равен:

$$\delta = \pm \arcsin \frac{a}{2R} \quad (3)$$

и не зависит от угла падения лучей θ . При изменении величины угла падения зона a прозрачности полусферы перемещается по её поверхности. Таким образом, лучи, падающие на поверхность полусферы изнутри под любыми углами, могут выходить наружу, однако выходящий поток виньетируется «окном» с размером a . Размер этого «окна» можно найти из (3), если принять $\delta = \theta_{\text{крит}}$:

$$a = \frac{2R}{n_2} \quad (4)$$

Из формулы видно, что размер «окна» не зависит от угла падения излучения на основание полусферы и в случае использования карбида кремния $a = 0,785R$. При изготовлении полусфер из другого материала, с меньшим показателем преломления, чем карбид кремния, виньетирование можно существенно уменьшить: при $n_2 = 1,5$ (стекло) $a = 1,33R$. Пропускание T излучения наружу не зависит от угла падения на основание полусферы и равно:

$$T = \frac{S_a}{R^2} = 2\pi(1 - \cos \theta_{\text{крит}}) \quad (5)$$

Здесь $S_a = 2\pi R h$ – площадь сферической поверхности сегмента a , h – высота сегмента. Получим пропускание порядка 5 % (не учитываются эффекты френелевского отражения). Полученное значение пропускания является также суммарным пропусканием полусферы для излучения, падающего на её основание под всеми возможными углами, то есть, в телесном угле 2π ср.

Расчёт пропускания для случая плоской выходной поверхности светодиода даёт то же значение пропускания, то есть полусферический выступ на поверхности не имеет преимущества по пропусканию излучения из объёма светодиода.

Рассеяние на конических структурах (рис. 2, б). Конусы с полууглом у вершины α вплотную друг к другу занимают выходную поверхность светодиода. Если полуугол равен углу полного внутреннего отражения $\theta_{\text{крит}}$, то лучи, нормально падающие на основание конуса, на его внутренней поверхности испытывают полное внутреннее отражение и зеркально отражаются к противоположной стороне конуса, угол падения на которую меньше угла полного отражения, лучи выходят из объёма светодиодной подложки в окружающее пространство, преломляясь на поверхности. Увеличение угла падения θ лучей на основание до величины $2\theta_{\text{крит}}$ сохраняет возможность выхода лучей из конической поверхности, однако, при углах падения на основание, превышающих критический $\theta > \theta_{\text{крит}}$, вышедшие из конуса лучи преломляются в сторону подложки. При углах падения $\theta > 2\theta_{\text{крит}}$ лучи не выходят из конуса, испытывают на его внутренней поверхности полное внутреннее отражение вглубь подложки.

При нормальном падении излучения на основание конуса с полууглом у вершины $\alpha = \theta_{\text{крит}}$ и больше пропускание конуса $T = 100\%$.

Если принять, что падающие на основание конуса в пределах углов падения, меньших $\theta' < 2\theta_{\text{крит}}$, лучи пропускаются конической поверхностью наружу, то телесный угол, в пределах которого находятся эти лучи, равен:

$$\Omega' = 2\pi(1 - \cos 2\theta_{\text{крит}}). \quad (6)$$

Эффективность вывода излучения равна $\Omega'/2\pi$ и равна 30 %.

На рис. 2, в показан ход лучей при рассеянии света на рельефе поверхности с отвесными стенками при плотном расположении элементов.

В качестве модельной структуры рельефа выходной поверхности светодиода рассмотрим формы в виде отдельно друг от друга расположенных на поверхности столбиков и углублений с отвесными стенками; размеры элементов рельефа существенно больше длины волны излучения светодиода.

Излучение изнутри кристалла попадает на выходную поверхность под углами в пределах телесного угла 2π . Часть излучения в пределах углов падения от 0 до $\theta_1^{\text{кр}}$ проходит поверхность, в том числе, в области вершин выступов и дна углублений, и выходит из кристалла, часть испытывает полное внутреннее отражение. Излучение, попадающее на стенки выступов и углублений, как показано на рисунке, имеет углы падения, отличающиеся на $\pi/2$ от углов излучения, попадающего на выходную поверхность кристалла, проходит стенки и преломляется преимущественно в сторону окружающего пространства, имеет значение выход излучений после повторных отражений и преломлений на поверхностях рельефа.

Часть излучения, попадающая на незанятые выступами и впадинами области и на плоские вершины и дно выступов и впадин, испытывает полное внутреннее отражение от поверхности и может туннелировать. Туннелирующее из-

лучение распространяется вдоль поверхности на расстояние ℓ_x (сдвиг луча Госо-Генхена) [9]:

$$l_x = 2d_{TE} \operatorname{tg} \theta, \quad (7)$$

где θ – угол падения излучения на поверхность, и может попадать на отвесные стенки выступов и впадин поверхности. В случае попадания на стенки выступов в пределах углов падения от 0 до θ_1^{kp} излучение проникает в выступы и их пронизывает, практически не давая вклада в увеличение выхода излучения из кристалла. Туннелирующее излучение, попадающее на вертикальные стенки вне пределов указанного диапазона углов, отражается от стенок и также не даёт вклада в увеличение выхода; данный анализ справедлив и для излучения, попадающего на поверхность плоского дна углублений.

Использование выступов с наклонными стенками может привести к увеличению световых потоков, попадающих в окружающее пространство, за счёт френелевского отражения от стенок (при отсутствии просветления коэффициент отражения $R \approx 0,2$).

Туннелирующий световой поток, попадающий на края впадин на поверхности, может излучаться в полость впадины и в область пространства над поверхностью, в зависимости от угла падения на элементы поверхности края углубления.

Лучи 4 и 5 символизируют собой световые потоки, падающие из внутреннего объёма кристалла на вершины выступов и дно впадин под углами, меньшими критического угла; эти потоки выходят из кристалла. Луч 1, входящий с правой стороны рисунка, символизирует световые потоки, падающие на боковые стенки выступов и впадин также под углами падения к ним, меньшими критического угла полного внутреннего отражения; этот луч расщепляется на лучи 2 и 3, выходящие из кристалла. Из области рельефа наружу выходят также лучи, испытывающие полное отражение на вертикальных гранях выступов, они испытывают минимум два падения на грани выступов.

Телесные углы лучей, не испытывающих полного отражения на каждой боковой стенке, вершине выступа и дне впадины примерно равны между собой, световые потоки, падающие на эти элементы изнутри кристалла, в связи с изотропностью излучения, имеющего электролюминесцентное происхождение, также одинаковы. Общая поверхность боковых граней при равенстве высоты выступа его поперечному размеру вдвое больше суммарной поверхности вершин выступов и дна впадин поверхности кристалла, что приводит приблизительно к утроению прошедшего поверхность излучения I_m против прошедшего I_T поверхность без рельефа, составляющего, как показано выше, примерно 5 % возникшего в светодиоде излучения:

$$I_m \approx 3I_T. \quad (8)$$

Представленная оценка, таким образом, позволяет сделать предварительное заключение: наличие на поверхности выступов и впадин позволяет увеличить эффективность вывода излучения светодиода из объёма кристалла; может иметь значение также механизм вывода туннелирующего через поверхность излучения через края углублений.

На рис. 2, з иллюстрируется ход лучей при наличии на поверхности светодиода анизотропного слоя из расположенных беспорядочно структурных вертикально ориентированных прозрачных элементов - волокон. В первом приближении можно принять, что при попадании излучения из подложки на основания волокон свет распространяется подобно распространению в световоде и излучается в окружающую среду при выходе из верхнего торца волокна. Излучение распространяется в волокне при падении на его входной торец под углом в пределах угловой входной апертуры световода. Излучение, падающее под большими углами, может распространяться в анизотропном слое по первоначальному направлению, рассеиваясь на элементах структуры анизотропного слоя и ослабляясь.

Для двухслойного волокна числовая апертура сердцевинки выражается формулой [9]:

$$\sin \theta_{0c} = \frac{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}{n_0}, \quad (9)$$

где n_0 – показатель преломления среды перед входом в волокно; n_1, n_2 – показатели преломления межволоконной среды и сердцевинки волокна.

В нашем случае $n_0 = n_2$ – показатель преломления карбида кремния, межволоконной средой является воздух ($n_1 = 1$). Получим значение угловой апертуры: $\theta_{0c} = 67^\circ$.

Соответствующий этой угловой апертуре телесный угол входа излучения из объёма кристалла светодиода в волокно равен $\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta_{0c}) = 3,8$ ср, то есть доля вошедшего в волокно (и вышедшего из него) от падающего на его вход излучения, возникшего в кристалле и распространяющегося по всем направлениям в телесном угле 2π , составляет $\frac{3,8}{2\pi} \approx 0,6$. Полученный резуль-

тат имеет заниженное значение в связи с тем, что формула (9) справедлива для установившегося режима распространения излучения по световоду, который возникает при удалении волны от входа в световод на значительно большее расстояние, чем длина волокон в нашем случае. В неустановившемся режиме распространяющаяся по волноводу волна содержит вытекающие моды, образованные лучами, попавшими в волновод под углами, большими его расчётной угловой апертуры.

Не менее важным, чем эффективность вывода излучения, является распределение интенсивности в излучаемом световом пучке, форма диаграммы направленности излучения. При лазерной микрообработке подложек может

формироваться поверхностная микроструктура в виде матрицы микролинз. На рис. 3, *a* показана схема хода лучей, выходящих из объёма кристалла светодиода через выходную поверхность, профилированную в виде матрицы рядом стоящих сферических линз, в атмосферу.

Слева в теле пластины из SiC показан пучок стрелок, иллюстрирующий расходимость излучения внутри кристалла, лучи 1 и 2 – падающее из объёма на поверхность кристалла излучение. Проходя микролинзу, излучение фокусируется, что сообщает падающему на одиночную линзу параллельному пучку лучей расходимость $2\alpha \approx d/f$, где d – поперечник микролинзы, f – её фокусное расстояние. Для сферической поверхности, граничащей с воздухом, $f = Rn_1 / (n_2 - n_1)$, где R – радиус кривизны сферической поверхности микролинзы. Если линза имеет форму сегмента сферы высотой h и диаметром основания d , то радиус $R \approx d^2 / (8h)$. Задаваясь значениями $d = 6$ мкм, $h = 1$ мкм, $n_2 = 2,55$, $n_1 = 1,5$ получим добавляемую микролинзой расходимость пучка $2\alpha = \frac{8h(n_2 - n_1)}{dn_1} = 0,9$ рад. Для пучка лучей, падающих на линзу под различными углами, линза оказывает коллимирующее действие.

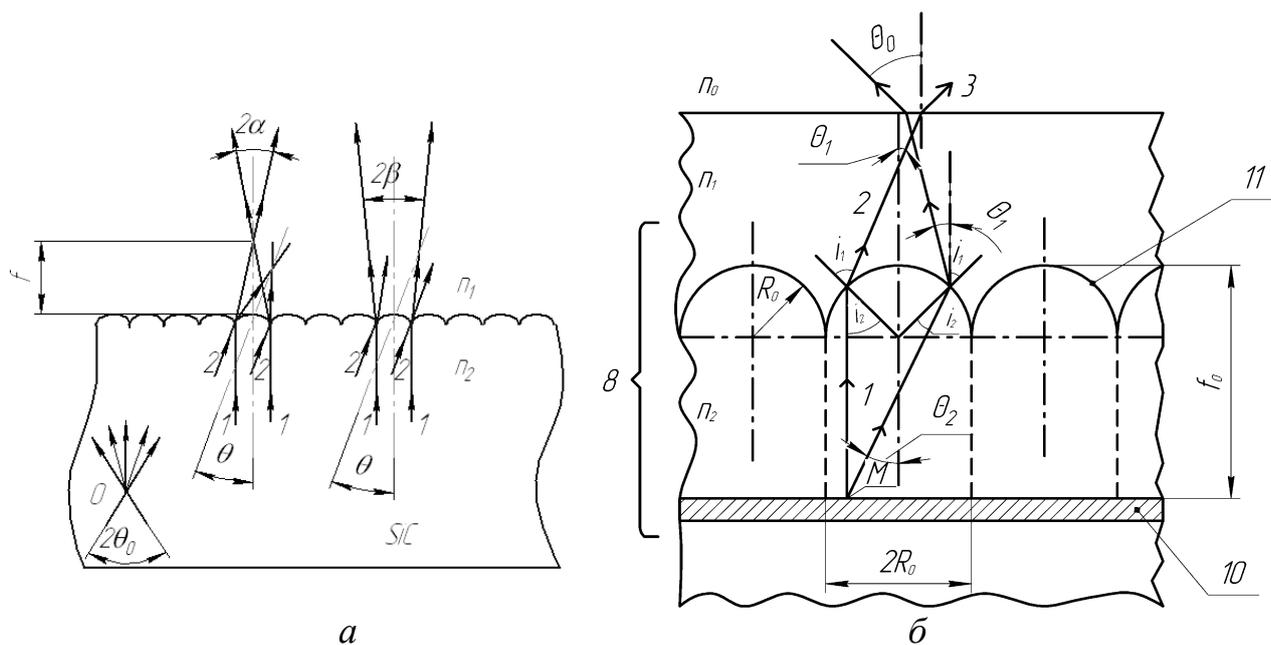


Рис. 3. Схема хода лучей, выходящих из объёма кристалла светодиода через поверхность, профилированную в виде матрицы рядом стоящих сферических линз, которая является:

a – внешней границей; *б* – внутренней границей

На рис. 3, *б* показан ход лучей в случае формирования массива микросфер на внутренних границах прозрачных сред кристалла светодиода. Можно найти,

что при этом уменьшается угловая расходимость излучения, проходящего внешнюю границу кристалла. что увеличивает внешний квантовый выход.

Дифракция света на линзе также приводит к дополнительной расходимости, которая оценивается выражением $2\beta \approx \lambda / d$ ($\approx 0,1$ рад).

Упорядоченный массив микролинз можно рассматривать как дифракционную двумерную решётку с периодичностью, примерно равной диаметру микролинз. Угловая полуширина первого максимума дифракционной решётки равна $\varphi \approx \frac{\lambda}{2D}$, где D – поперечник области, занятой массивом микролинз (поперечник излучающей поверхности светодиода), то есть, дифракционная расходимость излучения массива уменьшается в сравнении с расходимостью, создаваемой одиночной линзой.

В качестве заключения можно отметить, что при выборе типа рельефа, создаваемого на поверхности полного внутреннего отражения для увеличения внешнего квантового выхода светодиода, предпочтительными являются рельефы с нормально ориентированными к поверхности структурными элементами или конические структуры; лучи, пересекающие область рельефов, должны испытывать не менее двух отражений на элементах рельефа. Рельефы в виде массива микросфер, граничащие с воздухом, не имеют преимуществ в сравнении с плоской поверхностью с точки зрения увеличения внешнего квантового выхода, но способны обеспечить, в сравнении с другими типами рельефов, более высокую направленность вышедшего из светодиода излучения. Представляют интерес массивы микросфер на внутренних границах прозрачных сред кристалла светодиода, позволяющие коллимировать падающее на них излучение и уменьшать угловую расходимость излучения, проходящего внешнюю границу кристалла.

При оценках принималось, что используемые среды имеют сплошной характер, и рассеяния света при прохождении излучения нет. Предполагается в дальнейшем учесть влияние рассеяния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карачинов В.А., Карачинов Д.В., Казакова М.В. Теплофизические и оптические свойства микросистем с луночным рельефом на основе карбида кремния // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, Вып. 8. – С. 129-133.
2. Синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN с удалённой сапфировой подложкой / И.П. Смирнова и др. // ФТП. – 2006. – Т. 40, Вып. 111. – С. 1397-1401.
3. Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC / И.П. Смирнова и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44, Вып. 5. – С. 684-687.
4. Елисеев И. Обзор светодиодной продукции компании Cree // Новости электроники. – 2009. – № 9. – С. 5-12.
5. Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 48-57.

6. Wei T. B. et al. Selectively grown photonic crystal structures for high efficiency InGaN emitting diodes using nanospherical-lens lithography // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 101, N. 21. – P. 211111 - 211111-5.

7. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика: Учебник. – М.: МГУ, 1998.

8. Берг А., Дин П.. Светодиоды. – М.: Мир, 1979.

9. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. – М.: Мир. 1980.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, 2014

ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ КОМПЕНСАЦИИ УГЛОВЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ЕГО ГРАНЕЙ

Александра Сергеевна Сырнева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Исследуется экспериментальная модель оптического резонатора бегущей волны. Показана возможность улучшения параллельности сторон кубического резонатора с зеркалами полного внутреннего отражения с помощью пьезоэлектрической подстройки углового положения граней резонатора.

Ключевые слова: оптический резонатор, полное внутреннее отражение.

OPTICAL RESONATOR OF TOTAL INTERNAL REFLECTION WITH WHO OPTIONS ANGULAR PROVISIONS OF ITS FACES

Alexandra S. Syrneva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Assistant Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Valery A. Reichert

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Engineer of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

The experimental model of the optical resonator of a running wave are investigated. Possibility of improvement of parallelism of the parties of the cubic resonator by means of adjustment carried out by piezoelements is shown.

Key words: optical resonator, the total internal reflection.

Оптический резонатор бегущей волны [1] требует высокой точности обеспечения углового положения зеркал резонатора. В рассматриваемой конструкции [2] используются зеркала полного внутреннего отражения, составляющие единое целое с телом резонатора.

В настоящем сообщении рассматривается возможность компенсации погрешностей угловых положений зеркал полного внутреннего отражения за счёт использования разрезной конструкции резонатора и пьезоэлектрической регулировки относительного положения его частей. Схематически разрезной резонатор и экспериментальный стенд для его исследования показаны на рис. 1.

Резонатор состоит из двух сложенных гипотенузными гранями прямоугольных призм и пьезоэлемента. Несколько пьезоэлементов позволяют изменять угловые положения граней в произвольных направлениях.

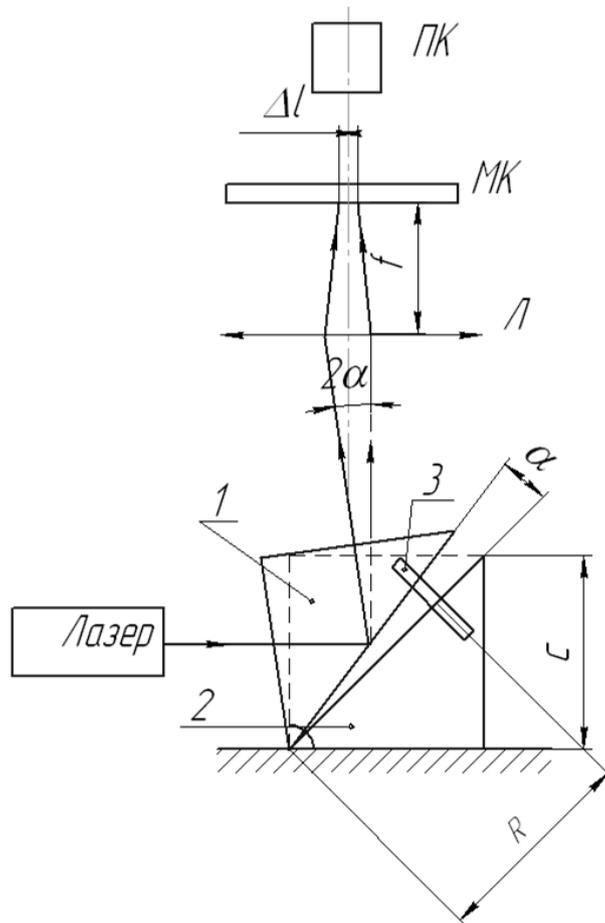


Рис 1. Разрезной оптический резонатор с пьезоэлектрическим регулированием углового положения зеркал полного внутреннего отражения [2]:

1 и 2 – прозрачные призмы, образующие кубический резонатор, 3 – пьезоэлемент

Излучение от гелий-неонового лазера попадает на катетную грань одной из призм и затем отражается от гипотенузной грани. Далее оно фокусировалось с помощью линзы на поверхность матрицы телевизионной камеры. Полученное изображение обрабатывалось с помощью компьютера.

Рассмотрим требования, накладываемые на точность изготовления кубического резонатора. Использование резонатора в качестве узкополосного фильтра предполагает настройку интерферометра на интерференционную полосу бесконечной ширины, погрешности изготовления приведут к уменьшению интенсивности проходящего света. Допустимое отклонение от параллельности зеркал двухзеркального многолучевого интерферометра определяется формулой [3]:

$$\frac{\Delta h}{\lambda} \leq \frac{1}{2N_{эф}}, \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны, $N_{эф}$ – эффективное число отражений, выражение $1/(2N_{эф})$ имеет смысл изменения порядка интерференции на 0,5 вследствие

погрешности изготовления одного зеркала. В случае кубического резонатора формула (1) также применима. Если погрешность сводится к не параллельности зеркал, то в случае кубического резонатора под величиной $\Delta h / \lambda$ необходимо понимать результат суммарного воздействия на световую волну погрешностей всех зеркал резонатора с учётом знаков погрешностей. Оценки показывают величину допустимых угловых погрешностей не более 0,01 угл. сек., тогда как изготовители призм обеспечивают погрешности порядка десятков – единиц угл. сек.

С целью экспериментальной отработки методики компенсации угловых погрешностей изготовления кубического резонатора разработан и исследовался макет разрезного резонатора из двух призм, угловое положение одной призмы относительно другой изменяется с помощью пьезоэлементов.

Изменение угла отклонения луча при изменении положения призмы определяется формулой:

$$2\alpha = \frac{\Delta l}{f},$$

где Δl – смещение луча лазера при подачи напряжения, f – фокусное расстояние линзы L .

Подача напряжения U на пьезоэлемент с поперечным пьезоэффектом приводит к изменению угла α между гипотенузными гранями призм на величину [4]:

$$\alpha = d_{31} U \frac{\Delta l}{R} \frac{l}{d},$$

где α – угол расходимости, R – расстояние от ребра кубика до пьезоэлемента.

Изменение угла отражения от призмы измерялось по изменению положения сфокусированного лазерного луча на матрице ПЗС-приёмника телевизионной камеры VEC-545-USB (5 млн. пикселей); в качестве источника зондирующего луча применён гелий-неоновый лазер ЛГН-207А.

Полученное с помощью камеры изображение обрабатывалось с помощью программы, созданной в среде Matlab. Координаты пятна (изображения фокальной области луча) рассчитывались, как для геометрического центра пятна излучения лазера.

Разброс измеренных значений в пикселях по четырём измерениям относительно среднего составил около 1/3 пикселя, что соответствует 1 мкм в пространстве, (погрешности определения углового положения луча 0,005 мрад).

Результаты измерений углов отклонения, рассчитанные по формуле (1) по значениям Δl при разных значениях напряжения на пьезоэлементе, представлены на рис. 2. Значение пьезомодуля пьезоэлемента составляло $1,41 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н.

Основываясь на рис. 2, можно найти, что погрешность определения угла составила 0,1 угл. сек.

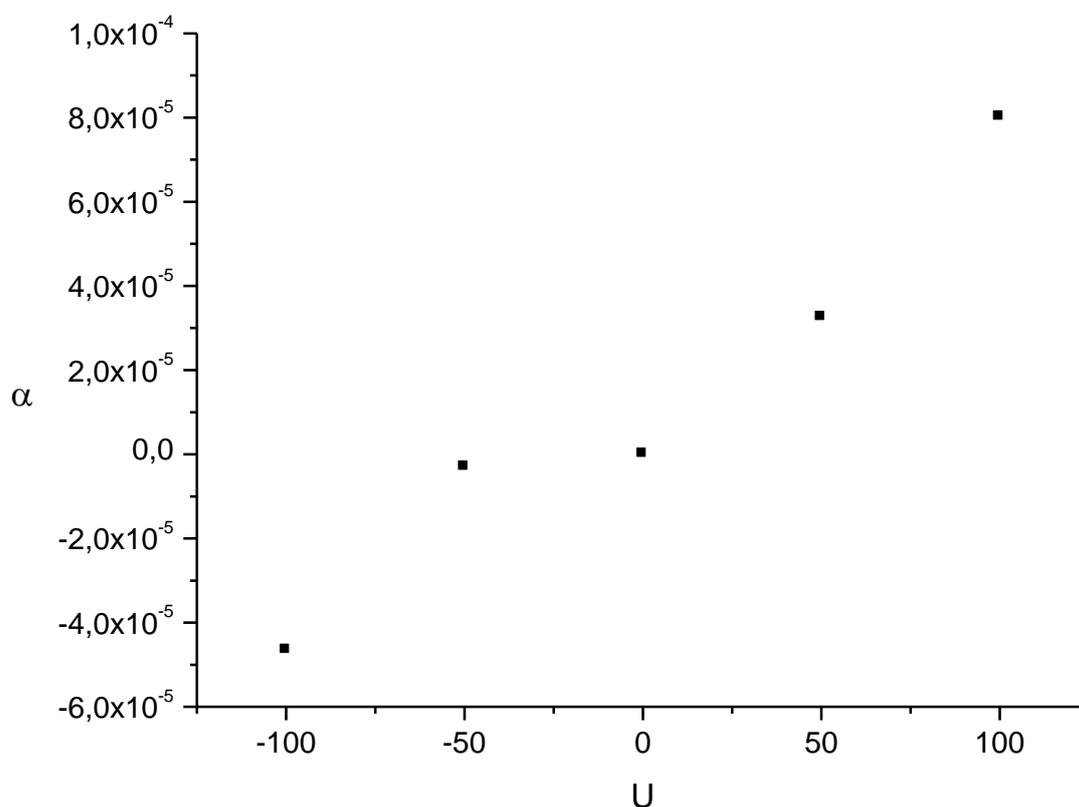


Рис. 2. Зависимость угла отклонения луча от напряжения, подаваемого на пьезоэлемент

Точность результата может быть увеличена в десятки и более раз в случае использования метода, предложенного в работе [5] и позволяющего определять координаты центра пятна как энергетического центра (с учётом взвешенных коэффициентов для пикселей фотоприёмной матрицы).

Как представляется авторам, рассматриваемый метод позволит компенсировать непараллельности сторон оптического резонатора с требуемой точностью порядка 0,01 угл. сек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ищенко Е.Ф. Открытые оптические резонаторы. – М.: Советское радио, 1980.
2. Чесноков В.В., Сырнева А.С., Чесноков Д.В. Оптические резонаторы полного внутреннего отражения с бегущей волной // Материалы X международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2010 (Россия, Новосибирск, 22–24 сентября, 2010), Т.2. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С.95–97.
3. Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. - М.: Машиностроение. 1989.
4. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006.
5. Грицкевич Е.В. Минимизация погрешности измерений оптико-электронного координатного датчика // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 18-20.

© А. С. Сырнева, В. А. Райхерт, 2014

ДАТЧИК АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ ДЛЯ КРУГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

Александр Григорьевич Верхогляд

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, заведующий лабораторией, тел. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Марина Андреевна Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.ru

В статье представлены результаты программного моделирования датчика положения для автоматической фокусировки излучения в круговых лазерных записывающих системах и результаты его использования для изготовления бинарных линз на криволинейных поверхностях.

Ключевые слова: датчики положения, круговые лазерные записывающие системы.

SENSOR OF AUTOFOCUS FOR CIRCLE LASER WRITING SYSTEM

Aleksander G. Verkhoglyad

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Head of Laboratory, tel. (383)306-58-68, e-mail: verhog@tdisie.nsc.ru

Marina A. Zavjalova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Junior Researcher, tel. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Viktor P. Korolkov

Institute of Automation and Electometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1, Akad. Koptuyug pr., Ph. D., Senior Researcher, tel. (383) 3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.ru

The article presents the results of simulation software encoder for automatic focusing of laser radiation in a circle laser writing system and the results of its use for the manufacture of binary lenses on curved surfaces.

Key words: encoders, circle laser writing system.

Важной задачей при создании лазерных технологических комплексов является прецизионное позиционирование рабочих элементов – микрообъективов, сканирующих зондов и др. Для этого в состав комплексов вводятся датчики положения с обратной связью, позволяющие удерживать рабочие элементы на определенном расстоянии от поверхности обрабатываемых материалов [1]. Так, в составе круговой лазерной записывающей системы [2] для синтеза микрорельефа дифракционных оптических элементов на криволинейных поверхностях используется датчик автоматической фокусировки, который позволяет производить автоматический поиск поверхности, на которой производится запись изображения, её захват и последующее удержание в зоне наилучшей фокусировки микрообъектива. Целью данной работы является программное моделирование, расчет и оптимизация оптической схемы датчика автоматической фокусировки для работы по криволинейным поверхностям.

Рассмотрим принцип работы данного датчика на оптической схеме, изображенной на рисунке 1. Световой поток от полупроводникового лазера ($\lambda = 0,658$ мкм, мощность 30 мВт) (1) расширяется объективом 2 ($f = 15$ мм), проходит через светоделительный кубик (3) и фокусируется микрообъективом 4 (40х, $f = 4,3$ мм) на поверхность стеклянной подложки. Отраженная от поверхности заготовки часть излучения лазера воспринимается микрообъективом 4, проходит через светоделительный кубик и фокусируется линзой 6 на чувствительную поверхность двухэлементного фотоприемника 7. Перед объективом 6 расположена непрозрачная диафрагма 5 – нож Фуко, который отсекает половину излучения. Тем самым нож Фуко вносит асимметрию (астигматизм) в схеме датчика. Если поверхность образца точно совпадает с фокальной плоскостью выходного объектива (позиция А), то отраженный световой поток направляется линзой 6 точно на границу раздела фотодиодов 7. В этом случае фототоки спаренных фотодиодов будут равны и на выходе фотоприемника 7 нулевой разностный сигнал, который определяется по формуле:

$$I_{\text{раз}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}. \quad (1)$$

Далее возможны два варианта – в первом случае поверхность смещена на расстояние $-\Delta z$ от фокуса (позиция А'), во втором случае – на расстояние $+\Delta z$ (позиция А''). В зависимости от знака смещения отраженные лучи a' и a'' будут выходить под некоторым углом и фокусироваться либо на верхнюю K_1 половину фотоприемника, либо на нижнюю – K_2 . На выходе датчика появится разностный сигнал, знак которого однозначно связан с направлением расфокусировки. Отраженный от поверхности в позиции А' луч a' после микрообъектива 4 будет расходящимся. Он пройдет элементы 3 и 6 и сфокусируется на верхнюю половину фотоприемника K_1 . Луч a'' , отраженный от поверхности в позиции А'' будет сходящимся, он сфокусируется на нижнюю K_2 . В качестве меры измерения расстояния до объекта используется неравномерность распределения интенсивности отраженного света, попадающего на двухэлементный фотоприёмник.

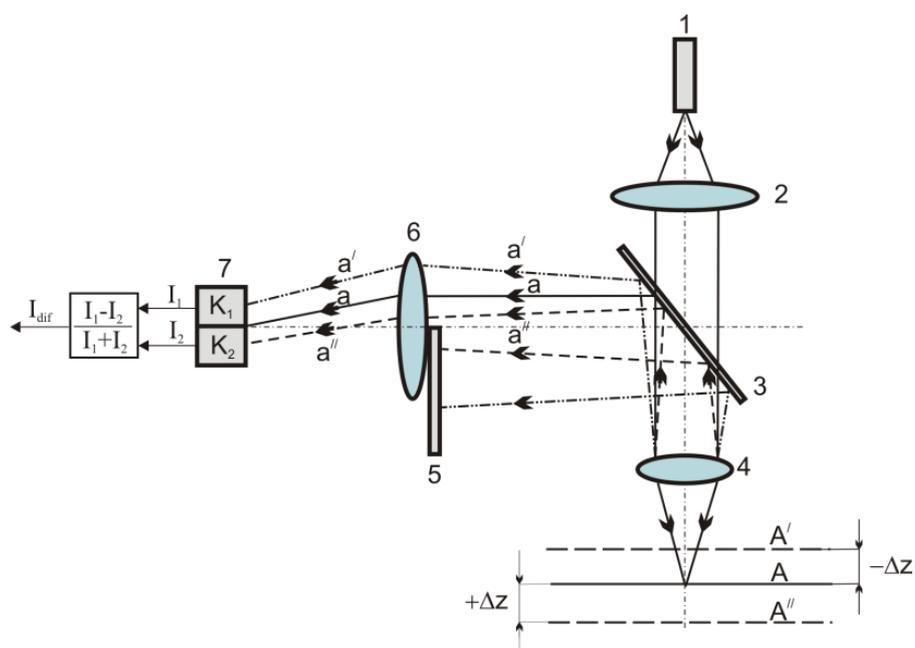


Рис. 1. Оптическая схема датчика на принципе астигматических пучков

Расчет и моделирование данного датчика были проведены в программном пакете для расчета оптических систем Zemax. Модель двухэлементного фотоприемника была реализована путем специальной программной расшивки дифракционного изображения (рис. 2). Обработка данных позволила построить аналитическую модель разностного сигнала $I_{раз}$ (рис. 3).

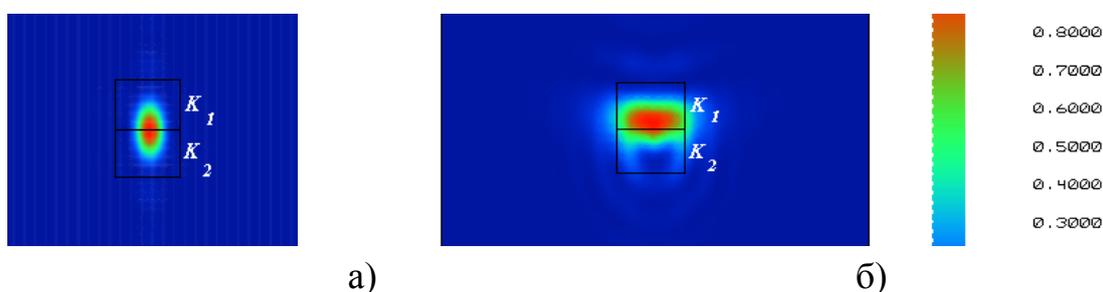


Рис. 2. Дифракционные изображения пятна в плоскости двухэлементного фотоприемника при нулевой расфокусировке (а) и при расфокусировке – 6 мкм (б)

В результате моделирования были выявлены параметры для оптимизации рабочего диапазона L (рис. 2) такого датчика. Важным параметром является положение ножа Фуко между объективом 6 и фокусирующим микрообъективом 4. При больших смещения поверхности в направлении от микрообъектива $+\Delta z$ луч a'' после объектива 6 может сфокусироваться в плоскости ножа Фуко и далее – на верхнем квадранте K_1 . Это приведет к ошибочному определению

направления смещения, поскольку в этом случае I_1 будет больше I_2 . Поэтому для увеличения рабочего диапазона нож Фуко нужно располагать как можно ближе к микрообъективу, либо уменьшать расстояния между объективом 6 и микрообъективом 4. Например, расчеты показали, что при уменьшении этого расстояния со 180 мм (такое расстояние изначально было заложено при проектировании круговой лазерной записывающей системы) до 50 мм рабочий диапазон L увеличивается в 10 раз (с 20 мкм до 200 мкм).

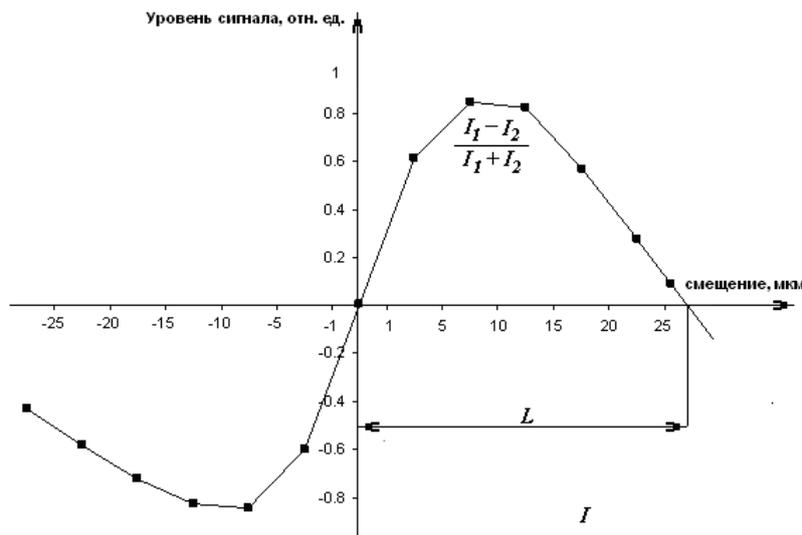


Рис. 3. График зависимости сигнала на двухэлементном фотоприемнике от смещения поверхности

Расчеты показали, что большое влияние на результат измерения оказывает наклон поверхности, по которой производится запись. Были проанализированы графики зависимости разностного сигнала $I_{\text{раз}}$ при смещении поверхностей с разными углами наклона. В результате выявлен критический угол наклона для сферы радиусом 338 мм и диаметром 100 мм, равный 8° , при котором происходит инверсия разностного графика. Это даёт ошибочный сигнал смещения поверхности, при котором датчик автофокусировки срабатывает неправильно и возможно столкновение рабочего микрообъектива и поверхности заготовки. Так же при наклоне поверхности уменьшается рабочий диапазон смещений L (при угле наклона 8° – более чем в два раза).

Датчик автоматической фокусировки вошел в состав коммерческой модели круговой лазерной записывающей системы, разработанной для Харбинского Технологического института (Китай) в 2011 году. В результате тестирования данной системы были получены следующие основные характеристики: рабочее поле 250 мм, пространственное разрешение до 1000 линий / мм, разрешение по радиальной координате не хуже 1 нм, по угловой – не хуже $0,25''$, диапазон перемещения на вертикальных координат до 25 мм, ошибка датчика автофокусировки 0,05 мкм, максимальный угол наклона криволинейной поверхности 8° . Эта система позволяет формировать дифракционные элементы, компьютерно-

синтезированные голограммы, решетки, а также различные фотошаблоны произвольной топологии на плоских и аксиально-симметричных криволинейных поверхностях. В качестве примера использования такой системы была изготовлена бинарная линза, в результате тестирования которой установлено, что ошибка ее волнового фронта не превышает $\lambda/100$. На рис. 4 представлены пример интерферограммы бинарной линзы (размеры 1, 2, 3 зоны, соответственно, 0,5; 0,7; 0,8 мм), записанной на сферической поверхности (радиус кривизны – 338 мм, диаметр – 100 мм).

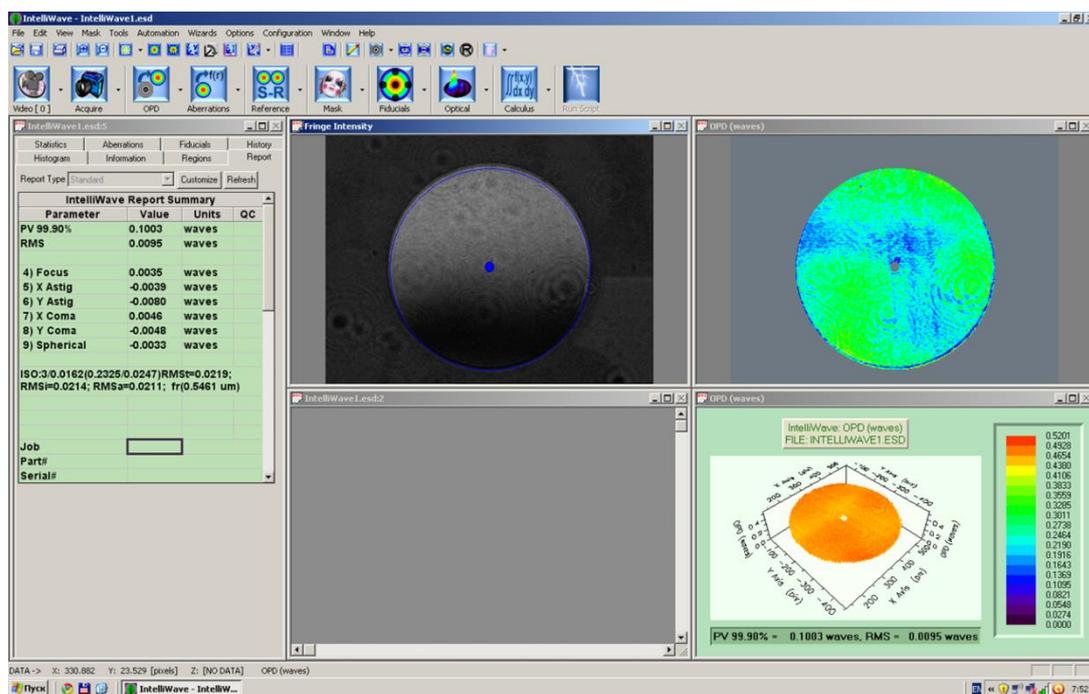


Рис. 4. Интерферограммы бинарной линзы

Таким образом, в ходе данной работы получена аналитическая модель разностного сигнала на выходе двухэлементного фотоприемника путем расшифровки дифракционного изображения, полученного в результате расчетов в программе Zemax. Выявлены критичные параметры и проведена оптимизация оптической схемы датчика автоматической фокусировки. Показана возможность увеличения рабочего диапазона в 10 раз при уменьшении расстояния между фокусирующим микрообъективом и объективом, строящим изображение пятна в плоскости двухэлементного фотоприемника. Разработан и экспериментально апробирован датчик для автоматической фокусировки рабочего лазерного излучения на криволинейных плоскостях. Проведено экспериментальное исследование возможностей такого датчика вкпе с датчиком перемещения и угловым датчиком, входящими в состав круговой лазерной записывающей системы. Изготовлены бинарные линзы на сферической заготовке с радиусом кривизны 338 мм, получена ошибка волнового фронта $\lambda/100$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 397 с.
2. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P., Kharissov A. A., Cherkashin V. V., Kiryanov V. P., Kiryanov A. V., Kokarev S. A., and Verhoglyad A. G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Applied Optics*. – 1999. – Vol. 38. – N 8. – P. 1295–1301.

© А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, В. П. Корольков, 2014

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР ШТОРМГЛАССА В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРА ПРИЗЕМНЫХ БАРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ И ФРОНТОВ

Владимир Иванович Патерикин

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 1-3, тел. (383)306-61-96, e-mail: vipater@yandex.ru

Показано, что штормглас достаточно отчетливо реагирует на движение воздушных потоков с фронтами, разделяющими объемные барические образования с контрастной температурой. Форма новообразований может иметь вид кустов, плоской многослойной структуры, пучков или отдельных дендритов в виде мелких или крупных перьев, по ориентации которых можно определить направление перемещения воздушных потоков.

Ключевые слова: штормглас, движение воздушных масс, кристаллические структуры, ориентация новообразований.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE SHTORMGLASS CRYSTAL STRUCTURES AS AN INDICATOR OF SURFACE PRESSURE SYSTEMS AND FRONTS

Vladimir I. Paterikin

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630058, Russia, Novosibirsk, 41, Russkaya str., Ph. D., leader scientist, tel. (383)306-61-96, e-mail: vipater@yandex.ru

It is shown that shtormglass sharp reacts to the movement of airstreams with fronts which separate the surface pressure systems by contrast temperature. Permissible growth patterns are a bush, the flat multilayer structure, bunches or the single dendrites in the form of small or large feathers. There are reasons to believe that the airstream line can determine the orientation of dendrites.

Key words: shtormglass, crystal structures, airstream, indicator of surface pressure systems.

Введение

Отсутствие на сегодняшний день датчиков, позволяющих представлять данные в интегральном виде и в необходимом объеме о движении и перемещении воздушных масс на большой территории, существенно затрудняет решение задачи составления метеопрогноза. Возможно ли, в качестве такого датчика использовать штормглас, который достаточно хорошо известен и описывается в многочисленных литературных и интернет источниках как устройство, якобы способное служить в роли «предсказателя» погоды? В настоящей работе делается попытка ответить на этот вопрос.

Из числа наиболее значимых работ, посвященных «разбору» проблем, накопившихся вокруг штормгласа, можно назвать одну из первых публикаций в отечественной литературе В. Жвирблиса [1], а в последнее время – публикации

Б.М. Владимирского [2] и сотрудников Крымской астрофизической обсерватории [3]. По результатам наблюдений сделан вывод о возможности существования зависимости рассматриваемых параметров штормгласса от фазы солнечного 11-летнего цикла. К сожалению, в указанных работах ничего не говорится об ориентационных эффектах в изменении кристаллических образований и их связи с направлением перемещения атмосферных фронтов. Но, тем не менее, результаты, представленные в этих работах, дают достаточное основание для продолжения исследований штормгласса с целью изучения физических механизмов кристаллообразования при внешних воздействиях окружающей среды. Сложность задачи, по нашему мнению, состоит в том, чтобы отделить влияние на штормгласс собственно метеорологических атмосферных и гелиогеофизические факторов, от вызванных изменениями параметров локальной физической среды в месте расположения прибора. Например, в работах [2, 3] высота столбика кристаллических образований в ампуле штормгласса взята в качестве одного из основных индикаторов воздействия гелиогеофизических факторов. Однако по результатам наших наблюдений высота столбика новообразований может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от режима изменения окружающей температуры. В общем случае, при уменьшении комнатной температуры происходит рост, а при увеличении – растворение кристаллообразований. В целом необходимо учитывать действие одновременно двух факторов: во-первых, величину текущего уменьшения или увеличения температуры и, во-вторых, амплитуду естественных суточных изменений температуры в цикле похолодания-потепления внутри помещения. Увеличение высоты столбика может происходить за счет роста нового на вершине предшествующего образования, не полностью растаявшего, и так до нескольких слоев. При постепенном повышении температуры и относительно малых ее понижениях в течение цикла общая высота столбика с каждым днем будет уменьшаться. Таким образом, на суммарное изменение высоты кристаллообразований в склянках влияет, кроме всего прочего, тренд температурных колебаний воздушной среды за несколько предыдущих суток.

Методика и результаты исследования

Начиная с июля 2011 г. по август 2012 г., мы провели наблюдения за ориентацией новообразований в штормглассе и их общей динамикой (г. Новосибирск). Под наблюдением находились четыре образца штормгласа в стеклянных мерных пробирках диаметром 30 и высотой 250 мм (номера 7, 8, 9 и 11), изготовленные по рецептам [1]. Образцы 8, 9 и 11 содержали по 100 мл смеси растворов аптечной камфоры, калиевой селитры и хлористого аммония в пропорции 4-3-2 соответственно (образец 7 содержал 100 мл смеси в пропорции 4-1-1). Для краткости все образцы штормглассов будем называть «склянками» с указанием, по мере необходимости, их номера.

Склянки установлены на подоконнике на деревянной подставке в один ряд на расстоянии 100 мм друг от друга и в 200 мм от оконного стекла. Окно в пла-

стиковой раме ориентировано на северо-запад и прямыми солнечными лучами не освещается. На каждой из склянок установлена метка, которая позволяет однозначно устанавливать ориентацию склянок по сторонам света.

Основной задачей являлось исследование пространственной ориентации кристаллических структур в качестве индикатора направления перемещения атмосферных воздушных масс, поэтому необходимо было устранить влияние на склянки локальных конвективных и любых других воздушных потоков внутри помещения. Для этого все склянки были закрыты картонными или металлическими цилиндрическими экранами-тубусами. Кроме того один из тубусов постоянно вращался (5 оборотов в минуту). Металлический экран заземлялся.

Каждая из склянок фотографировалась один раз в сутки в 8-00 часов в 4-х положениях: 1 и 2 – вся целиком - в направлении с юга на север (ю→с) и с запада на восток (з→в); 3 и 4 – только верхней части склянок в направлении с юга на север и с запада на восток соответственно. Первые два снимка использовались для сравнительного анализа изменения высоты столбиков в склянках за все периоды наблюдений и в связи с их ориентаций по сторонам света. 3 и 4-й снимки представляли изображение кристаллических структур в том виде, в каком они сформировались за прошедшие сутки в ориентациях (ю→с) и (з→в) и предназначались для последующей детальной проработки.

Для окончательного анализа были взяты результаты наблюдения, полученные за период с 1 марта по 31 августа 2012 г., в примерно одинаковых условиях содержания склянок, в том числе и при включенном кондиционере.

По показателям внешней среды велись ежедневные записи по следующим параметрам:

1. Атмосферное давление и температура в месте расположения склянок и снаружи помещения.

2. Синоптические параметры воздушной среды на территории Западной Сибири: по картам распределения температуры, осадков и состояния облачности, направления и перемещения фронтов воздушных масс, картам скорости ветра и направления перемещения воздуха в приземном слое – по данным электронных ресурсов: <http://www.meteonovosti.ru>, <http://www.gismeteo.ru> и др.

3. Визуальное наблюдение и описание кристаллических новообразований: высота, размеры, характерное расположение и направление структур в склянке по сторонам света.

4. Погода на месте: облачность, осадки, направление перемещения облаков, приземного ветра и скорость перемещения.

За период наблюдений и в результате анализа около 480 образцов кристаллических образований в сопоставлении с синоптическими данными сформировалось следующее представление о возможности использования штормгласса в качестве индикатора:

1. Активная среда штормгласса достаточно отчетливо реагирует на движение воздушных потоков с фронтами, разделяющими контрастные и объемные барические образования. Форма новообразований может иметь вид кустов,

пучков или отдельных дендритов в виде мелких или крупных перьев, собранных в пучок, или в виде многослойной плоской структуры. Но в любом случае, если происходит движение воздушных масс, по их ориентации можно определить направление перемещения.

2. При приближении фронта с холодной областью рост кристаллических образований происходит наиболее интенсивно. В склянках формируются кусты и пучки дендритных образований, прижатые к стороне склянки, которая обращена навстречу холодному фронту. Дендриты и перья в целом направлены от стенки снизу вверх и в сторону - по ходу движения фронта.

3. При приближении фронта с теплой областью рост кристаллических образований практически прекращается. Могут образоваться полупрозрачные мелкие структуры с ориентацией в обратную от движения фронта сторону.

4. В ситуации, когда место наблюдения оказывается в центре обширного антициклона, в склянках образуются кусты и пучки новообразований, направленные вертикально или не имеющие какой-либо определенной ориентации.

В качестве примера можно рассмотреть ситуацию с реакцией склянок на перемещение воздушных потоков, происходивших в период с 23 по 24 апреля 2012 г. В ночь с 23-го на 24-е апреля теплый воздушный поток сменился холодным. Воздушные потоки и разделяющая их граница 23-го апреля перемещались с северо-запада на юго-восток, совершая вращательное движение против часовой стрелки в регионе с радиусом 650-700 км, а затем 24-го апреля ведущий воздушный поток изменил направление на западное.

Рост кристаллических образований в виде кустов и перьев во всех склянках с вечера 23-го на утро 24-го составил в среднем 30-35 мм. Новые кусты, образовавшиеся в склянках, прижаты к северо-западной и западной стороне склянок – навстречу атмосферному фронту (кроме №11, в которой пучки прижаты к юго-восточной стороне, но их ориентация – как у остальных). Направление перьев – дендритов снизу вверх с ориентацией на юго-восток и восток, то есть по ходу движения воздушных потоков.

На рис. 1 сверху над фотографиями большими стрелками показано направление перемещения фронтов атмосферных потоков, внизу - фотографии кристаллических образований в склянках: тонкими стрелками отмечены направления съемок изображения - вид с юга на север – «ю→с» и вид с запада на восток – «з→в».

По состоянию ориентации перьев и кустов новообразований, произошедших в склянках за период с 23 по 24 апреля, можно сделать вывод о том, что формирование структур, по всей вероятности, происходит под воздействием прифронтальной массы воздушного потока, а не той его части, что находится вблизи места наблюдения. Кроме того на фото склянок хорошо видно, что в них образовалось по два пучка с различной ориентацией перьев в соответствии с тем, что за истекшие сутки произошло изменение направления движения потока с северо-западного на западное.

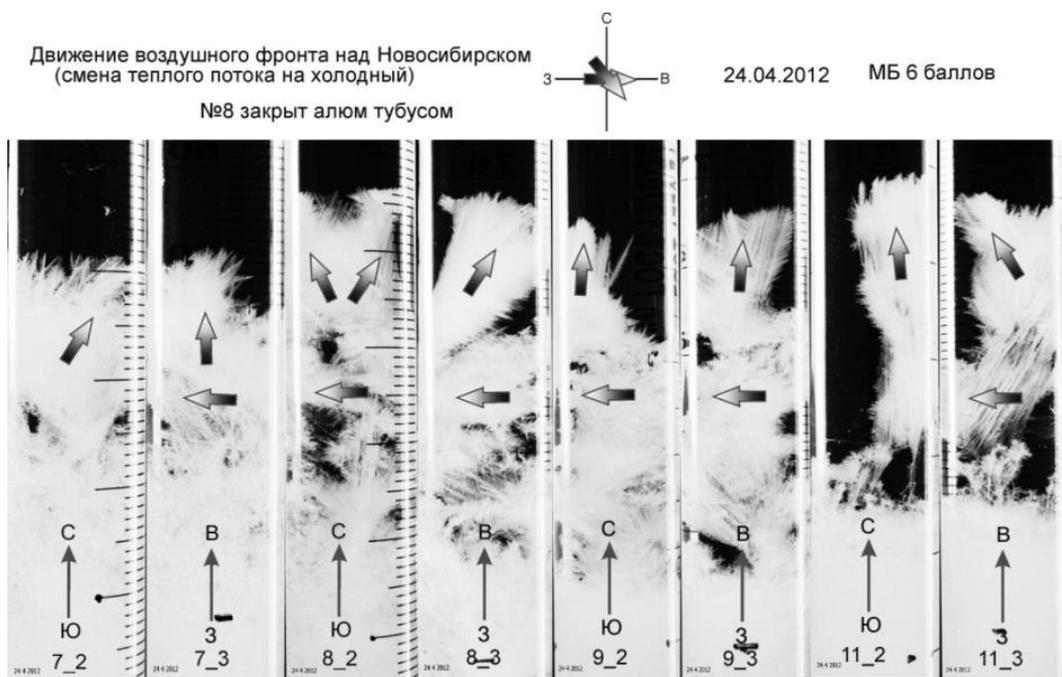


Рис. 1. Фото склянок №№ 7, 8, 9 и 11 по состоянию на 24 апреля 2012 г.

Заключение

1. Феномен ориентации кристаллических структур практически всегда присутствует, если в период наблюдения имеют место суточное циклическое колебание температуры внутри помещения с амплитудой в несколько градусов и перемещение атмосферного воздушного фронта. Размеры вновь образовавшихся кристаллических структур и их ориентация определяются контрастностью температуры на границе фронта и направлением движения барических образований.

2. Требуется продолжение изучения возможных корреляционных связей атмосферных и гелиогеофизических параметров окружающей среды с параметрами кристаллообразования в активной среде штормгласа. От качественной оценки феномена необходимо перейти к количественной – к инструментальному наблюдению за параметрами формообразования кристаллических структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жвирблис В. Что такое штормглас // Химия и жизнь. – 1979. №6. – С. 73–76.
2. Владимирский Б. М. Загадочный штормглас и погода – земная и космическая // Пространство и время. – 2013. №2 (12). – С. 173–182.
3. Барановский Э. А., Тарашук В. П., Владимирский Б. М. Влияние солнечной активности и геофизической возмущенности на физико-химические процессы в жидкой среде: предварительный анализ показаний штормгласа // Геофизические процессы и биосфера. – 2010. Т. 9, №1. – С. 19–33.

© В. И. Патерикин, 2014

ОСОБЕННОСТИ ЦВЕТОВОЙ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ирина Георгиевна Пальчикова

ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41;

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)3065874, e-mail: palchikova@gmail.com

Евгений Сергеевич Смирнов

ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. +7(965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

Предложен и рассмотрен способ калибровки процедуры нахождения цветовых характеристик (доминирующей длины волны и насыщенности) цифровых изображений, который позволяет определять длину волны спектральных цветов образцов с точностью +2 нм.

Ключевые слова: калибровка, длина волны, цифровое изображение, цветовые характеристики.

FEATURES OF COLOUR CALIBRATION FOR MEASURING SYSTEMS

Irina G. Palchikova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya str., 41, Sc.D., Professor, tel. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com, Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Pirogova str., 2, Physical department

Evgenii S. Smirnov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, Russkaya str., 41, Junior Researcher, tel. +7(965)823-23-75, e-mail: the-first-person@yandex.ru

The calibrating method for procedure of color characteristics finding (dominant wavelength and saturation) of digital images is proposed and studied. It allows everyone to determine the wavelength of the spectral colors of samples with an accuracy of +2 nm.

Key words: calibration, the wavelength, the digital image, color characteristics.

В настоящее время в области компьютерного зрения широко обсуждаются вопросы цветового восприятия [1, 2], а методы цветовых измерений являются актуальным инструментом в ряде научно-технических задач, таких как сортировка объектов по цвету [3], определение качества мясного сырья [4], выявление сравнительных цветовых характеристики различных образцов в криминалистике [5] и т.д. Современные технологии и элементная база (лазерные полупроводниковые и волоконные в том числе источники света, современные фотоприемные матрицы с повышенной дигитализацией а так же специальные калибровочные дифракционные паттерны и тестовые цветовые атласы) позволя-

ют модифицировать цифровые колориметрические измерения и здесь крайне важно обеспечить развитие методов компьютерного зрения в приложении к задачам колориметрии.

В данной работе мы предлагаем и рассматриваем способ корректировки при вычислении доминирующей длины волны в цифровом изображении, который повышает достоверность и точность определения спектральных цветов.

Цвет – это одна из составляющих информации, хранящейся в пикселях цифрового изображения. В пикселях полутоновых цифровых изображений сохраняется единственная величина – это интенсивность (или уровень серого), в то время как каждый пиксель цветного изображения содержит три значения интенсивности в соответствии с трехкомпонентной теорией цвета [2], в которой устанавливается достаточность трёх основных цветовых компонентов для воспроизведения любого цветового оттенка. При воспроизведении или математическом описании цвета стремятся как можно более точно приблизиться к субъективному визуальному цветовому пространству, что приводит к созданию нескольких цветовых пространств и, соответственно, систем координат цветности.

В большинстве компьютерных систем цифровые изображения сохраняются в RGB- цветовом пространстве (R - красный, G - зеленый, B - голубой), где каждый пиксель содержит три целых значения в диапазоне от 0 до 255. Однако во многих прикладных задачах это RGB- цветовое пространство не отвечает заданным требованиям. Именно поэтому разработаны и применяются различные виды цветовых пространств, включая аппаратно-ориентированные, пространства, ориентированные на визуальное восприятие человека, или ориентированные на инструментальное использование.

RGB- цветовое пространство хорошо согласуется со способом фиксации изображения цифровой камерой и конструкцией цветных дисплеев. YIQ- цветовое пространство (Y яркость, I сигнал синфазный, Q – квадратурный) применяется в телевидении по стандартам M-NTSC и M-PAL для уменьшения полосы частот цветоразностных сигналов в несколько раз путём учета цветоразрешающей способности глаза. HSL (цветовой тон, насыщенность яркость) и HSV – это два наиболее распространенных цветовых пространства, ориентированных на визуальное восприятие человека, в которых цветовая модель RGB выражена в цилиндрических координатах. Эти цветовые пространства были разработаны для приложений компьютерной графики и широко применяются в редакторах цифровых фотоизображений. Цветовым пространством, адаптированным для использования в технике различными инструментами, такими как колориметры, является CIE XYZ, которое задано в строгом математическом смысле организацией CIE (Commission International de L'Eclairage) в 1931 году.

Для анализа цвета поверхностей образцов нами разработан портативный анализатор цвета [4], внешний вид которого показан на рис. 1. В качестве основного элемента измерительного блока используется цветная телевизионная камера «Видеоскан-415Ц-USB». Измерительный объем анализатора цвета определяет максимальный размер исследуемого образца, который помещается в

кювету. Кювета также выполняет функцию защитной крышки при хранении и транспортировке анализатора. При исследовании характеристик поверхности образца кювета помещается вблизи открытого торца измерительного блока, защитный корпус которого выполнен из непрозрачного материала. Для освещения исследуемого образца во время его видеосъемки камерой в измерительном блоке анализатора предусмотрено использование как внутреннего, так и внешнего осветителей, построенных на светодиодах или галогенных лампах, работающих в непрерывном или импульсном режимах. Освещение и условия наблюдения выбираются по ГОСТ Р 52489-2005 с учетом свойств испытуемого образца и информации, которую необходимо получить при измерении.

Процесс определения цветовых характеристик включает подготовку образца, получение и регистрацию изображения образца с помощью цифровой камеры, преобразование изображения в цифровой формат для дальнейшего использования в компьютере и последующую обработку файла по алгоритмам, выделяющим цветовые характеристики и критерии качества.

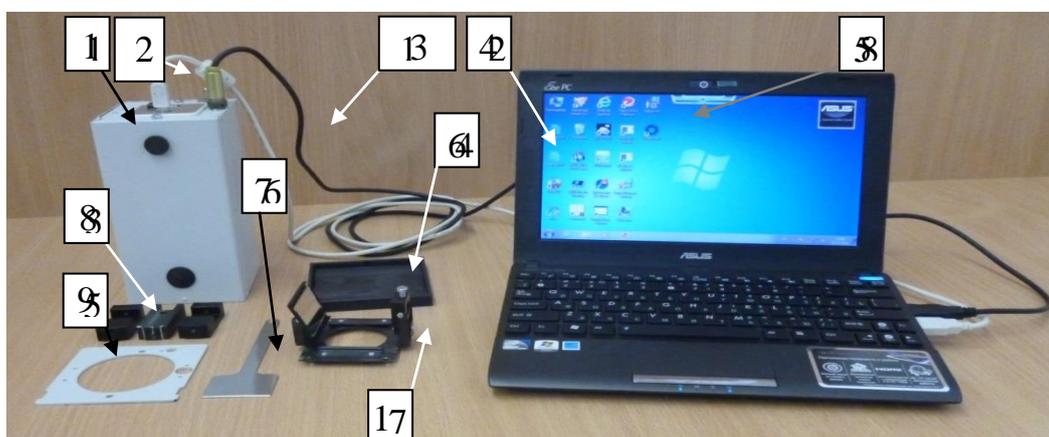


Рис. 1. Внешний вид портативного анализатора цвета:

1 – измерительный блок; 2 – кабель USB; 3 – кабель питания внутреннего осветителя; 4 – компьютер; 5 – ярлык программы VT; 6 - кювета для исследуемого образца; 7 – лопатка; 8 - сменные стойки; 9 - сменная верхняя крышка защитного корпуса; 10 – кронштейн световода внешнего осветителя

Основной функцией программы VT является вычисление значения доминирующей длины волны и насыщенности для каждой точки изображения (пикселя) на основе значений ее цветовых координат (R, G, B). Оператор может с помощью курсора мыши выбрать какой-либо пиксель и получить все его характеристики. Кроме того, программа позволяет получить усредненные оценки изображения, как по всему кадру, так и по какой-либо выделенной части кадра.

Доминирующая длина волны и насыщенность (s) для каждой точки изображения (пикселя) вычисляются с использованием спектрального локуса [1]. Цветности реальных излучений ограничены на диаграмме цветности кривой спектральных цветов (локусом) и линией пурпурных тонов, замыкающей крас-

ный и синий концы локуса. Каждый из цветов локуса характеризуется собственной длиной волны (λ). Точки внутри локуса представляют собой смесь цветов, которая характеризуется доминирующей длиной волны (λ_d) и насыщенностью ($0 < s < 1$). Для определения λ_d и s , кроме цветовых координат текущего пикселя, необходимо знать цветовые координаты осветителя, которые в нашем случае задаются пользователем как равноэнергетический белый цвет E ввиду того, что доминирующая длина волны определяется каждый раз для изображения объекта, нормированного на фон, например, белую матовую бумагу.

После подсчета средних значений яркости пикселей R, G, B- компонент по каждому выделенному участку подсчитываются значения X, Y, Z координат по формулам [2]:

$$X = 2,7687 \cdot R + 1,7516 \cdot G + 1,1301 \cdot B;$$

$$Y = 1 \cdot R + 4,5904 \cdot G + 0,0601 \cdot B;$$

$$Z = 0,0565 \cdot G + 5,5939 \cdot B.$$

Значения координат цвета x , y определяются по формулам [6]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}.$$

Насыщенность рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$N = \frac{\sqrt{(x_{src} - x)^2 + (y_{src} - y)^2}}{\sqrt{(x_{src} - W_x)^2 + (y_{src} - W_y)^2}},$$

где x_{src} и y_{src} – координаты цветности источника, W_x и W_y – координаты цветности доминирующей длины волны, полученные в точке пересечения цветового локуса с прямой, соединяющей точку источника (x_{src} , y_{src}) с точкой цвета (x , y) измеренного объекта.

Для определения параметров эффективной передачи цвета используются эталонные атласы цветов. Целью данной работы было повышение достоверности и точности определения спектральных цветов, а не достижение какого-либо визуального эффекта. Поэтому мы изготовили цветовой атлас спектральных цветов по значениям RGB, рассчитанным программой Spectra [7]. Печать производилась с помощью принтера Epson R270 Photo чернилами Epson Claria Photographic Ink. Настройки печати выставлены вручную, ICC-профиль рекомендован производителем бумаги для данного принтера. Бумага матовая мелованная. Используемый диапазон длин волн: 380 – 645, 705 – 780 нм, с шагом 1-5 нм.

С помощью изготовленного цветового атласа была исследована цветопередача и возможности применения камер EVS и Canon EOS 500D в цветоизмерительных системах. Зарегистрированные изображения цветочных элементов атласа попиксельно нормировались на изображение фона (белая матовая бумага), съемка которого осуществлялась предварительно. По изображению производились вычисления доминирующих длин волн. Результат представлен на рис. 2.

Камеры значительно отличаются по своим характеристикам, тем не менее, ход сплошных кривых на графиках на рис. 2а и 2б практически совпадает. Линии 2 показывают характеристику в случае «идеальной» цветопередачи.

Мы предлагаем внести поправочные коэффициенты в расчет доминирующей долины волны таким образом, чтобы эти две линии сблизилась. Способ внесения поправки очевиден из вида графика. Так, прибавляя к ординатам точек кривой 1 некоторое значение поправки, всегда можно получить точки, близкие к линии 2. График для вносимых поправок в зависимости от доминирующей длины волны представлен на рис. 3. Вариация значений поправок составляет от +6 до -12% в видимом диапазоне. Представленные значения поправок находились путем усреднения по многим цифровым изображениям.

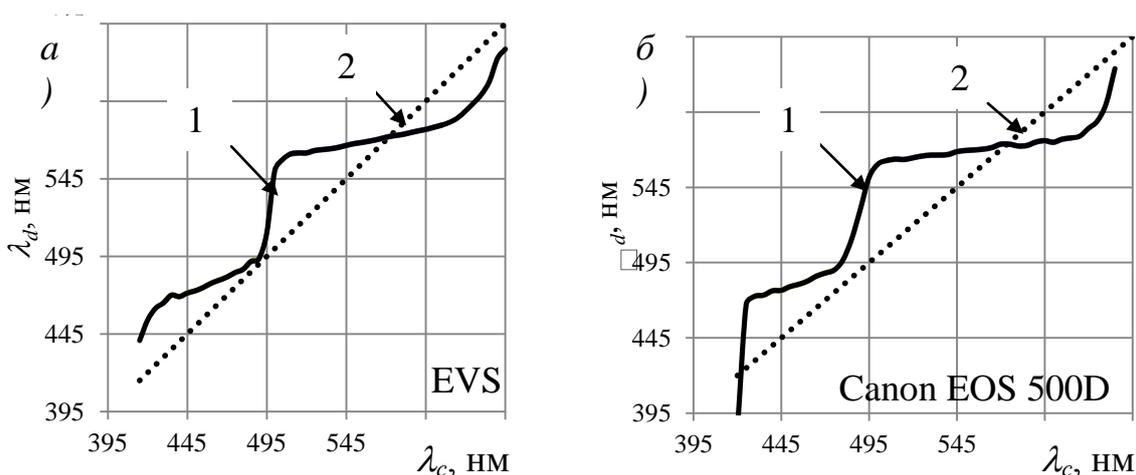


Рис. 2. Экспериментальные характеристики

Доминирующая длина волны λ_c цветового элемента атласа отложена вдоль оси ОХ, доминирующая длина волны λ_d , вычисленная в программе VT по изображению цветочного элемента атласа отложена вдоль оси ОУ. Сплошная линия 1 – результаты цветопередачи, полученные в эксперименте. Точечная линия 2 – характеристика при «идеальной» цветопередаче.

Из рис. 3 следует, что поправки близки для обеих камер и ход кривых одинаков. Несмотря на схожесть графиков, стоит отметить, что отношение сигнал/шум для камеры Canon EOS составляет $\cong 300$ дБ без усреднения по изображениям, а для камеры EVS $\cong 16,2$ дБ с усреднением значений яркости по тридцати изображениям.

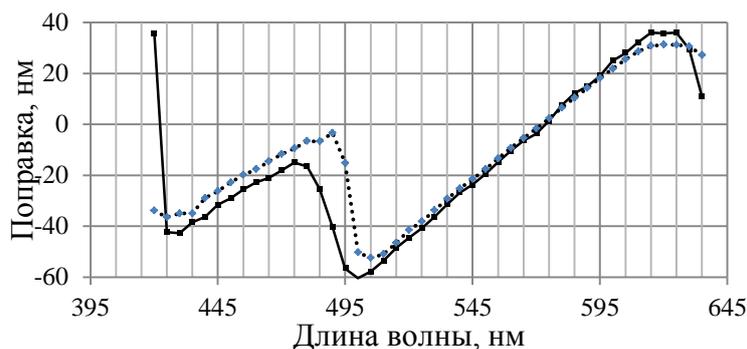


Рис. 3. Поправочные значения для доминирующей длины волны изображения

На величину поправок и на форму графика коррекции (рис. 3) в значительной степени влияет форма локуса₁₀. С шагом 0,1 нм по длинам волн был построен и исследован локус₁₀ (рис. 4). Длина волны, на которую приходится минимальная поправка (496,2 нм, рис. 3) – суть точка, в которой угол γ между касательной к локусу₁₀ и осью абсцисс составляет 90° и в этом месте происходит разрыв в зависимости угла γ от длины волны. Мы так же находили координаты источника света на локусе Планка в зависимости от длины волны элемента атласа. Мы обнаружили, что не существует единственного источника света для всех элементов одновременно. Этот факт и является причиной недостоверности в вычислении доминирующей длины волны для элемента с произвольным цветом в видимом диапазоне. Предлагаемый способ коррекции позволяет учесть и исключить обнаруженную неточность путем задания координат источника света в точке равноэнергетической яркости и использования изображений, нормированных на изображение фонового элемента. Точность определения доминирующей длины волны цвета образца с коррекцией составила +2 нм (рис. 5).

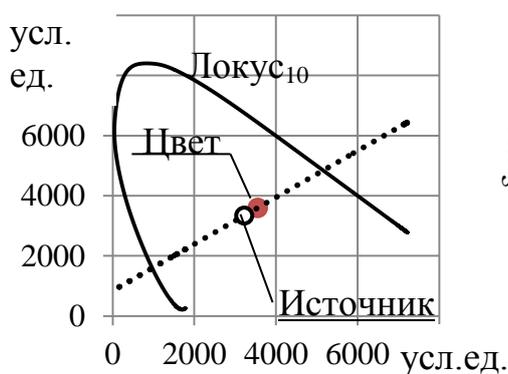


Рис. 4. Способ определения длины волны

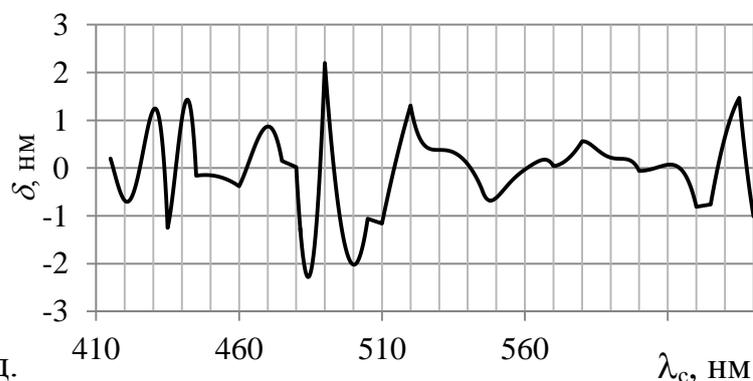


Рис. 5. Зависимость $\delta = \lambda_d - \lambda_c$ от длины волны λ_c

Таким образом, обоснована необходимость проведения калибровки цифровых измерительных колориметрических систем и уточнения алгоритма расчета доминирующей длины волны. Показано, что разработанный способ расчета поправок в значения доминирующих длин волн цифровых изображений позволяет повысить достоверность и точность определения спектральных цветов до значения + 2 нм. На Рис. 5 показано отличие δ экспериментально найденной доминирующей длины волны цветовых элементов атласа от номинального её значения. Методы компьютерного зрения расширяют области применения колориметров, не ограничивая их только измерением концентраций веществ (красителей) в растворах. Увеличение точности определения доминирующих длин волн в изображении позволяет использовать полученные значения для оценки не только визуальных сравнительных характеристик образцов, но и, например, расчета расстояния до образца в специальных применениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-08-00396-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Луизов А.В. Цвет и свет // Л.: Энергоатомиздат, 1989. - 256 с.: ил.
3. Завьялова М.А., Обидин Ю.В. Быстродействующий колориметрический метод для автоматической классификации алмазов по цвету // Вестник СГГА. –2010. – Вып. 2(13) – С.101 – 106.
4. Алейников А.Ф., Пальчикова И.Г., Обидин Ю.В., Гляненько В.С., Смирнов Е.С., Чугуй Ю.В., Швыдков А.Н. Установки для экспресс-оценки свежести мяса // Достижения науки и техники АПК. – 2013– № 4.– С. 74-77.
5. US National Library of Medicine National Institute of Health: [сайт]. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>.
6. ГОСТ 7721-89. Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка. // Москва: Государственный комитет по стандартам. Издательство стандартов, 1989: [сайт]. URL: <http://standartgost.ru/ГОСТ%207721-89>.
7. Efg's Computer lab: [сайт]. URL: <http://www.efg2.com/Lab/ScienceAndEngineering/Spectra.htm>.

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, 2014

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОКАНАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ НА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Виктор Павлович Бессмельцев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, кандидат технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)335-64-87, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Евгений Дмитриевич Булушев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, аспирант, тел. (383)335-64-87, e-mail: e.d.bulushev@gmail.com

Исследованы методы восстановления 3D геометрии объектов, полученных в процессе фемтосекундной лазерной записи на оптически прозрачных материалах, и измерения их геометрических параметров. Для измерений используется конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, при этом объект предварительно покрывается тонким слоем флуорофора. Для восстановления 3D геометрии по стеку изображений оптического среза разработан адаптивный пороговый алгоритм на основе метода центра масс. Для определения ширины и шероховатости микроканалов разработан адаптивный статистический алгоритм.

Ключевые слова: конфокальная микроскопия, флуоресцентная микроскопия, фемтосекундная лазерная микрообработка, обработка изображений.

METHOD FOR MEASURING OF MICROCHANNELS FORMED BY FEMTOSECOND LASER ON OPTICALLY TRANSPARENT MATERIALS

Victor P. Bessmeltsev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, 1 Acad Koptuyuga Pr., Ph. D., head of laboratory, tel. (383)335-64-87, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Evgeny D. Bulushev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, 1 Acad Koptuyuga Pr., Ph. D. student, tel. (383)335-64-87, e-mail: e.d.bulushev@gmail.com

Methods for 3D reconstruction and measurement of micro objects, formed by femtosecond laser on optically transparent materials, have been investigated. We found that covering substrate with thin layer of fluorophore and measuring it with confocal laser scanning microscope gives promising results. The adaptive threshold algorithm based on center mass method was developed for 3D reconstruction of topography of objects from images of optical sections. For obtaining width and roughness of microchannels the adaptive statistical algorithm was developed.

Key words: confocal microscopy, fluorescence microscopy, femtosecond laser micromachining, image processing.

Фемтосекундная лазерная микромодификация оптически прозрачных материалов позволяет создавать микроструктуры с измененными физическими свойствами на поверхности и в объеме прозрачных диэлектриков [1; 2]. В отличие от обработки наносекундными и пикосекундными импульсами фемтосе-

кундная поверхностная микрообработка позволяет удалять материал без плавления с незначительной тепловой модификацией вещества вне зоны обработки. При оптимальных режимах обработки данная технология позволяет создавать микроканалы на поверхности стекла с минимальными сколами вещества на границе зоны лазерного воздействия. На рис. 1 приведено изображение структуры, полученной при неоптимальном задании режима обработки, видны сколы, что определяет высокую шероховатость границы (> 1 мкм). Целью настоящей работы является разработка программно-аппаратных решений для оперативного измерения микроканалов: ширины и шероховатости их границ, что позволит оптимизировать режим лазерной микрообработки.

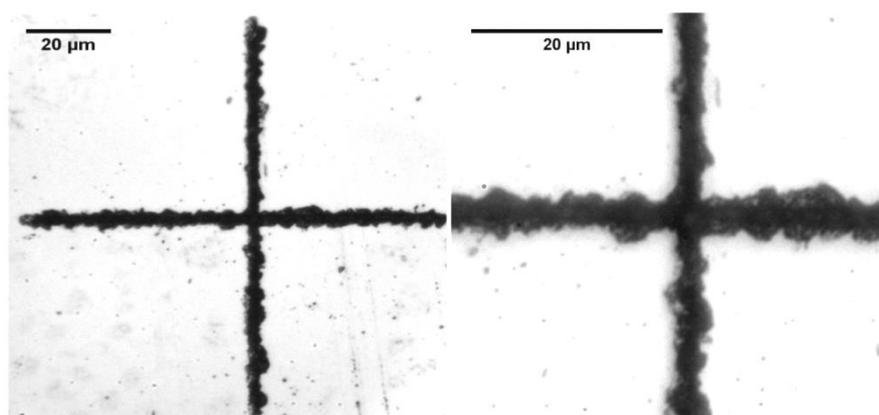


Рис. 6. Слева, тестовый объект (100×100 мкм), сформированный лазером, справа – центральная часть объекта; видны сколы и неровность границ (микроскоп Leica объектив 40x)

Измерение профиля таких объектов с субмикронным разрешением и высокой производительностью (1-5 мин.) является достаточно сложной задачей. Контактный профилометр может повредить поверхность материала и более того не позволяет измерять микровпадины меньше диаметра кончика иглы (обычно 1-5 мкм). Оптические методы могут обеспечить требуемое разрешение и производительность без разрушения поверхности, однако, вследствие ограничения входной апертуры не позволяют измерять структуры с большими локальными углами наклона (при $NA = 0.95$ больше 70 градусов), а вследствие ограничения диапазона чувствительности фотосенсора, требуют специальных программных средств при измерении объектов с высокими контрастными характеристиками [3]. Интерферометрические методы могут обеспечить высокое аксиальное разрешение (10-100 нм), однако недостаточно эффективны при измерении рассеивающих поверхностей и областей с большими локальными углами наклона, вследствие высокой плотности интерференционной картины в таких областях. Кроме того поскольку интерферометрические методы обычно работают с источником белого света, то латеральное разрешение не превышает 0.5 мкм, как и у стандартных оптических микроскопов.

Наиболее подходящим методом измерения таких объектов, на наш взгляд, является конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Производительность сканирования достигает нескольких млн. точек в секунду; латеральное разрешение – выше 0.15 мкм, аксиальное для гладких поверхностей – 10 нм. Изображения большой площади ($> 0.1 \times 0.1 \text{ мм}^2$) формируются за счет механического сдвига объекта и программной сшивки изображений. В конфокальной микроскопии при восстановлении 3D геометрии по стеку изображений оптического среза для каждой точки сначала строится кривая аксиального отклика (интенсивность от аксиального смещения), а затем по дискретным отчетам кривой вычисляется положение максимума с субпиксельной точностью. В [4; 5] применяются алгоритмы центра масс, аппроксимации полиномами и Гауссовой кривой. При вычислении максимума используется либо все дискретные отчёты, в которых проведены измерения, либо наперед заданное небольшое число отчетов (3, 5, 7) вокруг максимума. В первом случае восстанавливаемый профиль структуры получается гладким, однако, в реальных задачах метод не обеспечивает точного определения высоты в точке, вследствие низкого соотношения сигнал-шум на концах кривой отклика. Во втором случае, вследствие использования небольшого числа отчетов, восстанавливаемый профиль сильнее зашумлен, однако среднее значение восстанавливаемой высоты точнее, чем в первом случае.

Для восстановления 3D геометрии мы реализовали адаптивный алгоритм центра масс. Для каждой кривой аксиального отклика высота вычисляется по дискретным отчетам, яркость которых выше порога равного 20% от максимального значения яркости. Предложенный алгоритм при восстановлении карты высот использует большое число точек вокруг максимума и не использует значения яркости на концах распределения, что делает его устойчивым к шумам измерений.

Мы исследовали эффективность конфокальной лазерной сканирующей микроскопии и разработанного алгоритма для измерения микроканалов, сформированных на стекле на установке Pharos 6W (Light Conversion LTD., $\lambda = 1026 \text{ нм}$, максимальная энергия импульса 200 мкДж, частота до 200 кГц, длительность импульса 232 фс). Тестовым объектом является структура, состоящая из двух направленных отрезков, пересекающихся под прямым углом. Измерения проведены на микроскопе Carl Zeiss LSM 700. На рис. 2 слева приведена карта высот структуры, восстановленная предложенным алгоритмом, и два соседних профиля микроканала в перпендикулярном направлении (смещение по направлению канала 0.5 мкм) в режиме отраженного света ($\lambda = 488 \text{ нм}$, объектив 40x 0.95 NA, стек оптических срезов получен с аксиальным шагом 0.32 мкм). Анализ профилей соседних рядов карты высот показывает, что профиль имеет множество статистических выбросов и не соответствует реальной 3D геометрии микроканала. Важно отметить, что стандартные алгоритмы восстановления 3D геометрии, встроенные в программное обеспечение микроскопа, также не позволяют извлечь достоверные данные о глубине из исходных данных измерений, что определяет тот факт, что конфокальная лазерная сканирующая микроскопия в режиме отраженного света неэффективна при измерении таких объектов.

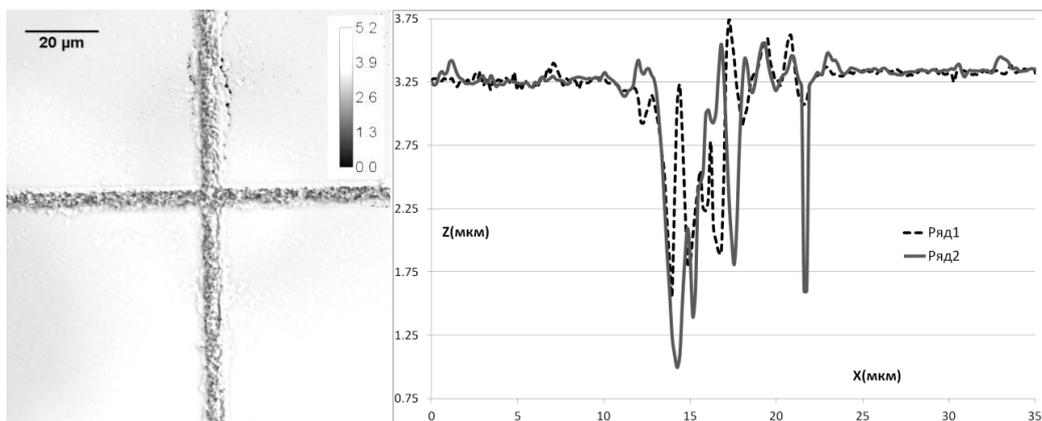


Рис. 2. Карта высот структуры, восстановленная предложенным алгоритмом, и два профиля микроканала в перпендикулярном направлении (смещение по направлению канала 0.5 мкм)

Для улучшения чувствительности метода мы нанесли на поверхность стекла тонкий слой флуорофора (< 1 мкм) и провели измерение флуоресцентного излучения. Использовался водный раствор флуоресцина, возбуждение флуоресценции проводилось лазерным излучением с $\lambda = 488$ нм, перед ФЭУ установлен низкочастотный фильтр, не пропускающий излучение с длиной волны меньше 490 нм. Получен стеку изображений оптического среза с шагом 0.13 мкм. На рис. 3 приведена 3D геометрия микроканала, восстановленная предложенным нами алгоритмом, и два соседних профиля микроканала в перпендикулярном направлении (смещение по направлению канала 0.5 мкм). Анализ профиля микроканалов показывает, что профиль гладкий и лучше соответствует Гауссовой модели распределения интенсивности пучка; т.е. боковые стенки измеряются точнее, чем в режиме отраженного света.

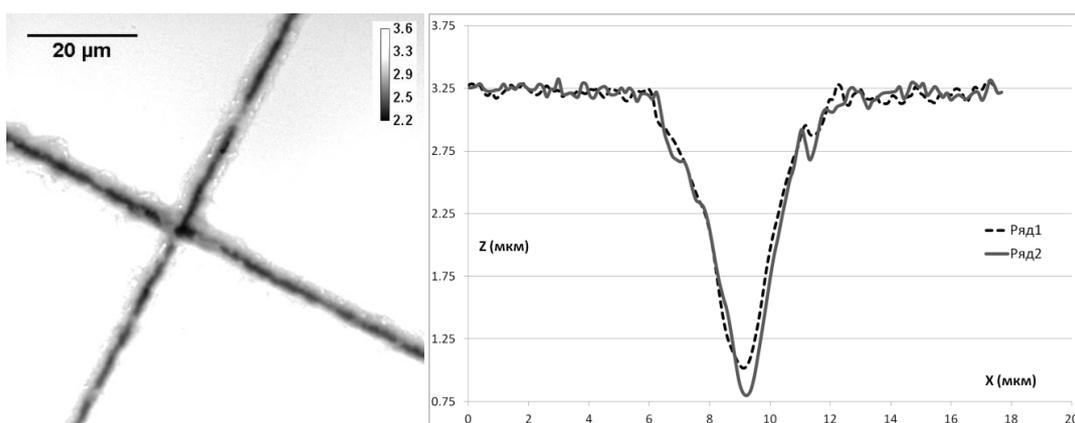


Рис. 3. Карта высот структуры, восстановленная предложенным алгоритмом, по стеку флуоресцентных изображений, и профиль микроканала в перпендикулярном направлении (смещение по направлению канала 0.5 мкм)

После восстановления 3D геометрии микроструктуры для каждого микроканала может быть автоматически извлечены данные о ширине зоны воздействия и шероховатости границ. Для измерения отклонения полученных результатов от САД-модели, мы разработали адаптивный статистический алгоритм выделения границ. За основу взят алгоритм [6], однако в отличие от оригинального алгоритма, в котором для выделения границ использовались совмещение с САД-моделью и одномерный детектор границ, в данной работе мы используем пороговый критерий. Для каждой точки канала на изображении в перпендикулярном направлении строится профиль (как показано, например, на рис. 3 справа), после чего по профилю определяется средняя глубина и стандартное отклонение глубины необработанной поверхности (σ). После этого точки профиля, в которых отклонение глубины превышает 3σ считаются точками канала. Выполнение данной операции для всех точек канала позволяет определить среднюю ширину зоны лазерного воздействия и шероховатость границ.

Таким образом, в результате работы установлено, что использование флуорофора повышает точность измерений оптически прозрачных образцов, обработанных фемтосекундным лазером, с помощью конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Предложен пороговый алгоритм для восстановления 3D геометрии по стеку изображений оптического среза и адаптивный статистический алгоритм для определения ширины зоны воздействия и средней ширины микроканалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Osellame R., Cerullo G., Ramponi R. Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials, 2012. 483 с.
2. Gattass R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nat. Photonics. – 2008 – 2(4), С. 219-225.
3. Artigas R. Imaging Confocal Microscopy // Optical Measurement of Surface Topography/ под. ред. R Leach., 2011. Гл. 11. С. 237–286.
4. Fisher R. A comparison of algorithms for subpixel peak detection // Image Technology, Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision: сборник науч. трудов. – 1996. – С. 385–404.
5. Guo H. A simple algorithm for fitting gaussian function // IEEE Signal Process. Mag. – 2011. – Т. 28(5) – С. 134–137.
6. Bessmeltsev V.P., Bulushev E.D., Goloshevsky N. V. Method for Localizing and Measuring Structures Formed under Laser Microprocessing // Pattern Recognit. Image Anal. Adv. Math. Theory Appl. – 2011 – Т. 21(3) – С. 373–376.

© В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев, 2014

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ БОЕПРИПАСОВ С ОТСЕЧКОЙ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

Сергей Григорьевич Губин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

Александр Викторович Макеев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент, тел. 361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

В работе разработан метод исследования шероховатости поверхности различных образцов. Качество поверхностного слоя деталей определяется совокупностью характеристик шероховатости, волнистости, физико-механических свойств, микроструктуры металла и остаточных напряжений.

Ключевые слова: шероховатость, интерферометрия, оптика, микрорельеф поверхности.

OPTICAL RESEARCH SURFACE ROUGHNES SAMMUNITION CUT OFF POWDER GASES

Valerik S. Ayrapetyan

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. head of the Department of Special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

Sergey G. Gubin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

Alexandr V. Makeev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., student, tel. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

In this work the method of the study of the surface roughness of different samples. The quality of the surface layer is determined by a set of characteristics of roughness, waviness, physical-mechanical properties, microstructure of metal and residual stresses.

Key words: surface Roughness, interferometry, optics, micro relief of the surface.

Повышение качества выпускаемой продукции требует решения многочисленных проблем в самых различных областях. Технологические проблемы относятся к ряду важнейших, ибо их успешное решение определяет, в конечном итоге, эксплуатационные показатели даже прекрасно спроектированных изделий.[1]

В данной работе разработан метод исследования шероховатости поверхности различных образцов. Работа актуальна из-за активного внедрения бесконтактных средств контроля в современное производство.

Под воздействием различных технологических методов обработки образуется поверхностный слой, состояние которого определяет качество поверхности. *Качество поверхностного слоя* деталей определяется совокупностью характеристик шероховатости, волнистости, физико-механических свойств, микроструктуры металла и остаточных напряжений.[2]

Под шероховатостью поверхности подразумевают числовую характеристику величины микронеровностей реальной поверхности, определяющую ее отклонение от идеально гладкой поверхности.

Учитывая большое влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин, шероховатость несущих поверхностей строго регламентируют. Номенклатура параметров, типы направлений неровностей поверхности и числовые значения параметров для оценки шероховатости поверхностей устанавливаются ГОСТ 2789 - 73.

Топограмма отклонений профиля поверхности детали от средней плоскости произведена методами оптической интерферометрии как наиболее точным бесконтактным методом исследования поверхности и позволяющим определить среднее квадратическое отклонение профиля согласно ГОСТ 25142-82 по формуле:[3]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}$$

Оптическая схема интерферометра позволяющая проводить исследование неоднородности поверхности представлена на рис. 1.

В основу данной схемы положен интерферометр Майкельсона. Источником света служит лазер (1) с длиной волны 632,8 нм, который проходит через полупрозрачную пластину (2) и распадается на 2 луча одинаковой интенсивности. Первый пучок попадает на поверхность образца (3) и обратно рассеянное от него излучение проходит полупрозрачную пластину попадает на экран (5). Второй пучок отразившись от полупрозрачной пластины попадает на зеркальную поверхность (4), отраженный пучок от которого обратно пройдя полупрозрачную пластину интерферирует с первым пучком образуя на экране интерференционную картину.

Интерферограмма эксперимента по данной оптической схеме приведена на рис. 2.

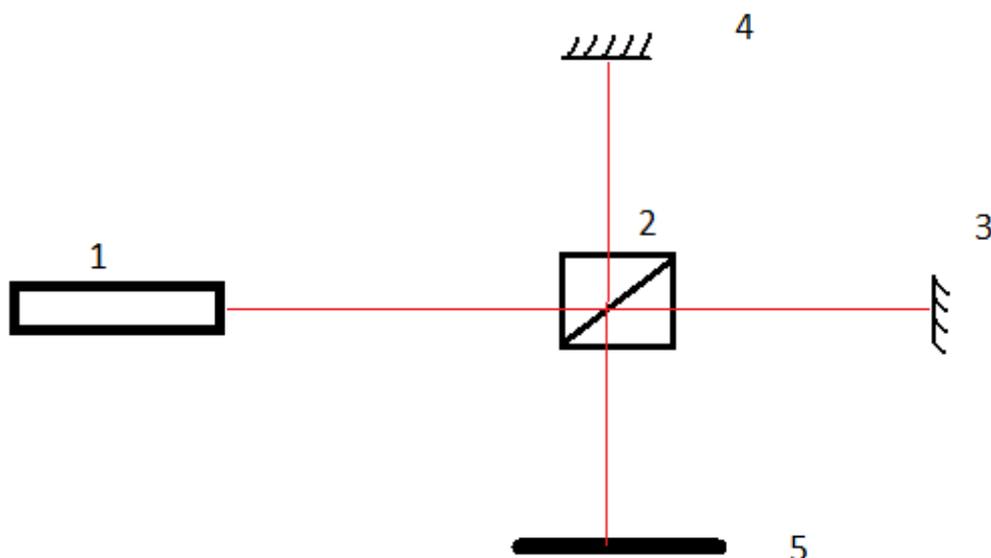


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра

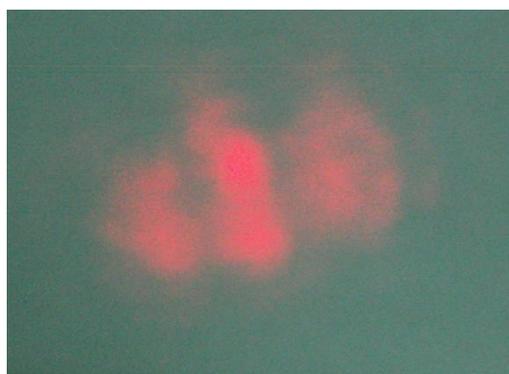


Рис. 2. Интерференционная картина

Измерение ширины полосы максимума d интерференционной картины и расстояние от центрального максимума до данной интерференционной полосы R позволяют вычислять расстройку разности оптического хода лучей, которая обуславливается шероховатостью поверхности, пропорциональной отношению $\frac{R}{d}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю. Ф. Назаров*, А. М. Шкилько, В. В. Тихоненко, И. В. Компанец. ФП ФИП PSE, 2007, т. 5, № 3-4, vol. 5, No. 3-4.
2. Айрапетян В. С., Берёза П. А. Рассеяние света от поверхности лазерной керамики. Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 115–119.
3. Айрапетян В.С., Широкова Т. А. Кольцевая схема параметрического генератора света // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехноло-

гии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 110–115.

4. Губин С.Г. Особенности расчета внутрибаллистических параметров в системах обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объеме // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 7. – С. 150–153.

5. Губин С. Г., Киндиров А. А., Макеев А. В. Сравнительный анализ композитных и стальных материалов для изготовления боеприпасов с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объеме // 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. 2. – С. 120–123.

© В. С. Айрапетян, С. Г. Губин, А. В. Макеев, 2014

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ ГОЛОГРАММ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО СИГНАЛА

Сергей Александрович Шойдин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

Приведён анализ причин и количественная оценка влияния параметров лазерного излучения вместе с нелинейностью фотоотклика на отношение «сигнал – шум» в голографическом информационном канале для объёмных фазовых пропускающих голограмм.

Ключевые слова: голограмма, сигнал/шум, нелинейный фотоотклик, характеристики лазерного излучения, пропускная способность канала.

INFLUENCE OF HOLOGRAM NOISES ON FORMATION OF THE RESTORED SIGNAL

Sergey A. Shoydin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Candidate of physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)291-00-92, e-mail: shoydin@ssga.ru

The analysis of the reasons and quantitative assessment of influence of laser parameters together with nonlinearity of a photoresponse to the relation a signal – noise in the holographic information channel.

Key words: hologram, signal/noise, nonlinear photoresponse, characteristics of laser radiation, channel capacity.

В информационных характеристиках сигнала особую роль, согласно теореме Шэннона [1], играет отношение полезного сигнала к шуму. В голографии это также важно, особенно, когда речь идёт об информационной пропускной способности голографического канала [2], поскольку такие специфические шумы голограмм, как шумы рассеяния и спекл-шумы, подробно рассмотренные в [3], могут приводить даже к возникновению ложного сигнала. Также, как и у шумов нелинейности [4], у них есть компоненты светового пучка (рис. 1), распространяющиеся вдоль полезного сигнала (I_S), а есть компоненты, распространяющиеся в других направлениях (I_N). В настоящей работе нас будут интересовать только те компоненты шумовой волны, которую голограмма восстанавливает в тех же направлениях, что и волну с полезным сигналом (I_N).

Наиболее явно влияние таких шумов проявляется при записи голографических бинарных матриц (рис. 2). Шумы нелинейности [5,6] приводят не только к размазыванию изображения очередной точки, соответствующей наличию очередного бита информации, но часто даже к появлению изображений, отсутствующих в исходном массиве точек, или к их пропаданию.

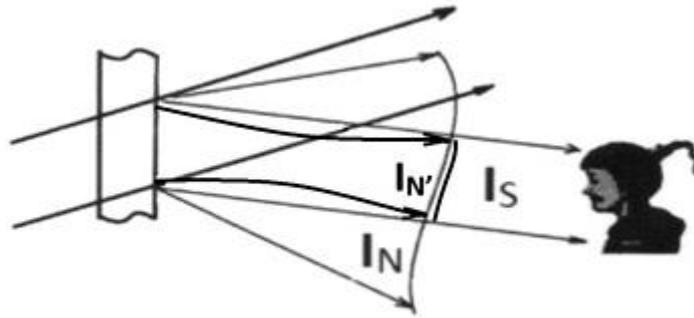


Рис. 1. Распространение информационного сигнала и шума

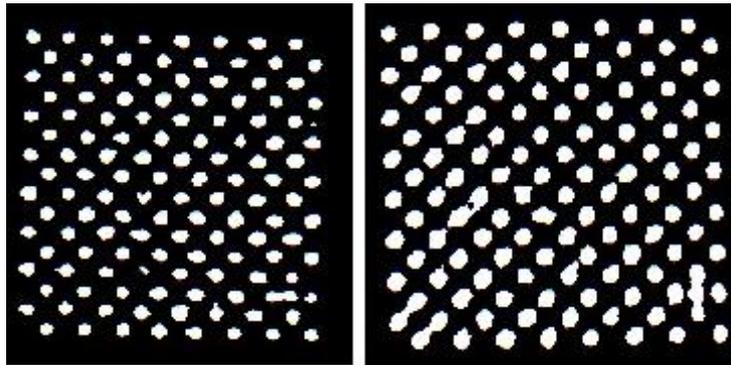


Рис. 2. Запись бинарных матриц

Для демонстрации влияния качества восстановленного изображения, определяемого отношением сигнала к такому виду шума, рассмотрим лишь перекрёстное влияние шумовых компонентов дифракционной решётки, определяющих восстановление шума в телесном угле полезного сигнала. В такой модели можно предположить, что изменение фотоклика голографического материала, вызванное полезным сигналом I_S , равно Δn_S , а вызванное шумовым сигналом (I_N), соответственно, Δn_N , что позволяет представить зависимости дифракционной эффективности полезного сигнала η_S , аналогично [7], от Δn_S .

$$\Delta n_S \sim [E + (C_2 / C_1) E^2] V' \quad (1)$$

и шума η_N от Δn_N в угловом поле зрения восстановленного изображения.

$$\Delta n_N \sim \Delta n_S / k \quad (2)$$

Здесь k – соотношение изначальных амплитуд дифракционных решёток полезного сигнала и шума. Тогда дифракционные эффективности для сигнала η_S и шума η_N , [6] принимают вид:

$$\eta_S \sim \sin^2(\alpha \cdot \Delta n) \quad (3)$$

$$\eta_N \sim \sin^2(\alpha \cdot \Delta n / k) \quad (4)$$

На рис. 3 показаны графики зависимостей $I_S \sim \eta_S$ и $I_{N'} \sim \eta_N$ для $k=3$.

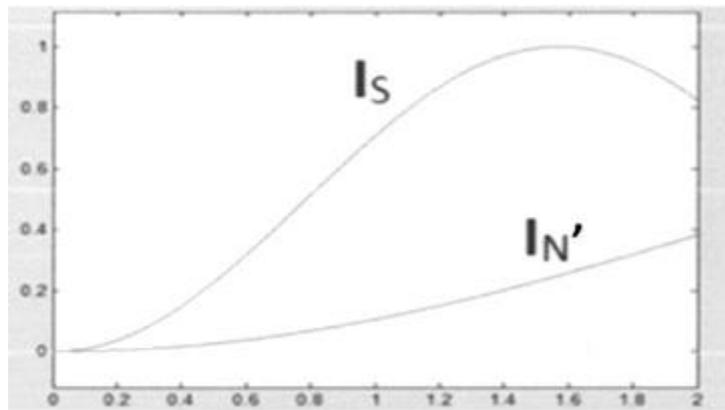


Рис. 3. Зависимость полезного сигнала и шума от экспозиции

Видно, что для высокоэффективной голограммы, у которой дифракционная решётка с Δn_S , формирующим полезное изображение, достигает $\pi/2\alpha$, рост η с увеличением экспозиции насыщается, а шумы (более слабые, чем полезный сигнал, шумовые решётки) растут быстро, пропорционально $(\Delta n)^2$, т. к. при малых аргументах (4) дифракционная эффективность $\eta \sim (\alpha \cdot \Delta n/k)^2$. При этом отношение сигнал-шум $I_S/I_{N'}$ в восстановленном изображении (рис.4)

$$I_S/I_{N'} = \eta_S/\eta_N = \sin^2(\alpha \cdot \Delta n)/\sin^2(\alpha \cdot \Delta n/k), \quad (5)$$

сначала медленно, а затем всё круче падает с увеличением как E , так и V' . Здесь V' берётся аналогично [6], но с учётом реального разброса интенсивности по полю голограммы, вызванному гауссовым характером объектного и опорного пучков.

$$V' = 2 \left| \gamma_{a,r} \right| / \left[(I_{0a}/I_{0r})^{1/2} \exp(r/\Delta_r^2 - r/\Delta_a^2) + (I_{0r}/I_{0a})^{1/2} \exp(r/\Delta_a^2 - r/\Delta_r^2) \right] \quad (6)$$

Здесь I_{0a} и I_{0r} – интенсивности в центрах пучков, а Δ_a и Δ_r – их ширины по уровню $\exp(-2)$ соответственно, а $\gamma_{a,r}$ – комплексная степень когерентности, определяемая как нормированная корреляция между объектным (\hat{a}) и опорным (\hat{r}) пучками.

И, если падение отношения сигнал-шум с ростом экспозиции E можно было предвидеть для случая нелинейных процессов, то падение отношения сигнал-шум с ростом видности V' уже не так очевидно.

На рис.4 показана зависимость $I_S/I_{N'} \sim \eta_S/\eta_N$ (29) при $\alpha \cdot \Delta n$ пробегающем значения 0 до π , а k – от 0 до 30. Видно, что шумовые решётки на голограмме, возникающие в первоначальный момент по совершенно разным причинам [2-6], в дальнейшем ведут себя аналогично решёткам, формирующим полезный сигнал. Поэтому и полезный сигнал, и шумы, распространяющиеся в его телесном угле, энергетически зависят от тех же параметров E и V , а точнее, от их комби-

нации, определяемой нелинейностью фотоотклика с учётом неравномерности гауссовых пучков.

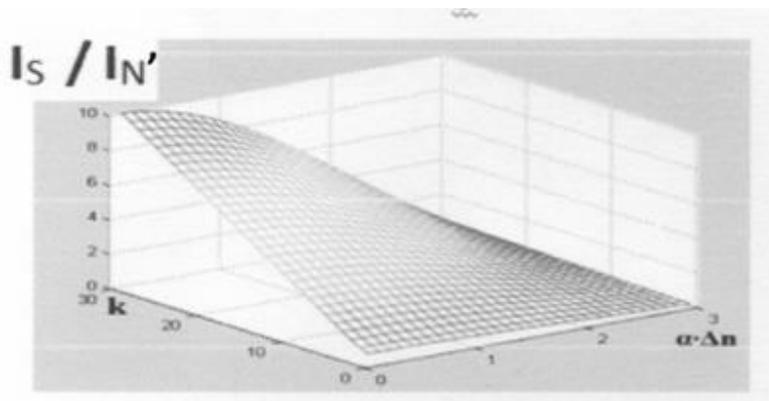


Рис. 4. Изменение отношения сигнала к шуму от Δn и k

Неравномерность интенсивности опорного и объектного пучков, конечно, приводит к снижению дифракционной эффективности, однако это снижение происходит наряду с пропорциональным снижением шумов.

В заключение можно сказать, что хотя с целью повышения отношения сигнал/шум для высокоэффективных голограмм важно максимизировать мощность лазера и длину когерентности его излучения, однако их влияние ограничено. Более того, при неограниченном увеличении как E , так и V в (1) наблюдается насыщение I_S/I_N в (5) и даже последующее снижение (рис. 4). Эти параметры, в простейшем случае влияющие на I_S/I_N через произведение $E \cdot V$, с поправками на нелинейность фотоотклика и на неравномерность интенсивности, а также с поправкой на вибрацию, могут значительно изменяться, но являются стратегически главными, как при вычислении отношения сигнал – шум в восстановленном голограммой сигнале, так и, например, при выборе лазеров для голографии [7]. Следует отметить, что для вычисления полезного сигнала, восстановленного голограммой, и шума в рассматриваемой модели необходимы сравнительно просто измеряемые в эксперименте величины: $|Y_{a,r}|$, I_{0a} , I_{0r}, Δ_a^2 , Δ_r^2 , k , α . Из них излучением лазера определяются первые пять, характеристиками фотоматериала – два последних, а на ещё оказывают влияние характеристики схемы записи голограмм, хотя могут также влиять спекл-шумы [3], формируемые когерентным излучением. В целом же вычисление отношения сигнал/шум в голограммах, хотя и трудная, но вполне разрешимая задача, хотя некоторые величины на практике являются довольно громоздкими для представления в аналитическом виде. Практические расчёты для настоящей работы проводились в среде «Матлаб».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пирс Дж. Символы, сигналы, шумы. -М.: Мир, 1967. - С. 207.

2. Шойдин С. А. Информационная ёмкость голограмм в практических применениях // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 4. – С. 52–53.
3. Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т. В. Голограммы спекл-полей/Успехи физических наук.-1986.-Т.149.-Вып.3.-С.511-549.
4. Шойдин С. А., Сандер Е. А. Запись голограмм в динамических безрелаксационных средах // Опт. и спектр. – 1985. – Т. 58. – Вып. 1. – С. 200–202.
5. Шойдин С. А. Исследование влияния аберраций оптической системы на плотность записи информации в голографических запоминающих устройствах: дис. ... канд. физ. – мат. наук: / С. А. Шойдин; ГОИ им. С. И. Вавилова. – Ленинград, 1984. – 192 с.
6. Шойдин С. А. Исследование голографического запоминающего устройства в режиме записи одиночных голограмм // ОМП. – 1980. – № 11. – С. 3–8.
7. Шойдин С. А. Основные требования к параметрам лазеров для голографии // Сб. трудов Санкт-Петербургского государственного университета. – СПб., 2013. – С. 94.

© С. А. Шойдин, 2014

УДК 535.3, 535.416.2

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ СОГЛАСОВАНИИ ПЛАНАРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Валерий Игоревич Наливайко

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

Марина Александровна Пономарева

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)333-30-92, e-mail: maponoma@gmail.com

Рассмотрено влияние дополнительного слоя с высоким показателем преломления на свойства планарного волновода при создании многоэлементных интегрально-оптических устройств. Установлены условия высокоэффективной связи при переходе излучения из 3-слойной в 4-слойную область, определенные как эффект самосогласования. Приведены технологические рекомендации по изготовлению волноводного делителя оптических пучков с увеличенным числом выводных элементов.

Ключевые слова: халькогенидные слои, эффективный показатель преломления, 4-слойный волновод.

ANALYSIS OF EXTREME REGION BEHAVIOUR FOR COUPLING OF PLANAR MULTILAYERED WAVEGUIDE STRUCTURES

Valery I. Nalivaiko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptug str., Ph. D., senior researcher, tel. (383)333-30-92, e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Marina A. Ponomareva

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptug str., engineer-programmist, tel. (383)333-30-92, e-mail: maponoma@gmail.com

Influence of additional high index layer on planar waveguide characteristics for manufacturing of multielement integrated optical devices is considered. Conditions of highly effective coupling upon light transition from 3-layer to 4-layer areas are established, defined as effect of autocoupling. Technological recommendations to production of the waveguide beamsplitter with the increased number of output elements are presented.

Key words: chalcogenide layers, effective index of refraction, 4-layer waveguide.

Элементы оптических интегральных схем, выполненные на единой подложке, но из различных материалов, позволяют реализовать сложные функциональные схемы. Согласование различных элементов схем является актуальной задачей, при успешном решении которой повышается эффективность устройств [1,2].

Ранее нами был разработан управляемый многоэлементный делитель оптических пучков, в котором каналирование света осуществлялось в планарном волноводе из оксидного стекла, а вводными/выводными элементами служили гофрированные дифракционные решетки из халькогенидного материала с высоким показателем преломления [3,4]. Были получены линейки с ортогональным выводом 16 пучков одинаковой интенсивности. Отмечено, что при изготовлении выводных решеток с одинаковыми параметрами (показатель преломления, период, глубина гофра) эффективность делителя различалась у разных образцов. Причина могла заключаться в различной толщине халькогенидного слоя, оставшегося под решеткой после ее травления. Поэтому возникла необходимость исследовать поведение волноводных мод при изменении толщины верхнего слоя.

Особенностью нашего случая является то, что мы анализируем многослойную волноводную структуру с высоким контрастом величин показателей преломления. Такие структуры представляют интерес с точки зрения уменьшения толщин волноводов и глубины рельефа дифракционных элементов [3]. 4-х слойные структуры с высоким контрастом рассматривались ранее в связи с появлением у них новых физических свойств, таких как ярко выраженные поляризационные свойства [5], эффективное акустооптическое взаимодействие [6] и сенсорная чувствительность [2]. Однако полное понимание теории и описание физических процессов в подобных структурах отсутствуют.

В настоящей работе мы проводим теоретические расчеты влияния верхнего слоя с высоким показателем преломления, нанесенного на основной волновод из оксидного стекла, с целью усовершенствования многоэлементных волноводных устройств.

Для расчетов применялся метод матриц передачи, широко используемый для анализа многослойных структур [5,7]. Рассматриваемая структура изображена на рис. 1.

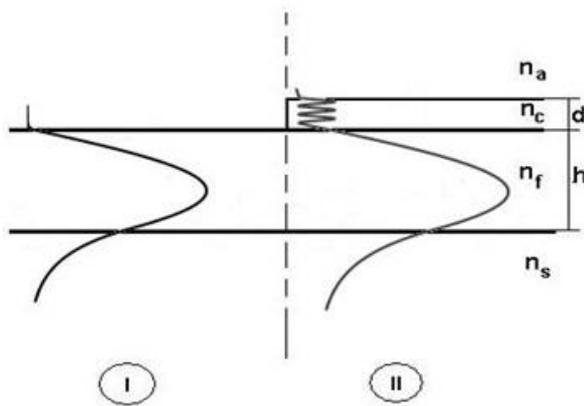


Рис. 1. Схема согласования 3-х и 4-х слойного волноводов на границе с резким краем верхнего слоя. n_s, n_f, n_c, n_a – показатели преломления сред, h, d – толщины слоев

Отдельно проанализируем решения для 3-хслойного (область I) и 4-хслойного (область II) волноводов. Для 4-х слойного волновода в волноводных слоях с показателями преломления n_c и n_f поле ТЕ-волны представляем в виде:

$$E_j = \begin{cases} A_j \cos \gamma_j x + B_j \sin \gamma_j x, & \text{если } n_j > n^* \\ A_j \operatorname{ch} \gamma_j x + B_j \operatorname{sh} \gamma_j x, & \text{если } n_j < n^*, \end{cases}$$

где $\gamma_j = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\operatorname{abs}(n_i^2 - n^{*2})}$, n^* - эффективный показатель преломления моды, j соответствует одной из сред c или f .

В окружающих полупространствах (воздух и подложка) поле запишется как:

$$E_a = A_a \exp(-\gamma_a x) \quad \text{- в воздухе,}$$

$$E_s = A_s \exp(\gamma_s x) \quad \text{- в подложке.}$$

Записывая условия непрерывности тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей на каждой из границ раздела, получаем в итоге характеристическое уравнение, решения которого определяют эффективные показатели преломления всех мод, существующих при заданных параметрах системы.

Очевидно, что потери при распространении волны из области I в область II будут минимальны, если эффективный показатель преломления исходной моды в области I совпадает с показателем одной из мод 4-хслойного волновода в области II.

Рассмотрим частный случай, когда показатель преломления верхнего слоя n_c больше показателя преломления пленки основного волновода n_f ($n_c > n_f$). В таком 4-х слойном волноводе могут существовать два типа мод:

- общие моды, распространяющиеся в основном волноводе и в верхнем слое;
- поверхностные моды, распространяющиеся только в верхнем слое.

При изготовлении многоэлементного делителя оптических пучков интерес представляет только поведение общих мод, т.к. исходная мода 3-х слойного волновода физически не может возбудить поверхностную моду в 4-х слойной области. Также мы не будем учитывать френелевское отражение и потери на рассеяние на границе раздела областей I-II, считая их пренебрежимо малыми.

Для оценки потерь из-за несовпадения профилей мод в областях I и II воспользуемся интегралом перекрытия [8]. Пусть $E_{3i}(x)$ и $E_{4j}(x)$ - распределения электрического поля i -й моды в исходном 3-х слойном волноводе и j -й моды в 4-х слойном волноводе, соответственно. Тогда амплитуда возбуждения j -й моды a_{ij} определяется интегралом перекрытия:

$$a_{ij} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_{3i}(x)E_{4j}(x)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{4j}(x)|^2 dx}}$$

А коэффициент передачи p_{ij} , определяющий часть мощности, перекачиваемой из i -й моды 3-х слойного волновода в j -ю моду 4-х слойного, запишется как:

$$p_{ij} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |a_{ij}E_{4j}(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{3i}(x)|^2 dx}} \quad (1)$$

Величина p_{ij} будет количественно характеризовать эффективность согласования волноводных мод.

Для анализа характеристик рабочей структуры выберем конкретные параметры, которые использовались в эксперименте [3]. В качестве основного волновода рассмотрим одномодовый волновод из оксидного стекла толщиной $h=4$ мкм с показателями преломления пленки $n_f=1.52$ и подложки $n_s=1.5163$. На поверхность основного волновода нанесены фрагменты конечной длины из халькогенидного стекла с показателем преломления $n_c=2.5$, толщины d которых варьируются от 0 до 0.6 мкм. Рабочая длина волны $\lambda=0.63$ мкм.

На рис. 2а изображены рассчитанные зависимости эффективных показателей преломления мод от 0-го до 4-го порядка, возникающих в данном 4-х слойном волноводе, от толщины верхнего слоя. Для наглядности на графике пунктирной линией отмечен эффективный показатель преломления 0-й моды исходного 3-х слойного волновода.

При эффективных показателях преломления меньших, чем показатель преломления подложки $n_s=1.5163$, волноводных мод не существует.

При эффективных показателях больших, чем показатель преломления основного волноводного слоя $n_f=1.52$, существуют только поверхностные моды, которые распространяются в верхнем слое.

Средний диапазон эффективных показателей преломления $1.5163 < n^* < 1.52$, который представлен на рис.2а, соответствует распространению общих мод.

Можно заметить, что эффективные показатели преломления мод 4-х слойного волновода довольно точно совпадают с эффективным показателем 0-й моды исходного 3-х слойного волновода практически на всем диапазоне толщин d . Исключение составляют экстремальные области, соответствующие толщинам отрезки мод 4-х слойного волновода. Это свидетельствует о слабом влиянии верхнего слоя на профиль исходной волноводной моды в широком диапазоне толщин верхнего слоя, за исключением узких экстремальных областей.

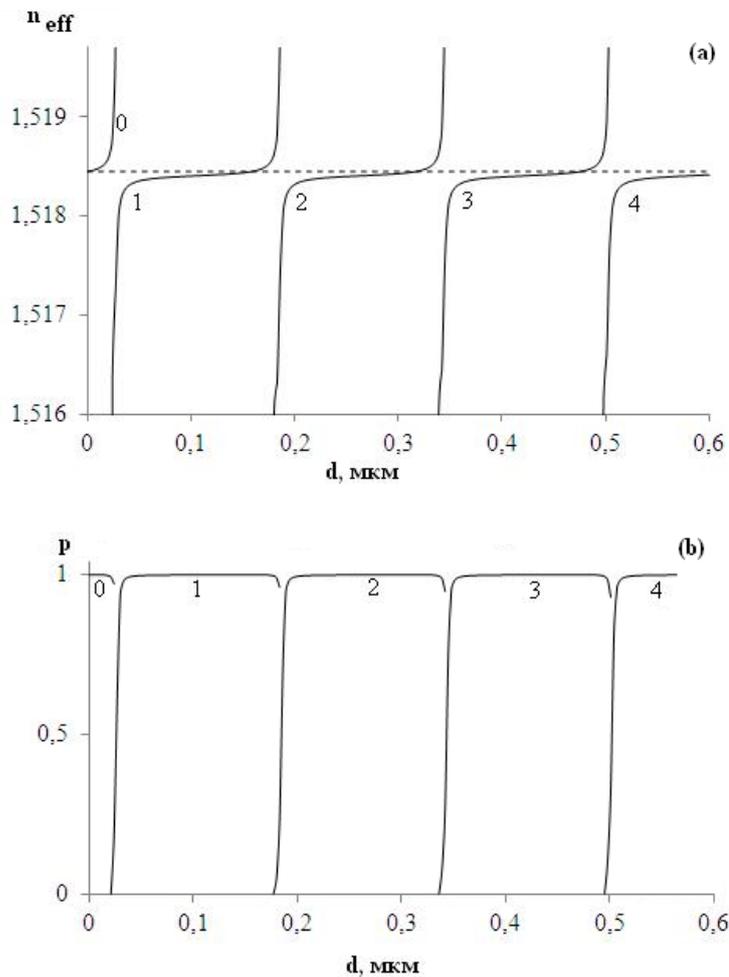


Рис. 2. а) дисперсионные кривые 0,...4 мод 4-х слойного волновода с показателями преломления $n_s = 1.52$, $n_f = 1.5163$, $n_c = 2.5$, $n_a = 1$, толщиной 3-х слойного волновода $h=4$ мкм и рабочей длиной волны $\lambda = 0.63$ мкм в зависимости от толщины верхнего слоя d ; б) зависимость коэффициента передачи p_{0j} для $j = 0, \dots, 4$ от толщины верхнего слоя d для этого же волновода

Необходимо обратить внимание на некоторые особенности поведения мод 4-х слойного волновода при изменении толщины верхнего слоя. Мода j -го порядка появляется при определенной толщине верхнего слоя, называемой толщиной отсечки этой моды, и является общей модой. При увеличении толщины слоя эффективный показатель преломления моды резко достигает величины эффективного показателя исходной моды 3-х слойного волновода, а затем в широком диапазоне толщин ее эффективный показатель остается практически постоянным. Далее мода скачком превращается в поверхностную моду. Одно-

временно с этим возникает общая мода следующего порядка и ведет себя подобным же образом. С ростом толщины верхнего слоя увеличивается порядок общей моды, согласованной с исходной. Более того, с исходной модой всегда согласуется мода наивысшего порядка 4-х слойного волновода, а все остальные моды являются поверхностными.

Рассмотрим изменение коэффициента передачи световой мощности из моды 3-х слойного волновода в моду 4-х слойного, обусловленного несовпадением профилей поля этих мод. На рис. 2б изображена зависимость мощности p_{0j} , перекачиваемой из 0-й моды исходного 3-х слойного волновода в j -ю моду 4-х слойного и вычисленной по формуле (1) для $j = 0, \dots, 4$, от толщины верхнего слоя d . Этот график подтверждает эффект, отмеченный на предыдущем рис. 2а, - практически во всем диапазоне толщин d , за исключением экстремальных областей, наблюдается почти полное совпадение профилей электрического поля моды 3-х слойного волновода и общей моды 4-х слойного. Это указывает на практически идеальное согласование и, как следствие, малый уровень потерь распространяющихся волн на резких краях раздела многоэлементной структуры. Физическая природа явления, определенного нами как эффект самосогласования, объясняется многолучевой интерференцией в 4-х слойной структуре.

На рис. 3 приведено распределение электрического поля исходной нулевой моды 3-х слойного волновода (кривая I) и нескольких мод 4-х слойного волновода с разными толщинами верхнего слоя (кривые II - VI). Видно, что профиль поля мод 4-х слойного волновода практически совпадает с профилем исходной нулевой моды 3-х слойного (кривые II, III, V, VI).

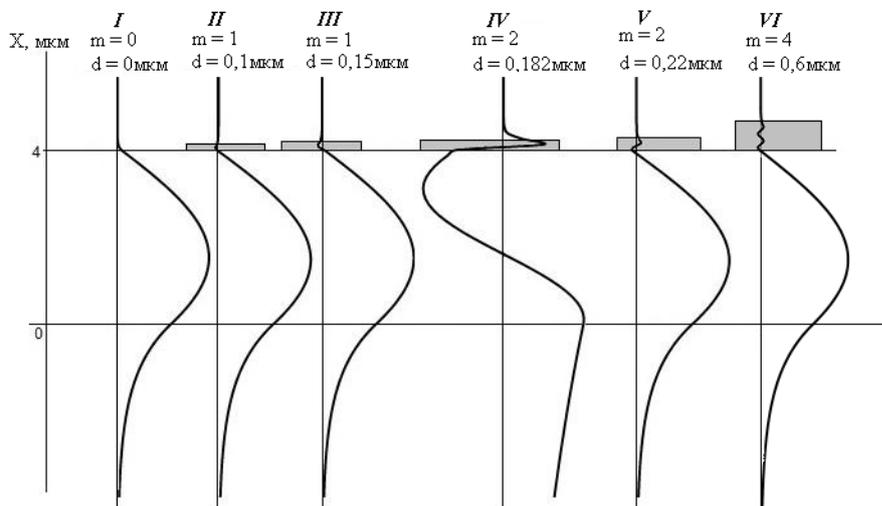


Рис. 3. Распределение электрического поля мод в 4-х слойном волноводе с показателями преломления $n_s = 1.52$, $n_f = 1.5163$, $n_c = 2.5$, $n_a = 1$ и толщиной 3-х слойного волновода $h = 4$ мкм и с различной толщиной верхнего слоя d :

I – $d = 0$ (3-х слойный волновод); II – 1-я мода, $d = 0.1$ мкм; III – 1-я мода, $d = 0.15$ мкм; IV – 2-я мода, $d = 0.182$ мкм; V – 2-я мода, $d = 0.22$ мкм; VI – 4-я мода, $d = 0.6$ мкм

Исключение составляет кривая IV, для которой толщина верхнего слоя соответствует одной из экстремальных точек на рис. 2.

Нормированное соотношение амплитуд электрических полей, представленное на рис. 3, показывает, что малая часть энергии общей волноводной моды распространяется в верхнем слое, позволяя увеличивать количество выводных каналов многоэлементного делителя оптических пучков.

Различия в распределении электрического поля мод помогают описать явления, наблюдаемые в экстремальных областях толщин волновода. В момент возникновения очередной моды ее эффективный показатель преломления очень близок к показателю преломления подложки (рис. 2а). А так как экспоненциальный хвост профиля моды в подложке пропорционален разнице этих показателей, электрическое поле моды очень сильно проваливается в подложку. При этом профиль моды сильно деформируется (пример IV на рис. 3), что приводит, с одной стороны, к существенному уменьшению коэффициента передачи, а с другой – к усилению взаимодействия с выводной решеткой на поверхности верхнего слоя.

Новые физические свойства подобных 4-х слойных структур [2, 8, 9] проявляются именно в экстремальных областях. Резкая зависимость экстремальных областей от толщины создает трудности практического обнаружения таких свойств и физической реализации устройств на их основе. С другой стороны, при разработке рассматриваемых нами многоэлементных волноводных структур резкая зависимость экстремальных областей от толщины является положительным фактором. Чем круче зависимость, тем шире область толщин, в которых коэффициент передачи близок к 1.

При создании интегрально-оптических линеек и матриц делителей пучков с большим количеством выводных дифракционных элементов необходимо выбирать толщину верхнего слоя с учетом эффективного согласования. В этом случае интенсивность выводных элементов будет определяться только одним параметром – дифракционной эффективностью выводных решеток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дедушенко К.Б., Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Методы согласования устройств интегральной оптики и волоконно-оптических линий связи (обзор) // Кв.эл. - 1983. - Т. 10. - № 9. - С.1733-3176.
2. Gauthier R.C., Medri K.E., Newman S.R. Modal analysis and device considerations of thin high index dielectric overlay slab waveguides // Appl.Opt. - 2012. - V. 51. - N. 9- P. 1266-1275.
3. Каменев Н.Н., Наливайко В.И. Дифракционные демультипликаторы для трехмерных интегрально-оптических схем // Автометрия. - 1993. - № 3. - С. 114-116.
4. Gigailenko M.A., Kamenev N.N., Nalivaiko V.I., Tverdokhleba P.E. Waveguide 3-D Optical Integrated Circuits // Proc. SPIE. - 1999. - V. 3900. - P. 187-192.
5. Векшин М.М., Гладкий В.П., Никитин В.А., Яковенко Н.А. Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных диэлектрических волноводов. // Автометрия. - 1998. - № 5. - С. 58-65.
6. Петров Д.В., Царев А.В., Яковкин И.Б. Акустооптическое взаимодействие в диффузном волноводе с диэлектрической пленкой // Кв. эл. – 1982. - Т. 9. - № 2. - С. 247-253.

7. Li Y.-F., Lit J.W.Y. General formulas for the guiding properties of a multilayer slab waveguide // JOSA A. - 1987. - V. 4. - N. 4. - P. 671-677.

8. Besley J.A., Love J.D., Langer W. A Multimode Planar Power Splitter // J. of Lightwave Tech. - 1998. - V. 16. - N. 4. - P. 678-684.

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, 2014

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА КОРРЕКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИНЗЫ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

В статье рассмотрены коррекционные свойства оптических преломляющих элементов, выполненных из разных материалов, прозрачных в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: показатель преломления материала, сферическая аберрация, субмиллиметровый диапазон длин волн.

CORRECTIONAL PROPERTIES OF SINGLE LENS OF DIFFERENT MATERIALS IN A SUBMILLIMETRIC RANGE OF LENGTHS OF WAVES

Diana G. Makarova

The Siberian state geodetic academy, the post-graduate student faculty Nanosystem and optotechnics, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo 10, tel. (383)343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

The article describes the corrective properties of optical refractive common elements made of different materials that are transparent in the submillimeter wavelength range.

Key words: a parameter of refraction of a material, spherical aberration, a submillimetric range of lengths of waves.

В связи с освоением субмиллиметрового диапазона (СМД) спектра выявились проблемы его использования, обусловленные значительным поглощением излучения парами воды земной атмосферы. Это накладывает ограничения на условия использования – «сухая» атмосфера для астрономических приборов или близкое расположение наблюдаемого объекта для медицинских приборов.

В настоящее время в качестве силовой оптики в субмиллиметровом диапазоне в основном применяются зеркальные элементы. Получение значительного угла поля зрения с помощью зеркальных систем невозможно, какую бы сложную форму асферики эти отражающие поверхности ни имели. Это повышает интерес к оптическим системам, содержащим преломляющий элемент [1].

Настоящая работа является продолжением [2, 3] по исследованию коррекционных свойств оптических элементов, выполненных из разных материалов, прозрачных в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Целью работы является исследование влияния показателя преломления материала линзы на ее коррекционные свойства в СМД спектра для совершенствования оптической элементной базы оптико-электронных приборов.

Рассмотрим влияние показателя преломления материала линзы на распределение суммы Зейделя по поверхностям для сферической aberrации. Согласно теории aberrации третьего порядка минимальной сферической aberrацией обладает плосковыпуклая линза, обращенная выпуклой поверхностью в сторону параллельного пучка лучей.

В качестве примера рассмотрим коррекционные свойства одиночной плосковыпуклой линзы ($r_2 = \infty$), выполненной из разных материалов: полиэтилена, кварца и кремния. Рассматриваемые линзы будут иметь одинаковое фокусное расстояние 100мм, относительное отверстие 1:2 и угол поля зрения 2° . Конструктивные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры оптических элементов

Материал линзы	Радиусы, мм	$n_{\lambda=200\text{мкм}}$
Кремний	$r_1 = -121,80$	3,4265
Кварц плавный	$r_1 = -115,00$	2,1170
Полиэтилен	$r_1 = -81,77$	1,5137

На рис. 1-3 представлены результаты моделирования линз, выполненных из полиэтилена, кварца и кремния. Моделирование проведено с помощью пакета прикладных программ по расчету оптики «Zemax».

Из рис. 1 видно, что значения коэффициента Зейделя для сферической aberrации распределены между первой и второй поверхностями линзы, причем, большая часть приходится на первую поверхность.

Из диаграммы можно сделать вывод, что значения коэффициента Зейделя для сферической aberrации распределены между первой и второй поверхностями линзы, причем, большая часть приходится на вторую поверхность.

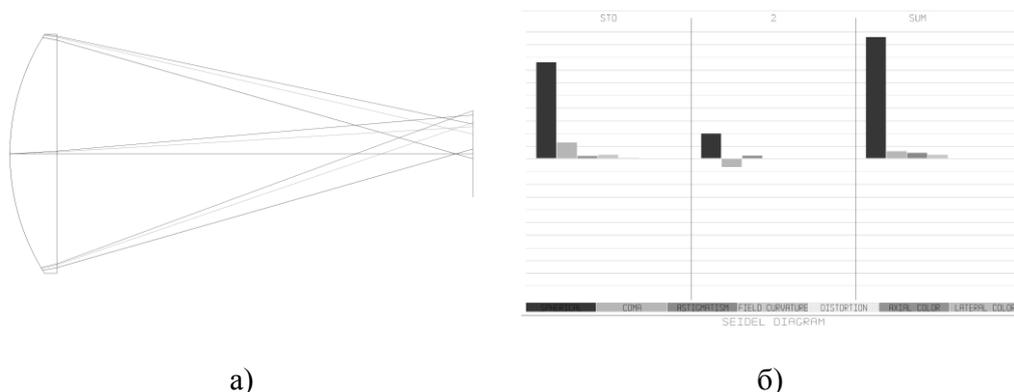


Рис. 1. Результат моделирования линзы из полиэтилена:
а) оптическая схема; б) диаграмма aberrационных коэффициентов Зейделя

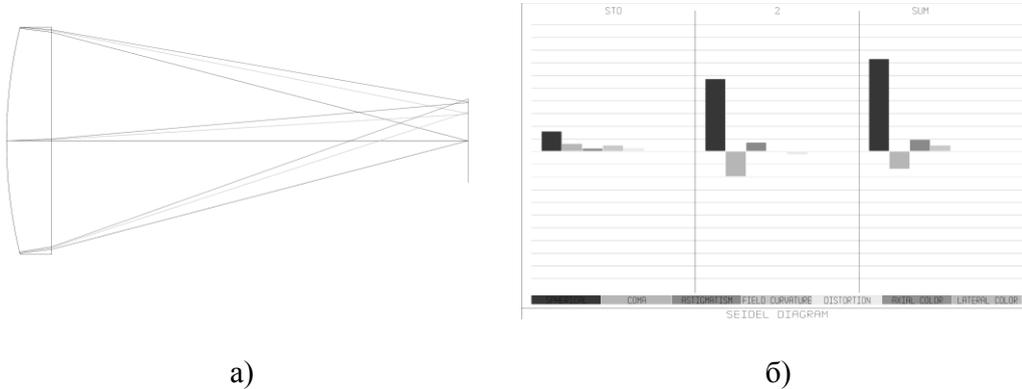


Рис. 2. Результат моделирования линзы из кварца:
 а) оптическая схема; б) диаграмма абберационных коэффициентов Зейделя

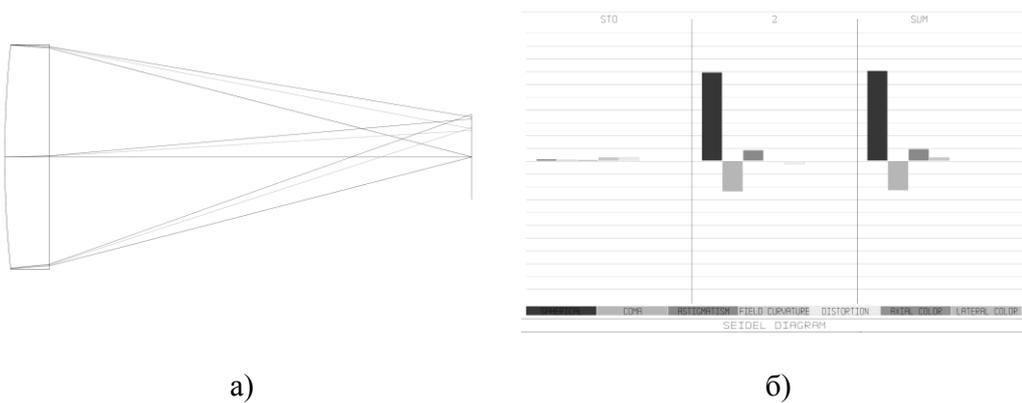


Рис. 3. Результат моделирования линзы из кремния:
 а) оптическая схема; б) диаграмма абберационных коэффициентов Зейделя

По рис. 3 очевидно, что значения коэффициента Зейделя для сферической абберации практически полностью сосредоточены на второй поверхности линзы.

По результатам моделирования можно сделать вывод о влиянии показателя преломления на распределение сферической абберации по поверхностям. При малых значениях показателя преломления (при $n < 2$) основная доля сферической абберации приходится на первую поверхность линзы. В диапазоне показателя преломления от 2 до 3 в формировании сферической абберации участвуют обе поверхности. А при показателе преломления $n > 3$ основную долю в величину сферической абберации вносит вторая поверхность.

Эффект изменения коррекционных свойств поверхностей линзы был замечен в СМД длин волн. Представляется актуальным проверить данный эффект в тепловизионном диапазоне длин волн (3-5мкм и 8-14мкм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ТГц линзы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/z_Lenses.pdf.
2. Макарова Д. Г., Ефремов В. С. Коррекционные свойства полевого компенсатора астрообъектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн // 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. 1. – С. 116–120.
3. Макарова Д. Г., Ефремов В. С. Применение дисперсионных формул материалов в субмиллиметровом диапазоне длин волн // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 122–132.

© Д. Г. Макарова, 2014

УДК 621.3.049.77, 621.319.1

МЭМС ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ПОЛЕМ ДЛИНОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Эдуард Геннадьевич Косцов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Иван Викторович Князев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 1, аспирант, тел. (383)330-79-86, e-mail: kiv@nzpp.ru

Рассмотрен новый элемент МЭМС дифракционной решетки, основанный на использовании в межэлектродном зазоре диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости. Описываются характеристики и особенности функционирования элемента. Конструкция элемента дает возможность осуществлять перестройку при работе с различными длинами волн от 0.3 до 1 мкм с помощью сил электростатики.

Ключевые слова: МЭМС, дифракционные решетки, электростатика, сегнетоэлектрик.

THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF NEW ELEMENTS MEMS DIFFRACTIVE GRATING LIGHT VALVE

Edward G. Kostsov

Institute of Automation and Electrometry (SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Acad. Koptuyuga, Dr. Sc., lab. head, tel. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

Ivan V. Knyazev

Institute of Automation and Electrometry (SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Acad. Koptuyuga, postgraduate student, tel. (383)330-79-86, e-mail: kiv@nzpp.ru

A new element of the MEMS diffraction gratings based on using dielectric materials with a high dielectric permeability in the gap between the electrodes is considered. The characteristics of the element and that specific features of operation are described. The construction of the element makes it possible to that restructuring to operate at various wavelengths from 0.3 to 1 μm using the electrostatic forces.

Key words: MEMS, diffraction gratings, electrostatics, ferroelectric.

В настоящее время электронные средства становятся все более узким местом в системах передачи больших массивов информации, например, в системах телекоммуникации. Развитие оптических технологий дает реальные основания для качественного повышения скорости передачи информации. В то же время современная техника работы с оптическими потоками данных находится еще в стадии развития.

Одним из путей значительного увеличения скорости передачи массивов информации является использование микроптоэлектромеханических

устройств, (МОEMS). Их функционирование базируется на комбинации двух микротехнологий: микрооптики и MEMS, которые являются наиболее интенсивно развивающимся сектором современной микроэлектроники [1]. МОEMS дают возможность построения полностью оптических сетей, без необходимости преобразования: оптический сигнал - электрический сигнал - оптический сигнал. Одна из конструкций МОEMS – управляемые полем дифракционные решетки (GratingLightValve, diffractive MOEMS device, GLV) [2–4]. Устройство GLV состоит из множества микробалок, при прогибе которых, под действием сил электростатики, в определенной последовательности, имеет место дифракция света, с переводом, под заданным углом, падающего излучения в 0-й или ± 1 -й порядки дифракции, в соответствии с классической теорией дифракции, угол дифракции определяется периодом решетки. Максимальный эффект имеет место, когда амплитуда смещения определенного числа микробалок δ , достигает четверти длины световой волны. Технология GLV по совокупности параметров, эффективности модуляции света, по контрасту, надежности, скорости переключения интенсивности светового потока, мощности управляемого потока, значительно превосходит другие известные оптические технологии обработки изображений, она обеспечивает в масштабе реального времени формирование высококачественных, информационно емких изображений для широкого спектра практических задач.

Типичная структура известных элементов GLV: Si – SiO₂ – воздушный зазор – подвижный элемент (Si₃N₄+ Al) – микробалка, которая имеет следующие характерные размеры: длина 30 - 500 мкм, ширина 2-5 мкм, толщина 0.3 – 1.0 мкм. Типичные толщины указанных пленок: SiO₂ – 500 нм; воздушного зазора и нитрида кремния 100 – 300 нм, Al – 50 нм, последняя выполняет функции как оптического отражателя, так и проводника.

Воздушный зазор между подвижным и неподвижным электродами создается предварительным осаждением на поверхность этого электрода тонкого жертвенного слоя, который затем удаляется. Толщина этого зазора определяет спектральную область работоспособности прибора, для видимой части спектра она составляет 100 - 200 нм. Толщина жертвенного слоя должна быть выполнена с очень высокой точностью для работы с заданной длиной световой волны.

Недостаток указанной конструкции GLV состоит в том, что подаваемое на элемент напряжение распределяется между воздушным зазором и пленкой Si₃N₄ и напряжение V , которое необходимо прикладывать к микробалке достаточно высоко, до 10- 15 В, кроме того накапливаемый в Si₃N₄ заряд приводит к гистерезису на кривой «величина прогиба – напряжение», который может достигать до 30 % от поданного напряжения. Для уменьшения времени возвращения микробалки в исходное положение необходимо прикладывать импульс напряжения с противоположной полярностью. Эти факторы накладывают ряд ограничений на параметры устройств GLV.

Ранее нами [5,6] был предложен и описан новый элемент GLV не обладающий указанными недостатками. Элемент имеет следующую конструкцию:

подложка (кремний или сапфир) – электрод (ITO) – тонкая сегнетоэлектрическая пленка толщиной d и с высоким значением диэлектрической проницаемости ϵ , более 1000 - 3000 – управляемый полем воздушный зазор d_3 – подвижный электрод, который отражает свет, см. рис. 1. Подвижный электрод – свободная тонкая пленка бериллиевой бронзы с толщиной d_2 1-2 мкм, прижимается при подаче на образец напряжения V , под действием сил электростатики к поверхности сегнетоэлектрической пленки.

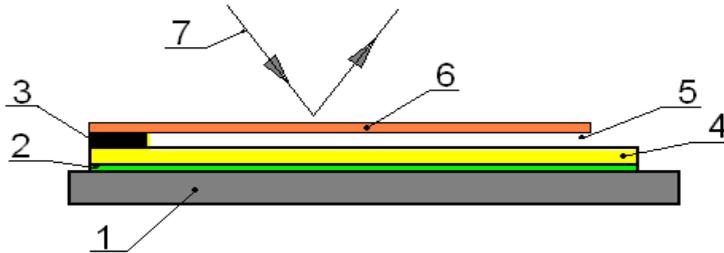


Рис. 1. Конструкция нового элемента GLV:

1 – подложка, Si; 2 – электрод, ITO; 3 - диэлектрическая пленка; 4 – пленка NBS; 5 – управляемый полем воздушный зазор; 6 – подвижный электрод; 7 – световой поток

Первоначальная величина зазора d_0 составляет 1 - 5 мкм, в зависимости от технологии изготовления сегнетоэлектрической пленки, степени шероховатости ее поверхности. В качестве сегнетоэлектрика использовалась тонкая пленка ниобата – бария стронция, NBS, модифицированного лантаном, $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb_2O_6 + 1\% La$. Толщины пленок ITO и NBS, составляли 0.1 - 0.5 мкм и 0.3 - 1 мкм, соответственно. Технология получения этих пленок и основные их электрофизические свойства описаны в [7].

Размещение подвижного электрода вблизи поверхности диэлектрика с большой величиной ϵ , когда $\epsilon/d > 10^9$, дает возможность создания в зазоре высокой напряженности электрического поля и, соответственно, большой силы, действующей на подвижный электрод, при этом сила сцепления двух поверхностей зависит от накачиваемой в структуру энергии, $CV^2/2$ и равна до $5 \cdot 10^5$ Н/Дж [7]. Этой силы при небольшой массе подвижного электрода достаточно, чтобы жестко фиксировать местоположение электрода и удерживать его в заданном положении неограниченно долгое время, при любых внешних факторах – наличии микровибраций, линейном движении, воздействии воздушных потоков и т.п. Для каждого образца указанных структур величина d_3 однозначно зависит от амплитуды прикладываемого постоянного напряжения $V_{см}$, с увеличением которого величина d_3 уменьшается, см. рис. 2.

Величина d_3 достаточно точно определяется как из измерений значения величины емкости структуры, $C = \epsilon_0 S / (d/\epsilon + d_3)$, так и из оптических измерений. При подаче на структуру дополнительного импульса напряжения V_p , при аддитивном сложении двух напряжений подвижный электрод смещается в сторону

подложки на расстояние δ , определяемое амплитудой V_p , см. рис. 3. Высокая чувствительность величины δ к амплитуде V_p , до 50 – 500 нм/В [5, 6], дает возможность управления величиной d_3 и осуществлять перестройку спектральной области работы устройства.

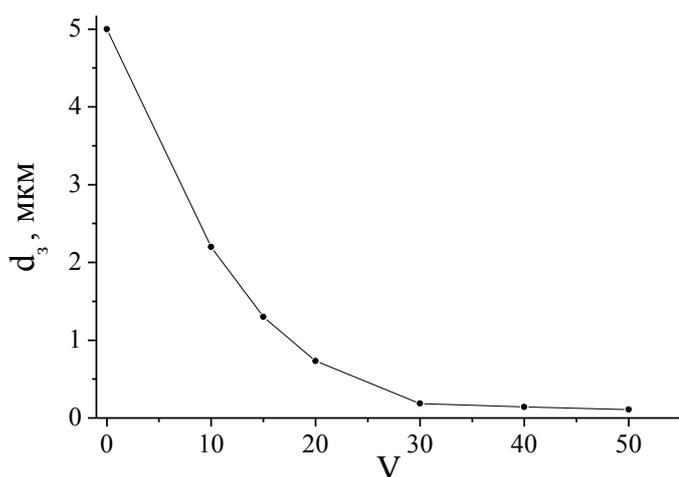


Рис. 2. Изменение величины воздушного зазора, d_3 , в зависимости от напряжения $V_{см}$

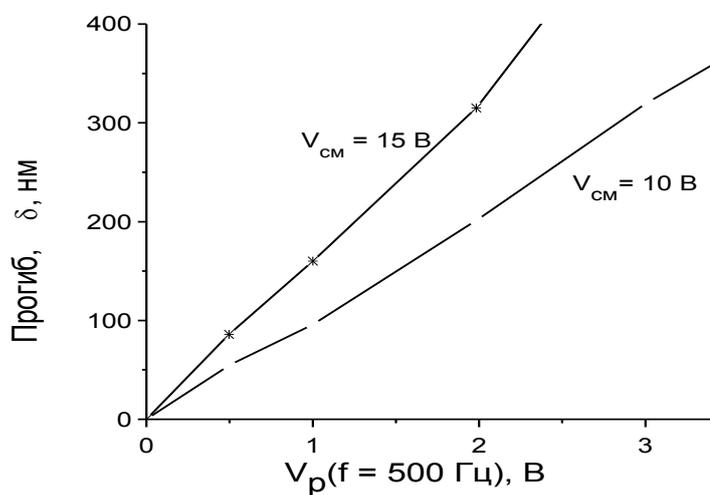


Рис. 3. Зависимость прогиба поверхности элемента от V_p , для разных $V_{см}$, $d = 0.6$ мкм

Таким образом, в данном элементе электрическое поле выполняет технологические функции, фиксируя прогиб микробалки на заданную величину, а также дает возможность осуществлять дифракцию света в широком спектральном диапазоне с длиной волны от 0.3 до 1 мкм. Быстродействие элемента, как при создании прогиба микробалки, так и приведении ее в исходное положение, как показывают экспериментальные исследования исключительно высокое, оно лежит в микро- наносекундном диапазоне [1,5]. Быстрое возвращение микробалки в исходное положение определяется тем, что при электростатическом прижатии тонкой металлической пленки к поверхности сегнетоэлектрика часть энергии расходуется на ее упругую механическую деформацию. Пленка «натягивается» как мембрана на отдельные микровыступы поверхности сегнетоэлектрика высотой 50 -200 нм, при этом, в силу того, что толщина пленки значительно превышает размеры микровыступов, зеркальность ее поверхности сохраняется. После снятия импульса напряжения механическая энергия, освобождаясь, определяет высокую скорость отрыва металлической пленки массой $10^{-9} - 10^{-10}$ г от поверхности сегнетоэлектрика, за время 50 - 200 нс, давая возможность достижения частоты модуляции света до 10 МГц и выше.

Можно отметить, что в современных микросхемах, в которых используются компоненты, создаваемые по технологии MEMS, широко применяется возможность управления их параметрами, практически в режиме реального времени, с использованием компьютерной технологии, специализированных интегральных схем (ASIC), примером является многомерные тепловизионные матрицы [9, 10]. Из этого следует, что рассматриваемый прогиб в массиве микробалок, может быть прецизионно скорректирован дополнительными импульсами напряжения, в зависимости от выполняемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косцов Э.Г. Состояние и перспективы микро - и нанoeлектромеханики // Автометрия, N3, 3-52, 2009.
2. J. Trisnadi, C. Carlisle and R. Monteverde. Overview and applications of Grating Light Valve based optical write engines for high-speed digital imaging // Proc. MOEMS Display and Imaging Systems, Vol. 5348, pp. 52-64.
3. Tahito Aida, Yo Habu and Tomoyuki Kato. Electrostatically-actuated grating light modulator fabricated using SU-8 photoresist // Proc. of SPIE Vol. 6993 699308-1, 2008.
4. V. Gowri Suresh, Nandita Das Gupta and Shanti Bhattacharya. Tunable MEMS Diffraction Gratings // Proc. of SPIE Vol. 8549 854918-1, 2012.
5. Э.Г. Косцов, В.С. Соболев. Низковольтный элемент программируемой полем динамической дифракционной решетки // Автометрия, N3, стр. 101-109, 2010.
6. Косцов Э.Г., Князев И.В., Микроэлектромеханические дифракционные решетки, Автометрия, N 3 стр. 71 -78, 2013.
7. E.G. Kostsov. Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures // Ferroelectrics, 314, pp. 169-187, 2005.
8. I. L. Baginsky and E. G. Kostsov. Reversible High Speed Electrostatic "Contact" // Semiconductors, Vol. 44, No. 13, pp. 1654-1657, 2010.

9. Chuan Li, George D. Skidmore, and C.J Han. Uncooled Infrared Sensor Development Trends and Challenges // Proc. of SPIE Vol. 8155, 815515, 2011.

10. Chuan Li, C. J. Han, George Skidmor. Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development // Optical Engineering, 50(6), 061017, 2011.

© Э. Г. Косцов, И. В. Князев, 2014

УДК 535.32

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ЭФФЕКТЕ ЭЛЕКТРОСМАЧИВАНИЯ НА ЕГО КОРРЕКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Диана Георгиевна Макарова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

В статье рассмотрены коррекционные свойства жидкостных оптических преломляющих элементов, выполненных из разных материалов.

Ключевые слова: показатель преломления материала, сферическая аберрация, субмиллиметровый диапазон длин волн.

INFLUENCE OF REFRACTIVE INDEX OF LIQUID ELEMENTS BASED ON ELECTROWETTING TO CORRECTONAL PROPERTIES

Victor S. Efremov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotnogo, 10, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Diana G. Makarova

Siberian state academy of geodesy, the post-graduate student at the faculty of Nanosystems and optotechnics, 630108, Russia, Novosibirsk, Plachotnogo, 10, tel. (383)343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

The article describes correction properties of liquid optical refractive elements made of different materials.

Key words: a parameter of refraction of a material, spherical aberration, a submillimetric range of lengths of waves.

В настоящее время в качестве силовой оптики начинают применяться жидкостные элементы (жидкие линзы) с управляемыми оптическими характеристиками как на гидростатическом эффекте, так и на эффекте электросмачивания [1, 3]. Основным преломляющим материалом линз на эффекте электросмачивания являются жидкости в комбинации «проводящая – не проводящая». Эти жидкие материалы, сильно отличающиеся по своим физико-химическим свойствам, имеют, однако, незначительное отличие по показателю преломления. Диапазон изменений показателя преломления используемых жидкостей лежит в интервале значений от 1,7 до 1,33.

Настоящая работа является продолжением [2] по исследованию коррекционных свойств оптических элементов, выполненных из разных материалов. Целью работы является исследование влияния показателей преломления жидкостного элемента с эффектом электросмачивания на его коррекционные свойства для совершенствования оптической элементной базы с изменяемыми оптическими характеристиками.

Рассмотрим влияние показателей преломления жидкостей, составляющих преломляющую поверхность жидкостного элемента (линзы на эффекте электросмачивания), на распределение суммы Зейделя по поверхностям и всего жидкостного элемента для сферической аберрации. Согласно теории аберрации третьего порядка минимальной сферической аберрацией обладает плосковыпуклая линза, обращенная выпуклой поверхностью в сторону параллельного пучка лучей.

В качестве примера рассмотрим коррекционные свойства одиночной плосковыпуклой линзы на эффекте электросмачивания, выполненной из разных жидких материалов, заключенных между двух кварцевых плоскопараллельных пластин. Рассматриваемые линзы будут иметь одинаковое фокусное расстояние 100 мм, относительное отверстие 1:4 и угол поля зрения 10°. В табл. 1 представлены некоторые параметры жидкостного оптического элемента на эффекте электросмачивания: радиусы преломляющих поверхностей, жидкости и составы жидкостей из работы [3]. Для сохранения оптической силы радиус преломляющей поверхности R_3 принимает значения согласно варианту в табл. 1.

Для оценки влияния сочетания показателей преломления на величину преломляющей поверхности введем коэффициент

$$\chi = \frac{n_{Дпр}}{n_{Днепр}},$$

где $n_{Дпр}$ - показатель преломления проводящей жидкости,

$n_{Днепр}$ - показатель преломления непроводящей жидкости

Таблица 1

Некоторые параметры жидкостного оптического элемента на эффекте электросмачивания

Вариант	Жидкости не проводящая / проводящая	n_D - жидкости		χ	R_3 , мм
		$n_{Днепр}$ не проводящая	$n_{Дпр}$ проводящая		
1	1-бромнафталин/ состав 14 [3]	1,6582	1,3515	0,815	30.65
2	состав 27 [3]	1,5405	1,3846	0,899	14.60
3	состав 14 [3]	1,4774	1,3515	0,916	12.33
4	октан / состав 3 [3]	1,3974	1,3995	1,002	-9,91
5	1,1,1,5,5,5 – гексафтор ацетилацетон / состав 3 [3]	1,3342	1,3995	1,049	-6.49

На рис. 1 представлена типовая оптическая схема жидкостного элемента.

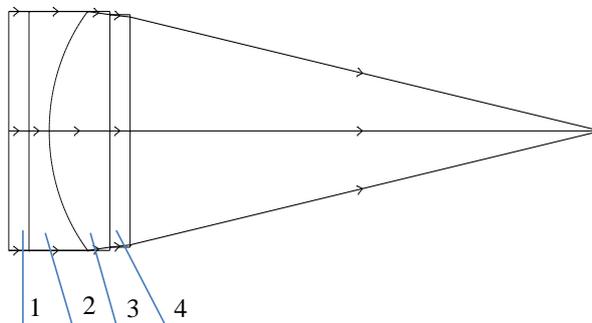


Рис. 1. Оптическая схема жидкостного элемента:

1, 4 – защитные стекла, 2- не проводящая жидкость, 3 – проводящая жидкость

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования жидкостного элемента по определению величины коэффициента aberrаций Зейделя S_I при разных значениях комбинаций показателей преломления.

Таблица 2

Значения S_I для разных комбинаций показателей преломления жидкостей

Поверхности	S_I по поверхностям жидкостного элемента для варианта				
	1	2	3	4	5
	$R_3=30,65$ мм	$R_3=14,60$ мм	$R_3=12,33$ мм	$R_3=-9,910$ мм	$R_3=-6,49$ мм
1	-0,000000	-0,000000	-0,000000	0,000000	-0,000000
2	-0,000000	-0,000000	-0,000000	0,000000	-0,000000
3	0,172290	0,760079	1,262508	6709,460	0,244234
4	-0,003222	-0,004219	-0,005232	-0,008520	-0,000316
5	0,017630	0,016355	0,017115	0,022901	0,000717
Σ	0,186698	0,772214	1,274392	6709,47	0,244636

На рис. 2 представлен график зависимости суммарной величины коэффициента aberrаций Зейделя S_I от отношения показателей преломления проводящей и не проводящей жидкостей, составляющих жидкостный элемент. График соответствует до разрыва функции на «плюс бесконечности» (точка 5-го варианта в график не включена).

По результатам моделирования можно сделать вывод о влиянии комбинации показателей преломления жидких материалов на распределение сферической aberrации по поверхностям и суммарно для всего элемента.

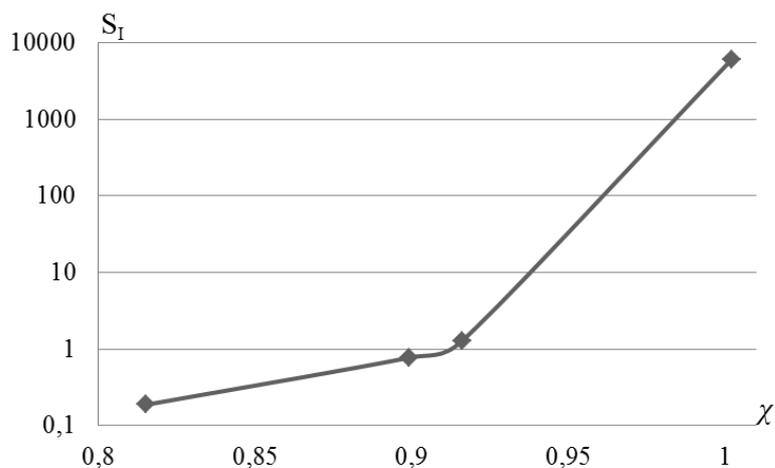


Рис. 2. График изменения S_I в зависимости от отношения χ

Наименьшие значения S_I жидкостный элемент имеет при минимальных значениях χ . При значениях χ , близких к 1, жидкостный элемент становится афокальным, независимо от радиуса преломляющей поверхности, и S_I стремится к бесконечности. При значениях χ более 1 жидкостный элемент меняет знак радиуса преломляющей поверхности, а численное значение уменьшается примерно в два раза, что приводит к уменьшению относительного отверстия.

Таким образом, для проектирования жидкостного элемента наибольший интерес представляют комбинации жидкостей с минимальным значением отношения показателей преломления проводящей и не проводящей жидкостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жидкие линзы – новая элементная база оптических и оптико-электронных приборов / А. В. Голицын, В. С. Ефремов, И. О. Михайлов, Н. В. Оревкова, Б. В. Федоров, В. Б. Шлишевский // 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. 1. – С. 7–11.

2. Макарова Д. Г., Ефремов В. С. Коррекционные свойства полевого компенсатора астрообъектива в субмиллиметровом диапазоне длин волн // 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. 1. – С. 116–120.

3. Pat. EP1979771B1. Multi-phase liquid composition and variable-focus optical lens driven by electrowetting that incorporates the / Amiot F., Malet G., Liogier D'ardhuy Gaëtan; Assignee Varioptic, SA. Publication Date: 11/02/2011.

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, 2014

УДК 621.37, 687.787, 530.182

**МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ КВАНТОВОЙ ПРИРОДЫ СВЕТА
И АДДИТИВНОГО ШУМА НА ПРИМЕРЕ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМ**

Виктор Сергеевич Соболев

ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, гл. научный сотрудник, тел. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

Галина Абрамовна Кащеева

ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-28-39

Феофил Арсентьевич Журавель

ФГБУН Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, ведущий инженер, тел. (383)333-28-39

Получены уравнения правдоподобия и исследованы пути их решения на примере сигналов лазерных доплеровских систем, работающих в режиме одночастичного и многочастичного рассеяния. Найдены границы Рао – Крамера. Путем компьютерного моделирования дана оценка качества оценок параметров получаемых сигналов.

Ключевые слова: оптические сигналы, оптимальный прием, доплеровские системы.

**MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATES OF OPTICAL SIGNALS PARAMETERS
IN VIEW OF THE QUANTUM NATURE OF LIGHT AND ADDITIVE NOISE
ON EXAMPLE OF LASER DOPPLER SYSTEMS**

Victor S. Sobolev

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyuga 1, D., Ch. Researcher, tel. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

Galina A. Kashcheeva

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyuga 1, scientific researcher, tel. (383)333-28-39

Feofil A. Zhuravel

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad. Koptyuga 1, Ph.D., Chief engineer, tel. (383)333-28-39

Likelihood equations are obtained and their solutions are investigated on the example of laser Doppler signal systems that operate in the single-particle and multiparticle scattering. The Cramer-Rao bounds are found. By computer simulation an estimate is obtained for the received signals parameter estimates quality.

Key words: optical signals, optimal reception, Doppler systems.

Появление лазеров и развитие оптоэлектроники вызвали большой интерес к проблеме рациональной обработки оптических сигналов. В отличие от сигналов радиосвязи и радиолокации, когда выходное напряжение антенны пропорционально принимаемой напряженности поля, прием оптических сигналов в силу квантовой природы света сопровождается неизбежным дробовым шумом, дисперсия которого пропорциональна мгновенной интенсивности света. Доклад посвящен получению оценок параметров оптических сигналов с использованием критерия максимального правдоподобия на примере лазерных доплеровских систем. Такой подход обещает получать оценки с наивысшей точностью.

Вначале рассмотрим решение поставленной задачи для одночастичного режима работы этих систем. Как известно [1], он имеет место, когда лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) применяется для исследования газовых потоков с естественной запыленностью. Для дифференциальной схемы ЛДА, представленной на Рис.1, получаемый сигнал имеет следующий вид

$$I(t) = A_0 \exp[-\xi^2 \omega_D^2 (t - t_0)^2] [1 + \cos \omega_D (t - t_0)], \quad (1)$$

где A_0 , ω_D и t_0 – соответственно, неизвестные амплитуда, доплеровская частота, пропорциональная скорости рассеивающей частицы, и момент появления частицы в центре измерительного объема; ξ – известный параметр оптической схемы.

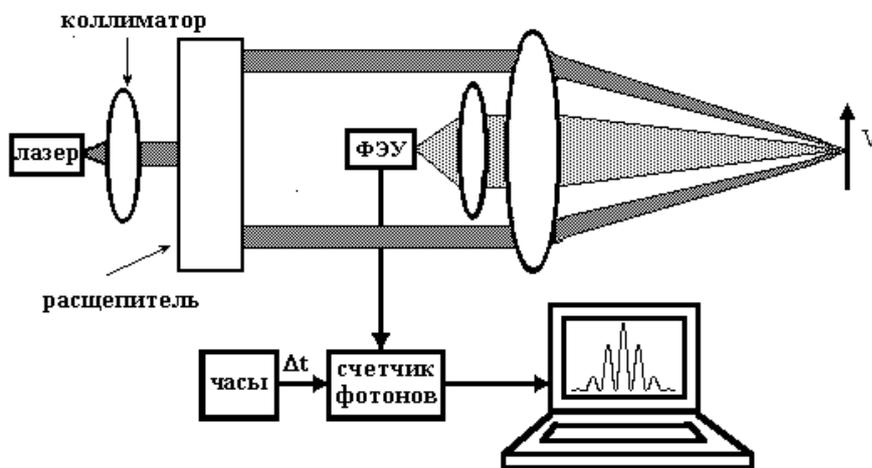


Рис. 1. Функциональная схема ЛДА

Из теории фотоэффекта, известно, что электрический сигнал на выходе фотодетектора при изменяющейся интенсивности света представляет собой нестационарный поток электронов, скорость эмиссии которых пропорциональна интенсивности оптического сигнала, а вероятность получения n отсчетов на интервале квантования Δt подчиняется закону Пуассона. Тогда совместная плот-

ность вероятностей значений полученного сигнала (функция правдоподобия) представляется в виде произведения,

$$P(n_1, \dots, n_N) = \prod_{i=1}^N P(n_i, \Delta t), \quad (2)$$

где $P(n_i, \Delta t)$ - пуассоновская вероятность получить отсчет сигнала n_i на интервале наблюдения Δt , N – число отсчетов. Как известно [2], максимально правдоподобные оценки параметров сигнала находятся по критерию достижения максимума логарифма функции правдоподобия. Учитывая (2), получим

$$\ln P(n_1, \dots, n_N) = \sum_{i=1}^N [n_i (\ln \lambda_i + \ln \Delta t) - \ln(n_i!) - \lambda_i \Delta t] \quad (3)$$

Дифференцируя (3) по интересующему нас неизвестному параметру λ и полагая, что весь сигнал уместается на интервале наблюдения T , получаем следующие уравнения правдоподобия для каждого неизвестного параметра

$$A_0^2 = \frac{\xi \cdot \omega_D}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N n_i \quad (4)$$

$$2\xi^2 \omega_D \sum_{i=1}^N n_i (t_i - t_0)^2 + \sum_{i=1}^N n_i (t_i - t_0) t g \frac{\omega_D (t_i - t_0)}{2} = \frac{\sqrt{\pi} A_0}{\xi \omega_D^2} \quad (5)$$

$$2\xi^2 \omega_D^2 \sum_{i=1}^N n_i (t_i - t_0) + \sum_{i=1}^N n_i \omega_D t g \frac{\omega_D (t_i - t_0)}{2} = 0 \quad (6)$$

Решение этой системы легко реализуется известными методами [3].

Минимальные относительные среднеквадратичные отклонения каждого параметра, соответствующие границам Рао-Крамера, имеют вид.

$$\frac{\sigma_{A_0}}{A_0} = \sqrt{\frac{\xi \omega_D}{A_0 \sqrt{\pi}}}; \quad \frac{\sigma_{\omega_D}}{\omega_D} = \sqrt{\frac{2\xi^3 \omega_D}{A_0 \sqrt{\pi}}}; \quad \frac{\sigma_{t_0}}{t_0} = \sqrt{\frac{\xi}{t_0^2 A_0 \omega_D \sqrt{\pi}}} \quad (7)$$

На рис. 2 представлены результаты численного решения уравнения правдоподобия для частоты.

$$A_0=1000; \quad \frac{\langle \omega_D \rangle - \omega_D}{\omega_D} = 0,005\%; \quad \frac{\sigma}{\omega_D} = 0,110\% \quad \left(\frac{\sigma_{(RAO)}}{\omega_D} = 0,106\% \right)$$

При работе анемометра в многочастичном режиме доплеровский сигнал в большинстве случаев образуется как сумма сигналов L от каждой рассеивающей свет частицы в соответствующий момент времени t_i .

$$Z(t) = \sum_{i=0}^L A_i \exp\{-[\sqrt{2} \xi \omega (t - t_i)]^2\} \exp[j\omega(t - t_i)], \quad (8)$$

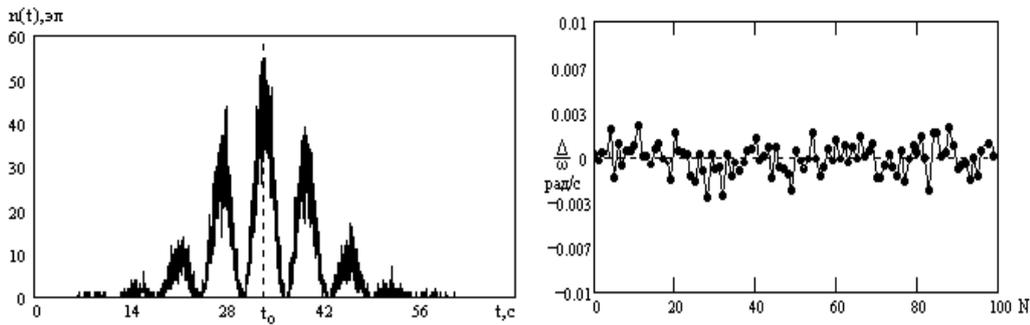


Рис. 2. а) модель сигнала, б) отклонения частоты

В силу центральной предельной теоремы теории вероятностей модель такого сигнала представляет собой случайный нормальный вектор \mathbf{z} комплексных отсчетов z_k , взятых через интервал дискретизации T и содержит сигнальную часть $s_k \exp(j\omega kT)$ и белый шум n_k

$$z_k = s_k \exp(j\omega kT) + n_k, \quad (9)$$

где s_k означает комплексную амплитуду сигнала, $k=0,1 \dots L$ – номер его отсчета. Его корреляционная функция представляется следующим образом

$$R(kT) = \sigma^2 \exp[-(\xi\omega kT)^2] \exp(j\omega kT) + \delta N_0. \quad (10)$$

С учетом изложенного логарифм функции правдоподобия примет вид

$$\ln p(\mathbf{z} | \omega) = -\frac{\mathbf{z}^{\text{Tr}*} \mathbf{D}(\mathbf{R} + \mathbf{N}\mathbf{I})^{-1} \mathbf{D}^* \mathbf{z}}{\sigma^2} - \ln |\mathbf{R} + \mathbf{N}\mathbf{I}| + \text{const}, \quad (11)$$

где \mathbf{z} – вектор-столбец комплексных отсчетов сигнала, \mathbf{R} – корреляционная матрица сигнала (9), то есть матрица с элементами $R(kT)$, $|\mathbf{R}|$ – ее определитель, а \mathbf{R}^{-1} – обратная матрица.

Теперь, чтобы получить уравнение правдоподобия для оценки интересующей нас скорости потока, необходимо продифференцировать это выражение по частоте. Анализ показал, что выполнить это требование даже при не очень большом количестве используемых отсчетов сигнала практически невозможно. В то же время с учетом колоссальных возможностей современной вычислительной техники можно предложить более простой путь решения задачи. Он состоит в том, что выбранное число отсчетов сигнала подставляется непосредственно в матричное выражение для логарифма функции правдоподобия (11), а стандартная функция «Maximize» библиотеки Маткад достаточно быстро нахо-

дит положение максимума этой функции, которое и является искомой максимально правдоподобной оценкой доплеровской частоты. Результаты компьютерного моделирования этого пути представлены ниже:

1. Осредненные значения оценок оказались весьма близкими к значению доплеровской частоты (заложенному в модели доплеровского сигнала) в пределах десятых долей процента. Это означает, что получаемые оценки частоты практически не смещены.

2. В отсутствие шума среднеквадратичные отклонения (СКО) оценок частоты практически не зависит от величины периода дискретизации сигнала и в первом приближении падает обратно пропорционально числу используемых отсчетов и времени корреляции. При наличии шума СКО оценок частоты существенно зависит не только от времени корреляции сигнала и числа используемы отсчетов, но и от периода дискретизации сигнала.

Чтобы наглядно продемонстрировать, как число используемых отсчетов сигнала снижает погрешности измерений, на рис. 3 показаны графики максимально правдоподобных оценок доплеровской частоты для случая, когда скорость исследуемого потока изменяется по синусоидальному закону

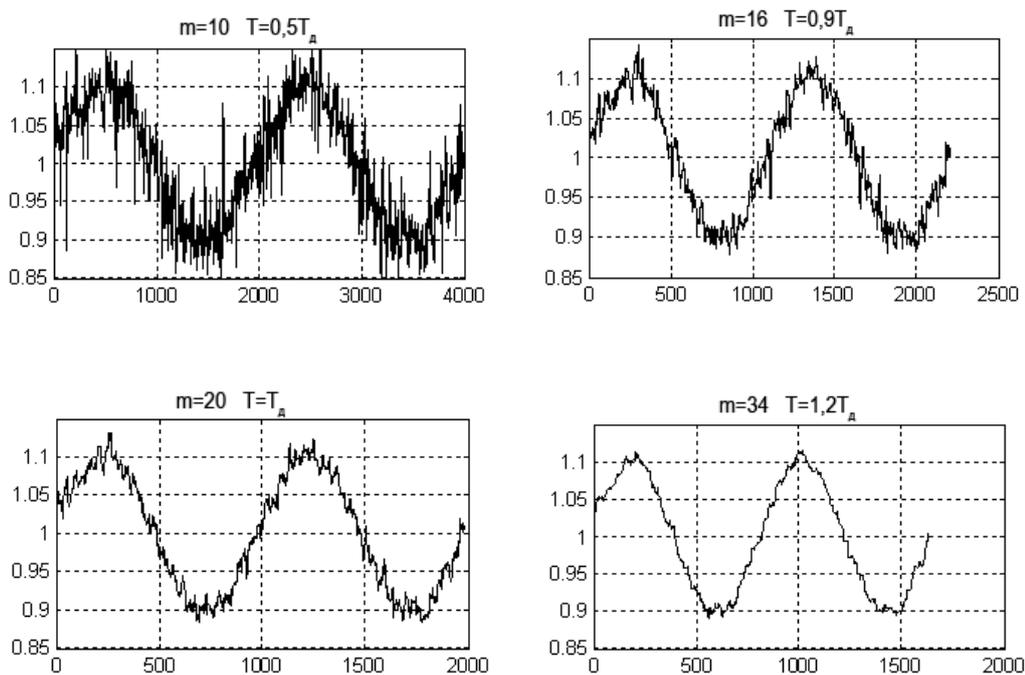


Рис. 3. Зависимость СКО максимально правдоподобных оценок частоты от числа m используемых отсчетов сигнала анемометра с временем корреляции 5 доплеровских периодов в присутствии шума, составляющего -10 dB по мощности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соболев В. С. Оптимальные оценки параметров оптических сигналов : монография. Новосибирск, Издательство СО РАН, 2011. - 144 с.
2. Ван Трис Г. Теория обнаружения оценок и модуляции : монография. Т. 1. М.: Сов. Радио, 1972. – 744 с.
3. Бахвалов Н.С. Численные методы : монография. М.: Наука,1975. – 244 с.

© В. С. Соболев, Г. А. Кащеева, Ф. А. Журавель, 2014

УДК 621.378.91

**БЕСКОНТАКТНАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ДИФфуЗНО РАССЕЙВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
МОДУЛЯЦИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Виктор Сергеевич Соболев

ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

Анатолий Миронович Щербаченко

ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-28-39

Евгений Николаевич Уткин

ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, главный специалист, тел. (383)333-28-39

Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование возможности построения новых лазерных систем для измерения параметров движения газов, жидкостей и твердых тел на основе амплитудной модуляции поля зондирующего лазерного излучения, отличающихся существенной простотой конструкции.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия.

**CONTACTLESS METHODS OF MOVEMENT PARAMETERS MEASUREMENT
FOR DIFFUZE SCATTERING OBJECTS ON THE BASE
OF THE PROBING LASER RADIATION MODULATION**

Victor S. Sobolev

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad Koptyuga 1, D., Ch. Researcher, tel. (383)333-28-39, e-mail: sobolev@iae.nsk.su

Anatoly M. Shcherbachenko

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad Koptyuga 1, senior scientific researcher, tel. (383)333-28-39

Evgeny N. Utkin

Federal State Institution of Science, Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAE), 630090, Russia, Novosibirsk, Acad Koptyuga 1, chief specialist, tel. (383)333-28-39

The theoretical and experimental grounds is presented of the possibility of new laser systems building for measuring the movement parameters of gases, liquids and solids based on amplitude modulation of electric field of the probing laser radiation, differing by essential design simplicity.

Key words: laser interferometry.

Существующие лазерные системы для бесконтактного измерения параметров движения отличаются большой сложностью и очень высокой стоимостью [1]. Во многом это определяется тем, что для выделения доплеровского смещения частоты в них применяется такой непростой и капризный узел, как интерферометр. В докладе предлагаются пути упрощения и удешевления этих систем за счет использования амплитудной модуляции мощности зондирующего излучения. При этом интерферометр из доплеровской системы исключается. Первая попытка решения этой задачи была предпринята в [1].

Итак, пусть модулирующая функция имеет вид

$$P(t) = [1 + m \cdot \cos(\Omega t)], \quad (1)$$

где m – индекс модуляции, а Ω ее круговая частота.

Поскольку мощность излучения пропорциональна квадрату амплитуды поля, то напряженность зондирующего поля будет выражаться, как

$$E(t) = \sqrt{1 + m \cdot \cos(\Omega t)} \cdot \exp(j\omega t) \quad (2)$$

Анализ показал, что спектр (Фурье-образ) этого поля для коэффициента модуляции $m = 1$ содержит 7 значащих гармоник, как показано на рис. 1а.

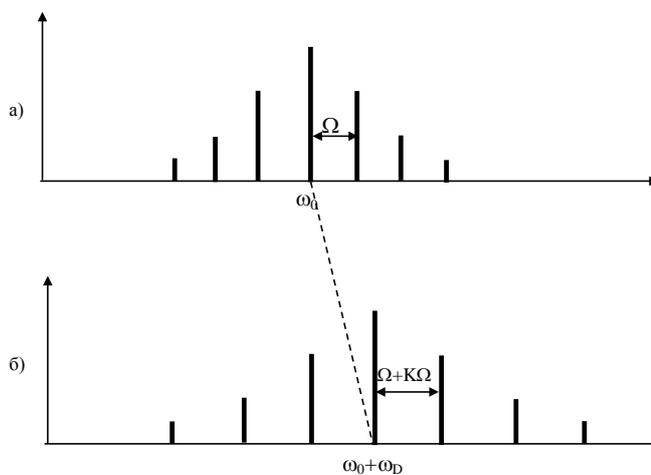


Рис. 1. Спектры а) поля зондирующего излучения, б) отраженного поля ω_0 - несущая частота

Доплеровский сдвиг частоты каждой гармоники рассеянного поля в нерелятивистском случае выражается известным соотношением [1]

$$\omega_D = \mathbf{V} \cdot (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{k}, \quad (3)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости, \mathbf{k}_s и \mathbf{k}_i – волновые векторы соответственно рассеянного и зондирующего полей, \mathbf{k} – разностный вектор, равный $(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i)$.

С учетом того, что модуль волнового вектора $|\mathbf{k}_i|=|\mathbf{k}_s|=2\pi/\lambda$, где λ – длина волны зондирующего излучения, доплеровскую частоту можно представить, как

$$\omega_D = |\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i| \cos \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} |\mathbf{V}| \cos \varphi = 2 \frac{\omega}{C} |\mathbf{V}| \cos \varphi = \omega K, \quad (4)$$

где ω – частота зондирующего излучения, равная $2\pi C/\lambda$, φ – угол между вектором скорости \mathbf{V} и вектором \mathbf{k} , C – скорость света, а коэффициент $K = 2 \frac{|\mathbf{V}|}{C} \cos \varphi$ и для любой гармоники зондирующего поля $\omega_D = K\omega$.

Теперь с учетом приведенного соотношения можно записать выражения для частоты каждой гармоники рассеянного излучения $\omega_{-3s}=(\omega-3\Omega)+K(\omega-3\Omega)$; $\omega_{-2s}=(\omega-2\Omega)+K(\omega-2\Omega)$; $\omega_{-1s}=(\omega-\Omega)+K(\omega-\Omega)$; $\omega_{0s}=(\omega+K\omega)$; $\omega_{1s}=(\omega+\Omega)+K(\omega+\Omega)$; $\omega_{2s}=(\omega+2\Omega)+K(\omega+2\Omega)$; $\omega_{3s}=(\omega+3\Omega)+K(\omega+3\Omega)$. Если из последующего значения частоты вычесть предыдущее, то получим расстояния между спектральными компонентами. Эта разность будет одинаковой и составит $\Delta\omega=\Omega(1+K)$. Из этого можно сделать вывод о том, что амплитуды и фазы спектральных линий зондирующего поля и рассеянного поля одинаковы, но разнос линий отличается на величину $\Delta\omega$, а это значит, что рассеянный свет остаётся амплитудно-модулированным колебанием, частота модуляции которого равна $\Omega(1+K)$. Спектр рассеянного излучения будет иметь вид, представленный на Рис.1б.

Если теперь выписать все спектральные компоненты этого поля в виде комплексных функций $E_i(t)=E_{0i}\exp\{j[(\omega+i\Omega)(1+K)t]\}$ и просуммировать их, получим выражение для рассеянного поля в виде $E(t)=\sum E_i(t)$, где суммирование идет по всем 7-ми гармоникам.

Остается найти сигнал на выходе детектора. Как известно, этот сигнал пропорционален квадрату модуля поля. Чтобы найти его выражение, достаточно умножить выражение (2) на комплексно сопряженное с ним. Выполняя эту операцию, получим

$$I_d(t) = 1 + \cos[\Omega(1+K)t] \quad (5)$$

Как видим, сигнал на выходе фотодетектора аналогичен модулирующему, но смещен на новую доплеровскую частоту, пропорциональную скорости и равную Ω . Коэффициент $K=2\Omega|\mathbf{V}|\cos\varphi/C$. Знак перед коэффициентом K в формуле (5) положителен, если объект движется к лазеру и отрицателен, если от него.

Таким образом, показано, что предлагаемая конструкция доплеровской системы дает на выходе сигнал, частота которого сдвинута на иную доплеровскую частоту, чем в типичном доплеровском устройстве, но этот сдвиг также пропорционален скорости.

Дальнейшая обработка получаемого сигнала заключается в переносе его спектра в область нулевых частот путем умножения на квадратурные сигналы модулирующей функции и получения двух компонент комплексного сигнала новой доплеровской частоты $\Omega_D = K\Omega$

$$Z_c(t) = U_0 \cos(\pm K\Omega t); \quad Z_s(t) = U_0 \sin(\pm K\Omega t) \quad (6)$$

Для оценки этой новой доплеровской частоты используется нижеследующий алгоритм, реализуемый компьютером после ввода в его память оцифрованных значений сигнала (6),

$$\Omega_{Dn} = T^{-1} \left\{ \text{Atan} \left[\frac{\text{Im}(Z_n^* Z_{n+1})}{\text{Re}(Z_n^* Z_{n+1})} \right] \right\} \quad (7)$$

где Z_n и Z_{n+1} - комплексные отсчеты сигнала (6), T – период дискретизации сигнала по времени, а звездочка означает операцию комплексного сопряжения.

Как следует из вышеизложенного анализа, предложенная конструкция доплеровской системы не содержит интерферометра оптических полей. Это очень важное преимущество предложенного принципа, так как позволяет использовать не только когерентный, но и любой источник света для формирования зондирующего луча. В качестве примера оценим значение доплеровской частоты для случая, когда скорость исследуемого объекта составляет 100 м/с, частота модуляции $\Omega = (2\pi) \cdot 10^9$ Гц, а угол $\varphi = 0$. $f_D = \Omega_D / 2\pi = 2|V|\Omega / 2\pi C = 660$ Гц.

Эта частота может быть оценена с высокой точностью.

Для экспериментальной проверки предложенного принципа был исследован макет, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

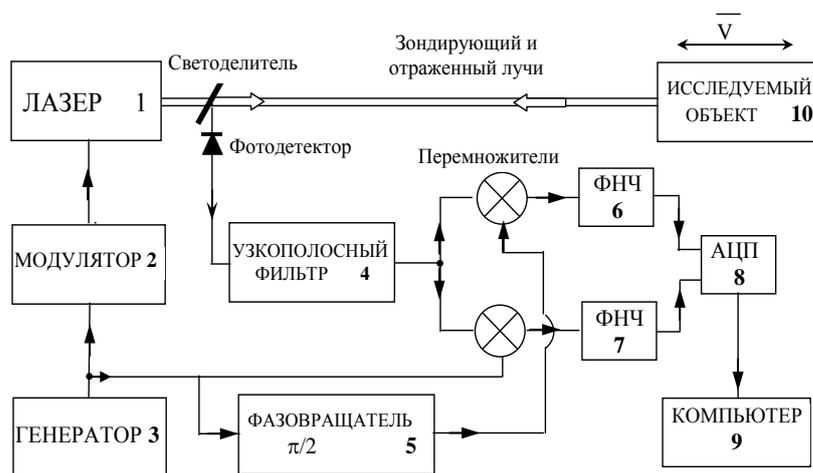


Рис. 2. Функциональная схема макета

В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волна излучения 650 нм, который модулировался сигналом частотой 80 МГц. Длина волны сигнала модуляции в этом случае является эталоном и составляет 3,75 м. В качестве отражателя использовался уголкового отражателя или белая бумага. Макет использовался в режиме измерителя перемещений. При перемещении объекта измерялась текущая фаза φ . Перемещение определялось, как $L = \lambda\varphi/4\pi$. Максимальная ошибка при перемещении объекта на 1,5 м составила 7 мм.

Общий вид экспериментальной установки представлен на Рис. 3. На экране осциллографа представлен выходной сигнал при перемещении объекта на 2 м вперед и назад.

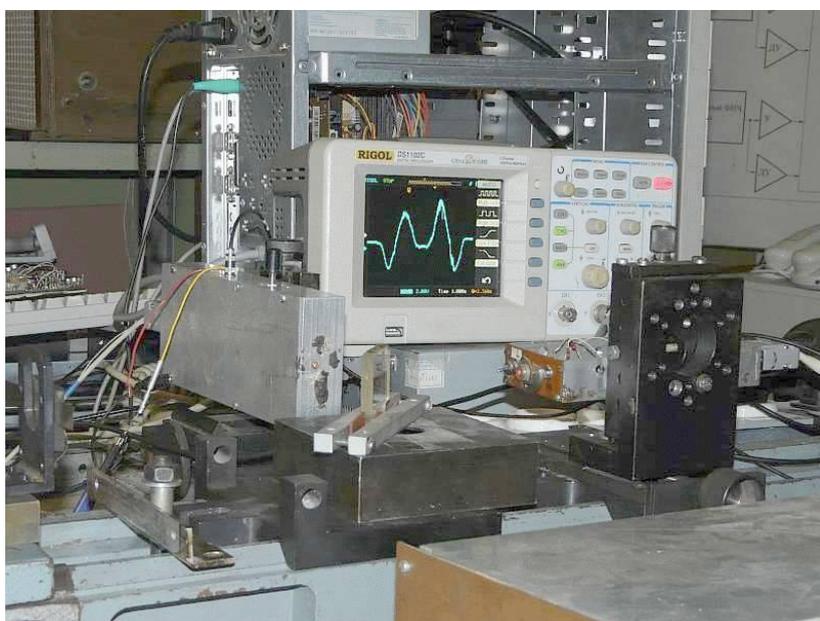


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия : монография. Новосибирск, Наука, 1983. – 216 с.
2. Патент CN102798866 «Laser radar system and compound distance-measuring and speed-measuring method adopting sine-wave amplitude modulation and phase pulse code modulation of same», МПК G01S17/32, G01S7/483, опубликован 2012-11-28.

© В. С. Соболев, А. М. Щербаченко, Е. Н. Уткин, 2014

УДК 535.417

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕМНЫМ ВНЕОСЕВЫМ ГОЭ

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)343-29-33, e-mail: opttechnic@mail.ru

Александра Алексеевна Дианова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студентка, тел. (383)343-29-33, e-mail: opttechnic@mail.ru

Рассматриваются особенности формирования изображений объемным внеосевым ГОЭ с анизотропной усадкой. Представлены условия стабилизации изображений объемных внеосевых ГОЭ.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, стабилизация изображения.

FEATURES OF IMAGING FORMED BY VOLUME NONAXIAL HOEs

Yury S. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate professor, tel. (383)343-29-33, e-mail: opttechnic@mail.ru

Alexandra A. Dianova

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., student, tel. (383)343-29-33, e-mail: opttechnic@mail.ru

The features of an off-axis imaging volume nonaxial HOE with anisotropic shrinkage. Presented conditions for the stabilization of images of volume nonaxial HOE.

Key words: holographic optical elements, image stabilization.

Введение. Развитие оптики и оптических технологий на современном этапе характеризуется разработкой приборов и устройств на основе лазеров с длинами волн от инфракрасной до мягкой рентгеновской области спектра. Ограниченность, а зачастую, и невозможность применения стеклянных рефракционных оптических элементов для длин волн излучения инфракрасной, вакуумно-ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра диктуют необходимость совершенствования известных оптических элементов, например объемных голограммных оптических элементов (ГОЭ) [1,2]. Объемные ГОЭ из-за значительно меньшей толщины по сравнению со стеклянными линзами могут быть использованы для фокусировки излучения и формирования изображения в тех областях электромагнитного спектра, где из-за поглощения или слабого преломления затруднено применение стеклянных линз [3,4]. При практическом применении объемных ГОЭ требуется учет его нагрева, изменения размеров

(деформации) и изменения оптических характеристик объема ГОЭ. Целью работы является рассмотрение особенностей формирования изображений объемным внеосевым ГОЭ с анизотропной усадкой.

Условия формирования изображения объемным ГОЭ. Рассмотрим объемный внеосевой ГОЭ с анизотропной усадкой находящийся в диэлектрической среде с показателем преломления равным среднему показателю преломления ГОЭ. Это позволяет не учитывать преломление на поверхностях объема ГОЭ. Известно, например, что в мягкой рентгеновской области спектра, показатели преломления многих сред очень близки к показателю преломления воздуха [3,4]. Также считается, что рабочая длина волны λ_c может не совпадать с длиной волны записи λ_o , а средний показатель преломления n_c объема ГОЭ при его использовании может отличаться от его среднего показателя n_o на стадии записи. В дальнейшем объемный внеосевой ГОЭ будем называть просто объемным ГОЭ.

На рис. 1а и 2а представлены сагиттальные плоскости рабочих схем использования пропускающего и отражающего объемного ГОЭ, где A_c и B_c – две близкие точки предмета и соответствующие им A_i и B_i – точки изображения, $M(x,y,z)$ – произвольная точка объема ГОЭ. На рис. 1 и 2 ось Oz декартовой системы координат является оптической осью и направлена перпендикулярно поверхностям ГОЭ. Плоскость координат xOy проходит через центр ГОЭ.

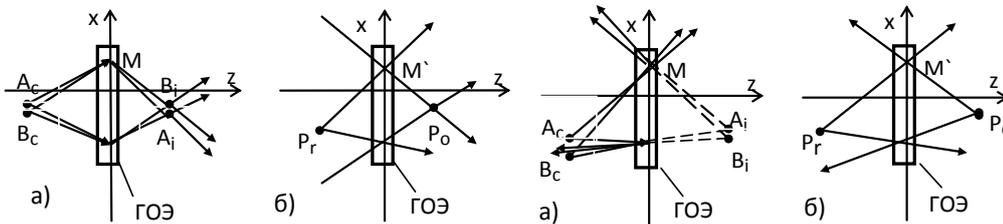


Рис. 1. Рабочая схема (а) и схема записи (б) пропускающего объемного ГОЭ

Рис. 2. Рабочая схема (а) и схема записи (б) отражающего объемного ГОЭ

На рис. 1б и 2б представлены сагиттальные плоскости схемы записи объемного ГОЭ опорной и объектной сферическими (цилиндрическими) волнами, где $P_r(x_r, y_r, z_r)$ – точечный источник опорной (референтной) волны, $P_o(x_o, y_o, z_o)$ – точечный источник объектной волны, $M'(x', y', z')$ – точка объема ГОЭ при записи, соответствующая точке $M(x, y, z)$ при восстановлении. Координаты $x' = x/m_x$, $y' = y/m_y$, $z' = z/m_z$, где m_x , m_y , m_z – коэффициенты усадки или набухания объемного ГОЭ вдоль соответствующих осей декартовой системы координат. Расстояния в рабочей схеме обозначим: $B_c M = l_c$, $M B_i = l_i$, $A_c O = d_c$, $O A_i = d_i$, а в схеме записи: $P_r M' = l_r$, $M' P_o = l_o$, $P_r O = d_r$, $O P_o = d_o$.

Для объемного ГОЭ характеристическая функция $V(x,y,z)$ записывается в виде

$$V(x,y,z) = l_c - d_c \pm (l_i - d_i) - km(x,y,z)\lambda_c/n_c, \quad (1)$$

где $m(x,y,z) = n_o(l_r - d_r \pm (l_o - d_o))/\lambda_o$ – распределение количества периодов модуляции показателя преломления, коэффициента поглощения или толщины, n_o и n_c – начальное и среднее конечное значения показателя преломления, λ_o – длина волны лазера, используемого при записи, λ_c – рабочая длина волны, k – порядок дифракции. Верхний знак “плюс” в выражениях для $V(x,y,z)$, $m(x,y,z)$ и последующих выражениях соответствует отражающим объемным ГОЭ, а нижний знак “минус” – пропускающим объемным ГОЭ.

В силу пространственной и угловой селективности объемных ГОЭ практический интерес представляет случай, когда поперечные размеры (диаметр) объемного ГОЭ намного меньше расстояний d_c , d_i до плоскостей предмета и изображения, но больше размеров предмета и изображения. Кроме этого, считаем, что при записи отклонение от оптической оси источников опорной и объектной волн меньше поперечных размеров объемного ГОЭ, а размеры ГОЭ много меньше расстояний d_r , d_o от нее до источников опорной и объектной волн. Также считаем, что толщина ГОЭ много меньше расстояний d_c , d_i , d_r , d_o . Выражения для расстояний l_c , l_i могут быть разложены в ряд по величинам малости (отношения координат x_c , u_c , x_i , u_i , x , u , z точек B_c , B_i , M соответственно к расстояниям d_c и d_i). Аналогичным образом, разлагая выражения для расстояний l_r , l_o , и подставляя в характеристическую функцию (1) $V(x,y,z)$ объемного ГОЭ, можно представить ее в виде суммы [2,5]

$$V(x,y,z) = x^2F_{200}/2 + y^2F_{020}/2 - xB_{100} - yB_{010} + (x^2/2)(zF_{201} + z^2F_{202}) + (y^2/2)(zF_{021} + z^2F_{022}) - zB_{001} - z^2B_{002} - xzB_{101} - xz^2B_{102} - yzB_{011} - yz^2B_{012}. \quad (2)$$

Для объемного ГОЭ, регистрируемого двумя цилиндрическими волнами, в характеристической функции отсутствуют члены разложения, зависящие от координаты u (при совпадении сагиттальной плоскости этого ГОЭ с плоскостью координат xOz) [6,7].

Явный вид абберационных коэффициентов V_{ijk} и F_{ijk} приведен в [2,5,8], индексы i,j,k , принимающие числа 0;1;2, совпадают соответственно с значениями показателей степени переменных x,y,z в разложении (2) характеристической функции $V(x,y,z)$. Выражения для коэффициентов B_{100} , B_{010} , F_{200} , F_{020} совпадают с известными выражениями коэффициентов аббераций тонкого ГОЭ [5]. В сагиттальной плоскости рабочая схема объемного ГОЭ может быть рассчитана при выполнении:

а) условия отсутствия дефокусировки,

$$F_{200} = 1/d_c \pm 1/d_i - k\mu(1/d_r \pm 1/d_o)/m_x^2 = 0, \quad (3)$$

б) условия отсутствия дефокусировки, обусловленной учетом толщины ГОЭ,

$$F_{201} = 1/d_c^2 \pm 1/d_i^2 - k\mu(1/d_r^2 \pm 1/d_o^2)/m_x^2 m_z = 0, \quad (4)$$

где $\mu = n_o \lambda_o / n_c \lambda_c$, k – порядок дифракции ($k = \pm 1$). Для объемного отражающего ГОЭ следует учитывать еще известное условие, указывающее на его высокую спектральную селективность [2,5]: $k\mu = m_z$.

Для объемного пропускающего ГОЭ в сагиттальной плоскости из выражения (3) получаем известную формулу тонкой голограммы

$$1/d_c - 1/d_i = 1/F_1, \quad (5)$$

где $F_1 = m_x^2 n_c \lambda_o / k n_o \lambda_c (1/d_r - 1/d_o)$ – фокусное расстояние объемного пропускающего ГОЭ. С учетом (5) из (4) получаем формулу сферического зеркала

$$1/d_c + 1/d_i = 1/F'_m, \quad (6)$$

где $F'_m = m_z / (1/d_r + 1/d_o)$ – фокусное расстояние сферического зеркала.

Для объемного отражающего ГОЭ из выражений (3), (4) получаем

$$\begin{aligned} 1/d_c + 1/d_i &= 1/F_m, \\ 1/d_c - 1/d_i &= 1/F'_1, \end{aligned} \quad (7)$$

где $F_m = m_x^2 / m_z (1/d_r + 1/d_o)$ – фокусное расстояние объемного отражающего ГОЭ,

$F'_1 = [2(1/d_r^2 + 1/d_o^2)/m_x^2 - 1/F_m^2]^{-1/2}$ – фокусное расстояние тонкой линзы.

Для отражающего объемного ГОЭ должно выполняться еще дополнительное условие: подкоренное выражение в формуле для F'_1 должно быть больше нуля. При замене коэффициента усадки m_x на m_y формулы (5)–(7) справедливы для меридиональной плоскости объемного ГОЭ. Формулы (5)–(7) при замене расстояний d_c, d_i, d_r, d_o на z_c, z_i, z_r, z_o справедливы и для осевого объемного ГОЭ [9].

Обсуждение. При выводе формул (5)–(7) приравнялся к нулю первый порядок разложения по координате z характеристической функции $V(x, y, z)$, поэтому из этих формул следует (в первом приближении) независимость формирования изображения точек предмета от толщины ГОЭ. Формулы (5)–(7) лежат в основе зеркально-линзовых моделей объемных ГОЭ, предложенных и развитых в работах автора [10].

Средний показатель преломления n_c объема ГОЭ может быть представлен в виде

$$n_c = n_o + \Delta n_f + (\partial n_c / \partial T) \Delta T + (\partial n_c / \partial \sigma) \Delta \sigma, \quad (8)$$

где n_0 – начальное значение показателя преломления при записи; Δn_f – фотоиндуцированное изменение показателя преломления; ΔT и $\Delta \sigma$ – изменения температуры и механического напряжения; $\partial n / \partial \sigma$, $\partial n / \partial T$ – коэффициент фотоупругости и термооптический коэффициент.

Коэффициенты усадки m_x , m_y , m_z объемного ГОЭ вдоль осей декартовой системы координат могут быть представлены в виде

$$m_x = 1 + \gamma_x + \alpha_x \Delta T + E_x \Delta \sigma, \quad m_y = 1 + \gamma_y + \alpha_y \Delta T + E_y \Delta \sigma, \quad m_z = 1 + \gamma_z + \alpha_z \Delta T + E_z \Delta \sigma, \quad (9)$$

где γ_x , γ_y , γ_z , α_x , α_y , α_z , E_x , E_y , E_z – соответственно коэффициенты усадки (набухания), линейного температурного расширения и модули упругости объема ГОЭ вдоль осей Ox , Oy и Oz .

Рассмотрим следствия из (5)-(7), которые не зависят в первом приближении от толщины объемного ГОЭ, в частности:

1. Известные особенности объемных ГОЭ, а именно, существование одной оптимальной пары сопряженных плоскостей предмета и изображения, отличия пространственной и угловой дисперсии по сравнению с тонкими ГОЭ, являются простыми следствиями формул (5)–(7). Так, выражения, позволяющие рассчитать положения сопряженных плоскостей предмета и изображения для объемного пропускающего ГОЭ, получаются при сложении и вычитании формул (5) и (6)

$$1/d_c = 1/2F_1 + 1/2F'_m, \quad 1/d_i = 1/2F'_m - 1/2F_1.$$

Для объемного отражающего ГОЭ аналогичные формулы получаются из системы (7). Оптимальным положениям сопряженных плоскостей соответствует одно значение линейного коэффициента увеличения $\beta = d_i/d_c$. Продольная дисперсия объемного внеосевого пропускающего ГОЭ в меридиональной плоскости равна

$$\partial d_i / \partial \lambda_c = -d_i^2 / 2F_1 \lambda_c,$$

где F_1 – фокусное расстояние ГОЭ. Видно, что дисперсия объемного пропускающего ГОЭ в два раза меньше дисперсии тонкого ГОЭ, записанного в той же схеме, что и объемный ГОЭ. Важность этого факта заключается в том, что становится возможной разработка голограммных трехкомпонентных объективов с исправленной хроматической абберацией. Главным компонентом такого объектива является объемный ГОЭ, расположенный между двумя тонкими ГОЭ.

Обратная угловая дисперсия объемного пропускающего ГОЭ в сагиттальной плоскости равна

$$d\lambda_c / d\Theta_i = -\lambda_c \operatorname{ctg}(\Theta_c/2 - \Theta_i/2),$$

и больше обратной угловой дисперсии тонкого ГОЭ. В видимом диапазоне спектра угловая дисперсия объемного ГОЭ проявляется в цветном окрашивании изображения.

2. Подставляя (8) и (9) в выражения для фокусных расстояний, получаем формулу пропускающего объемного ГОЭ в виде

$$\begin{aligned} 1/F_1 &= 1/d_c - 1/d_i = k\lambda_c(1/\lambda_o d_r - 1/\lambda_o d_o)(1 - \Delta n_f - 2\gamma_x - \\ &\quad - (\partial n_c/n_o \partial T + 2\alpha_x)\Delta T - (\partial n_c/n_o \partial \sigma + 2/E_x)\Delta \sigma), \\ 1/F'_m &= (1/d_r + 1/d_o)/m_z = (1/d_r + 1/d_o)(1 - \gamma_z - \alpha_z \Delta T - \Delta \sigma/E_z), \end{aligned} \quad (10)$$

и отражающего объемного ГОЭ в виде

$$\begin{aligned} 1/F_m &= 1/d_c + 1/d_i = (1/d_r + 1/d_o)(1 - (2\gamma_x - \gamma_z + (2\alpha_x - \alpha_z)\Delta T + (2/E_x - 1/E_z)\Delta \sigma), \\ 1/F_1'^2 &= 2(1/d_r^2 + 1/d_o^2)/m_x^2 - 1/F_m^2 = \\ &= 2(1/d_r^2 + 1/d_o^2)(1 - 2\gamma_x - 2\alpha_x \Delta T - 2\Delta \sigma/E_x) - 1/F_m^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Для меридиональной плоскости аналогичные формулы получаются при замене коэффициентов среды вдоль оси Oх на коэффициенты вдоль оси Oу. Из формул (10)-(11) могут быть получены условия стабилизации рабочей схемы пропускающего объемного ГОЭ в виде [11]

$$\begin{aligned} \Delta n_f/n_o + 2\gamma_x + (\partial n_c/n_o \partial T + 2\alpha_x)\Delta T + (\partial n_c/n_o \partial \sigma + 2/E_x)\Delta \sigma &= 0, \\ \gamma_z + \alpha_z \Delta T + \Delta \sigma/E_z &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

а для отражающего объемного ГОЭ (с учетом селективности $k_\mu = m_z$) в виде

$$\begin{aligned} 2\gamma_x - \gamma_z + (2\alpha_x - \alpha_z)\Delta T + (2/E_x - 1/E_z)\Delta \sigma &= 0, \\ \gamma_x + \alpha_x \Delta T + \Delta \sigma/E_x &= 0, \\ \Delta n_f/n_o + \gamma_z + (\partial n_c/n_o \partial T + \alpha_z)\Delta T + (\partial n_c/n_o \partial \sigma + 1/E_z)\Delta \sigma &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Из условий (12)-(13) могут быть получены значения изменений температуры ΔT и напряжения $\Delta \sigma$ пропускающего объемного ГОЭ при которых ее рабочая схема остается стабильной. Для отражающего объемного ГОЭ величины изменений температуры ΔT , напряжения $\Delta \sigma$ и показателя преломления Δn_f следуют из решения системы (13).

2. Учет селективности объемного ГОЭ позволяет увеличить глубину резкости изображения. Так при перемещении осевой точки предмета вдоль оптической оси меняется угол падения лучей на локальные участки поверхности ГОЭ. При этом для узких пучков волны, падающих вблизи края ГОЭ, из-за угловой селективности локально не выполняется условие дифракции Брэгга. Это

приводит к уменьшению диаметра поверхности и соответствующему уменьшению объема ГОЭ, в котором может иметь место эффективная дифракция. В свою очередь, уменьшение диаметра ГОЭ приводит к уменьшению дефокусировки и соответственно к увеличению глубины резкости изображения. Повышенная глубина резкости облегчает процесс юстировки и настройки на плоскость изображения, что особенно важно в таких областях спектра как вакуумный ультрафиолетовый и мягкий рентгеновский. Как известно, в этих диапазонах спектра из-за поглощения молекулами воздуха излучения рабочие схемы устройств размещаются в вакууме. Поэтому возможности юстировки плоскости изображения очень ограничены и представляют собой технически сложную задачу.

3. Увеличение среднего коэффициента поглощения объема ГОЭ приводит как к уменьшению интенсивности формирующей изображение волны, так и к уменьшению интенсивностей волн нулевого порядка и других волн, образующих шум в изображении. При дифракционном качестве изображения точки предмета учет поглощения приводит к уменьшению ширины пространственного распределения интенсивности изображения. Что в свою очередь приводит к уменьшению аббераций и увеличению разрешения объемного ГОЭ. При этом отношение сигнал/шум объемного ГОЭ в первом приближении не изменяется.

Заключение. Из характеристической функции объемного ГОЭ, записываемого в среде с анизотропной усадкой двумя сферическими (или цилиндрическими) волнами, получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать его рабочие схемы с учетом изменений температуры, показателя преломления и размеров голографической среды. Получено, что для объемного пропускающего ГОЭ обратные расстояния до источников волн в схеме восстановления прямо пропорциональны порядку дифракции, отношению рабочей длины волны к длине волны записи в среде и обратно пропорциональны коэффициенту усадки по толщине среды ГОЭ. Для объемного отражающего ГОЭ зависимость расстояния до источников волн в схеме восстановления от коэффициента усадки по толщине и отношения рабочей длины волны к длине волны записи в среде одинакова. Показано, что характер зависимости коэффициента увеличения объемного пропускающего ГОЭ от отношения длин волн в среде, коэффициента усадки по толщине и квадрата обратной величины коэффициента усадки в плоскости ГОЭ однопольный. Показано, что пространственная дисперсия объемного внеосевого ГОЭ в два раза меньше пространственной дисперсии тонкого ГОЭ, записанного в той же схеме, что и объемный ГОЭ. Угловая дисперсия объемного внеосевого пропускающего ГОЭ меньше угловой дисперсии тонкого внеосевого ГОЭ за исключением случая с симметричными углами. Угловая дисперсия объемного отражающего ГОЭ обратно пропорциональна угловой дисперсии объемного пропускающего ГОЭ, имеющего такой же угол распространения падающей волны и противоположное направление дифрагировавшей волны. Получены выражения условий стабилизации рабочей схемы пропускающего и отражающего объемных ГОЭ. Указывается, что увеличение среднего коэффициента поглощения приводит к уменьшению аббераций и уве-

личению разрешения объемного ГОЭ, а учет селективности позволяет увеличить глубину резкости изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // *Опт. и спектр.* – 1963. – Т. 15, № 4. – С. 522-532.
2. Forshaw M.R.B. The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms // *Opt. Acta.* – 1973. – V. 20, N. 9. – P. 669–686.
3. Рентгеновская оптика и микроскопия / под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа; пер. с англ. Н.Н. Зорева и И.В. Кожевникова; под ред. А.В. Виноградова. – М.: Мир, 1987. – 464 с.
4. Аристов В.В., Шабельников Л.Г. Современные достижения рентгеновской оптики преломления / *УФН.* – 2008. Т. 178, вып. 1. – С. 61-83.
5. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. –Л., ГОИ. – 1984. – 140 с.
6. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Расчет схемы записи цилиндрическими волнами объемного внеосевого голографического оптического элемента // *Автометрия* – 1999. – № 4. – С. 33–38.
7. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Формирование сопряженных плоскостей внеосевого объемного цилиндрического голографического оптического элемента // *Автометрия.* – 2003. – Т. 39, № 2. – С. 23–29.
8. Батомункуев Ю. Ц. Теория aberrаций объемного рентгеновского голограммного оптического элемента // *ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.).* – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5, ч. 2. – С. 57–63.
9. Батомункуев Ю. Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизотропной усадкой // *Автометрия.* – 2002. – № 2. – С. 108–114.
10. Батомункуев Ю. Ц. Зеркально-линзовая модель внеосевого объемного голограммного элемента с изотропной усадкой // *Изв. вузов. Физика.* – 2010.– № 10. – С. 91–96.
11. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Стабилизация положений интерференционных полос при записи объемной голограммы в реальном времени // *Автометрия.* – 2000. – № 1. – С. 50–56.

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, 2014

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
Пороговых энергетических характеристик
и быстродействия тонкоплёночных термооптических затворов
в видимом и ИК диапазонах спектра**

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ведущий инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Игорь Олегович Михайлов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и опто-техники, тел. (383)343-29-29, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Описаны методики измерения времени срабатывания и пороговых энергетических характеристик пассивных тонкоплёночных термооптических затворов. Представлены результаты испытаний таких затворов в диапазоне длин волн (0,5–10) мкм.

Ключевые слова: пассивный термооптический затвор, порог срабатывания, тонкие плёнки, быстродействие.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THRESHOLD ENERGETIC PROPERTIES AND RAPIDITY OF ACTION THIN FILM THERMO-OPTICAL SHUTTERS IN VISIBLE AND IR DIAPASON OF LIGHT

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Valery A. Reichert

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Engineer of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associated prof. of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of department of physics, tel. (383)3610836, e-mail: denlnsk@mail.ru

Dmitry M. Nikulin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Igor O. Mihajlov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associated prof. of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: kaf.nio@snga.ru

The technique of measuring operating time and threshold energetic properties of passive thin-film thermo-optical shutters are shown. The results of testing such shutters in wavelength diapason (0,5–10) μm are present.

Key words: passive thermo-optical shutter, operation threshold, thin films, rapidity of action.

Проблема оптического ограничения интенсивности лазерных излучений, необходимого для защиты глаз наблюдателей и чувствительных приёмников излучений от ослепления, весьма актуальна [1–10].

В статьях [1–9] рассматриваются оптико-физические и технологические аспекты нелинейно-оптических ограничителей, использующих фуллереносо-

держающие среды и среды с углеродными наночастицами. Созданы ограничители излучений видимого диапазона спектра, срабатывающие (ограничивающие) при энергии наносекундного импульса падающего излучения порядка $(0,1-1,0)$ Дж/см², частоте следования импульсов до 10 Гц и допустимой энергии импульса не более $(2-5)$ Дж/см² [1,5,6,9].

В патентной литературе представлены описания быстродействующих затворов на основе прожигаемых сфокусированным мощным лазерным излучением тонких зеркальных металлических плёнок [10,11], также используемых для ограничения энергии импульса излучения, падающего на приёмные устройства. Такие затворы могут обладать меньшей величиной порога срабатывания (перехода в режим нелинейно-оптического ограничения), чем фуллероидные, устойчивы, в отличие от фуллероидных, под воздействием высокочастотных импульсно-периодических лазерных облучений.

В данной работе описываются методики измерения параметров тонкоплёночных ограничителей – затворов и представлены результаты испытаний таких затворов в диапазоне $(0,5-10)$ мкм длин волн. Особенности некоторых усовершенствованных конструкций затворов и предпочтительные оптические схемы их использования рассмотрены в нашей работе [12].

Используется многослойная тонкоплёночная структура, сформированная на поверхности прозрачной в необходимом диапазоне спектра подложки, например, на поверхности полимерной мембраны (рис. 1).

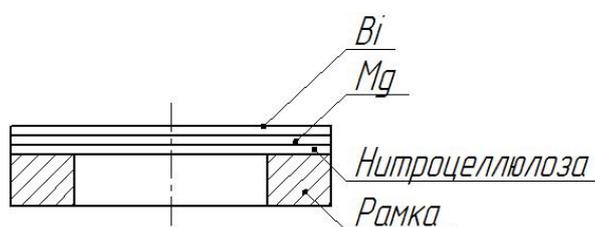


Рис. 1. Конструкция мембранного ограничителя излучений видимого и ИК диапазонов спектра

На металлической рамке в форме кольца закреплена мембрана из нитроцеллюлозы, на поверхности которой нанесены слои магния толщиной $0,01$ мкм (нижний слой) и висмута $0,04$ мкм.

Верхний слой структуры является нелинейно-оптическим зеркалом, проявляющим переключающие свойства при наносекундном облучении, при котором его температура повышается до высокого значения (до плавления или испарения), что инициирует резкое уменьшение коэффициента отражения зеркала. Мембрана помещается в плоскости промежуточного действительного изображения наблюдаемой сцены, формируемого оптикой наблюдательного устройства.

Оптико-механическая схема устройства для измерения времени запаздывания срабатывания и порогов срабатывания тонкоплёночных затворов приве-

дена на рис. 2. Устройство в своём составе имеет лазерный твердотельный излучатель на Nd:YAG с длиной волны 1,06 мкм и возможностью удвоения частоты излучения, длительность импульса излучения 20 нс, телескоп – расширитель лазерного пучка, приёмник излучения с постоянной времени 0,2 нс и цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц. Зеркальный объектив 3 диаметром 100 мм формирует на поверхности исследуемого затвора 4 промежуточное действительное изображение излучения лазерного пучка излучателя 1, входным окном объектива является область диаметром 60 мм. выходным окном – область диаметром 30 мм, обе области и исследуемый образец размещены в пределах входной апертуры сферического объектива. Второе действительное изображение формируется на поверхности фотоприёмника 7 дополнительным объективом 6. Фотоприёмник 7 является в данном устройстве подвергаемым лучевому повреждению объектом. В момент прожигания прозрачного отверстия в тонкой плёнке затвора 4 излучение непрерывного «зелёного» лазера 8 проходит к приёмнику 10, длительность переднего фронта возникшего светового импульса измеряется и характеризует инерционность затвора.

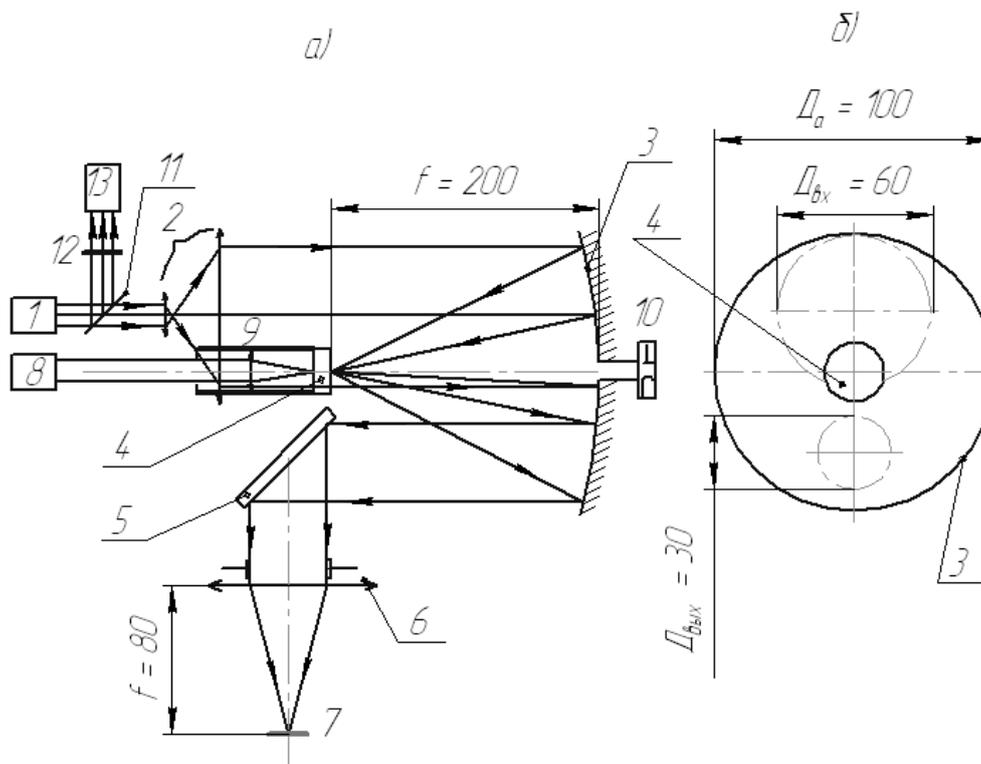


Рис. 2. Оптико-механическая схема устройства измерения параметров тонкоплёночного затвора: *a* – оптико-механическая схема; *б* – расположение входной и выходной апертур объектива в плоскости входного зрачка устройства

1 - лазерный импульсный излучатель с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 25 нс, 2 – расширитель лазерного пучка, 3 – сферическое зеркало объектива, 4 – исследуемый тонкоплёночный затвор, 5 – глухое зеркало, 6 – объектив фотоприёмника, 7 – фотоприёмник, 8 - лазерный непрерывный излучатель с длиной волны 0,56 мкм, 9 – фокусирующая линза, 10 – быстродействующий фотоприёмник, 11 – поворотное полупрозрачное зеркало, 12 – оптический фильтр, 13 – быстродействующий фотодиод

При измерении параметров защитных функций затвора одновременно с помощью двух фотоприёмников и двухканального осциллографа измеряются интенсивности падающего и прошедшего к фотоприёмнику отражённого от поверхности ограничителя излучений.

Устройство позволяет измерять времена задержки срабатывания до 0,3 нс и форму импульса падающего излучения и прошедшего к приёмнику с разрешением до 0,2 нс.

Фотография оптической головки измерительного устройства показана на рис. 3.



Рис. 3. Фотография оптической головки измерения динамических параметров оптического ограничителя

Для измерения параметров тонкоплёночного затвора при облучении излучением с длиной волны 10 мкм использовался импульсный лазерный излучатель на CO_2 с длительностью импульса 40 нс.

При измерении параметров образец затвора облучался одиночными импульсами лазерного излучения; после измерений измерялась площадь повреждённого участка зеркальной плёнки затвора и вычислялось значение интенсивности падающего при срабатывании на затвор лазерного излучения. Энерге-

тический порог нелинейного процесса в фокальной плоскости получался пересчётом полученных значений интенсивности пороговой мощности срабатывания. Так как ограничитель срабатывает за время τ , много меньшее длительности импульса падающего излучения, энергия срабатывания (энергетический порог нелинейного процесса) много меньше энергии импульса падающего излучения и равна $E = P\tau$ (в данном случае при $\tau = 0,5$ нс равна $E = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Дж).

Определялось значение пороговой мощности облучения, при которой происходило срабатывание ограничителя. При мощности падающего на плёнку ограничителя излучения $P = 170$ Вт ограничитель срабатывал – в плёнке возникло сквозное отверстие, обследованием на микроскопе измерена площадь отверстия $s = 10^{-8}$ м². Расчётом получаем величину пороговой интенсивности облучения в фокальной плоскости объектива, вызывающей срабатывание ограничителя $I_{\Pi} = 1,7 \cdot 10^6$ Вт/см². Для определения интенсивности лазерного излучения, падающего из окружающего пространства на наблюдательное устройство и вызывающего повреждение чувствительного сенсора, пересчитываем полученный результат на интенсивность излучения в плоскости входного зрачка объектива; при диаметре входного зрачка 60 мм имеем $I_{\text{вх}\Pi} = 0,18$ Вт/см².

Плотность энергии срабатывания на входной апертуре фотоприёмника определяется пересчётом значения энергетического порога нелинейного процесса на плотность энергии $E_{\text{вх}\gamma\delta}$ срабатывания на входной апертуре объектива

фотоприёмника: имеем $E_{\text{вх}\gamma\delta} = \frac{4E}{\pi D_a^2} = 8,84 \cdot 10^{-11}$ Дж/см².

Быстродействие ограничителя (время срабатывания) экспериментально определялось косвенным методом, сравнением длительностей импульсов падающего излучения и прошедшего структуру в результате срабатывания ограничителя; разница длительностей равна постоянной времени срабатывания ограничителя.

Теоретические расчёты ожидаемого времени срабатывания ограничителя дают следующие результаты. Приняты следующие параметры модели взаимодействия излучения со структурой затвора: сфокусированный пучок лазерного излучения, падающий на подложку, имеет гауссовское распределение интенсивности по сечению; импульс излучения производит переключение состояний затвора своим передним фронтом; излучение на переднем фронте импульса нарастает линейно с течением времени; теплофизические параметры структуры плёнка на подложке, таковы, что в связи с большой скоростью нарастания интенсивности в падающем излучении и малым временем процессов испарения металла в фокальном пятне можно пренебречь отводом выделившегося в плёнке тепла в подложку, считать плёнку полубесконечной средой.

Для расчётов по такой модели может быть применена формула [13]:

$$T(0,0,t) = \frac{I_m d}{K \pi^{1/2}} \left(\frac{d^2}{4\chi t_1} \right) \left\{ \left(\frac{4\chi t}{d^2} + 1 \right) \operatorname{arctg} \left[\frac{2(\chi t)^{1/2}}{d} \right] - \frac{2(\chi t)^{1/2}}{d} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\frac{2(\chi t)^{1/2}}{d}$ K и χ – коэффициенты теплопроводности и температуро-

проводности, d – гауссовский радиус фокального пятна, $\frac{I_m}{t_1}$ – скорость нара-

стания интенсивности поглощённого излучения; $I(0,t) = \frac{I_m t}{t_1}$.

$I(r,t) = I(0,t) \exp(-r^2 / d^2)$. В связи с малостью величин $\frac{2(\chi t)^{1/2}}{d}$ и $\frac{4\chi t}{d^2}$ в сравнении с единицей, указанная формула может быть упрощена:

$$T(0,0,t) = \frac{2I_m t^{3/2}}{K \pi^{1/2} t_1} \chi^{1/2} \quad (2)$$

При использовании в качестве слоя структуры плёнки висмута на кварцевой подложке ($K = 7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\chi = 6,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $T_{\text{пл}} = 271,2 \text{ }^\circ\text{C}$) получим значение времени достижения плёнкой температуры плавления:

$$t^{3/2} = T_{\text{пл}} \frac{K \pi^{1/2}}{2\chi^{1/2}} \frac{t_1}{I_m}. \quad (3)$$

При скорости нарастания интенсивности поглощённого излучения $I_m / t_1 = \frac{10^{12} \text{ Вт}/\text{м}^2}{10^{-8} \text{ с}} = 10^{20} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$ получим значение времени достижения плёнкой температуры плавления $3,8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$. Это значение близко к полученному экспериментально.

Гуссово распределение интенсивности падающего излучения в фокальном пятне на поверхности зеркальной плёнки затвора приводит к тому, что теряет зеркальность только центральная часть облучаемой области. Периферийная часть отражает излучение к защищаемому фотоприёмнику и попадает на его поверхность также на периферийной области второго действительного изображения лазерного повреждающего потока; интенсивность падающего излучения на периферии существенно меньше порога повреждения фоточувствительной поверхности приёмника. Увеличение интенсивности ослепляющего луча приводит к расширению повреждаемой на плёнке затвора области, но защита пикселей фотоприёмника в периферийных областях фокального пятна сохраняется.

Измерение допустимой частоты повторения импульсов облучения производилось включением импульсного облучающего структуры ограничителя ла-

зера на необходимую частоту и контролем изменений параметров ограничителя в сравнении с режимом облучения одиночными импульсами.

Лучевая прочность определялась облучением образцов, установленных в фокальной плоскости объектива, мощными импульсами и последующим исследованием структур ограничителей на возможность лучевых повреждений под оптическим микроскопом с увеличением 600×.

Технический ресурс вычислялся как количество импульсов облучающего излучения, приводящих к повреждению 10 % площади светового диаметра D_{ex} ограничителя по формуле:

$$N = 0,1 \frac{\pi D_{ex}^2}{4s_u} . \quad (4)$$

Здесь s_u - площадь повреждения тонкоплёночной структуры за один импульс облучения.

В табл. 1 приведены измеренные или рассчитанные по результатам экспериментов значения параметров тонкоплёночного затвора на длине волны 1,06 мкм.

Таблица 1

Параметры противоослепляющего тонкоплёночного затвора

Наименование параметра	Ед. изм.	Измеренное или определённое значение
Длина волны	мкм	1,06
Время срабатывания	нс	0,3-0,5
Энергетический порог срабатывания	нДж	15
Пропускание в линейном режиме	%	70
Частота повторения ослепляющих импульсов при нормальной работе ограничителя	Гц	До 1000
Лучевая прочность	Дж/см ²	20 - 50
Световой диаметр затвора	мм	15
Плотность энергии срабатывания затвора, пересчитанная на входную апертуру защищаемого наблюдательного устройства	Дж/см ²	$4,8 \cdot 10^{-10}$
Технический ресурс	ИО*	$5,4 \cdot 10^4$

* – импульсов ослепления.

Исследованные образцы имеют значение порога ограничения энергии ослепляющего импульса $(1,5 \dots 5) \cdot 10^{-8}$ Дж на длине волны испытаний 1,06 мкм, время запаздывания действия ограничения менее 1 нс, лучевую прочность до 50 Дж/см². Оценочные испытания затворов на длине волны 10 мкм показали их работоспособность при длительности лазерного импульса 40 нс.

Выводы:

Представленные в настоящем сообщении результаты исследования лабораторных образцов тонкоплёночных затворов подтверждают их работоспособность в диапазоне спектра (1–10) мкм, устойчивость к полям импульсного высокочастотного – тысячи герц – лазерного облучения, конкурентоспособность данного вида средств защиты чувствительных приёмников излучения от лучевого повреждения случайными лазерными импульсами в сравнении с ограничителями на основе сред с фуллеренами и наночастицами.

Авторы выражают благодарность за неоценимую помощь коллегам из Лаборатории лазерной техники и технологий НИ ТПУ (г. Томск) и лично её руководителю, профессору Владимиру Папиловичу Ципилеву.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России при выполнении ГК № 14.513.12.0001 от 28.02.2013 г. (шифр 2013-1.3-14-513-0018-047).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусова И.М., Данилов О.Б., Сидоров А.И. Нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения // Оптический журнал. – 2009. – Т: 76, № 4. – С. 71-85.
2. Каманина Н.В., Плеханов А.И. Механизмы ограничения оптического излучения фуллерено содержащих π -сопряженных органических структур на примере молекулы полиимида и СОАНР // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93, № 3.
3. Фуллерены: структурные, физикохимические и нелинейно-оптические свойства / Белоусов В.П. и др. // Оптический журнал. – 1997. – Т. 64, №12.
4. Fullerene-Based Large-Area Passive Filters / Kost A. et al. // Pros. SPIE. – 1994. – Vol. 2284. – P. 208 – 219.
5. Нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения на суспензиях углеродных и фуллероидных наночастиц / Белоусова И.М. и др. // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 3.
6. Каманина Н.В., Шека Е.Ф. Ограничители лазерного излучения и дифракционные элементы на основе системы СОАНР – фуллерен: нелинейно-оптические свойства и квантово-химическое моделирование // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т. 96, № 4.
7. О механизме оптического ограничения лазерного излучения фуллереносодержащими средами / Белоусов В.П. и др. // Оптика и спектроскопия. – 1999. – Т. 87, № 5.
8. High-efficiency multipass optical limiter / Barbosa M.M. et al. // Optics Letters. – 2003. – V. 28. No. 3.
9. Каманина Н.В. Фотофизика фуллереносодержащих сред: ограничители лазерного излучения, дифракционные элементы, диспергированные жидкокристаллические модуляторы света. // Нанотехника. – 2006. – №1. – С.86–97.
10. Cohn , et al. Electromagnetic energy diversion device wherein pellicle oblates responsive to very strong power density. U S Patent 4,719,342. January 12, 1988
11. Koechner. High intensity laser radiation protection. U S Patent 4,917,481. Apr. 17, 1990.
12. Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Шлишевский В.Б. Плёночные пассивные оптические затворы для защиты приёмников изображения от ослепления // Оптический журнал. – 2011. – Т.78, № 6. – С.39–46.
13. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. – М.: Мир, 1986 - 504 с.

© Д. В. Чесноков, В. В. Чесноков, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин, Д. В. Кочкарев,
Д. М. Никулин, М. В. Кузнецов, И. О. Михайлов, 2014

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЁВ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И ВАНАДИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК В ВАКУУМЕ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Александра Сергеевна Сырнева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Дарья Сергеевна Михайлова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

Представлены результаты исследований процессов получения на поверхности подложек слоёв наночастиц и тонкоплёночных структур типа «наночастицы в полимерной матрице», обладающих нелинейно-оптическими свойствами.

Ключевые слова: нелинейно-оптические свойства, наноструктурированные материалы, наночастицы, испарительно-конденсационный метод.

THE INVESTIGATION OF PROCESSES OF ALUMINUM AND VANADIUM NANOPARTICLE'S LAYERS CREATION ON SURFACE OF SUBSTRATE IN VACUUM

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Dmitry M. Nikulin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Alexandra S. Syrneva

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Assistant Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: aleksandra-syrneva@yandex.ru

Darya S. Mihajlova

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Assistant Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: daria-83@mail.ru

The results of investigation processes of nanoparticle's layers and thin film's structures "nanoparticles in polymer matrix" with nonlinear optical properties creation on surface of substrate are demonstrate.

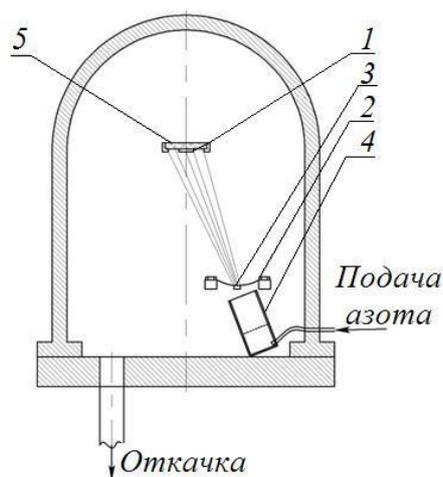
Key words: nonlinear optical properties, nanostructured material, nanoparticles, evaporation-condensation technique.

Нелинейно-оптические и нелинейно-электрические свойства слоёв наночастиц на поверхности подложек привлекают внимание исследователей. Широко исследуются технологии получения таких слоёв и их функциональные возможности, например, [1,2,3,4].

Среди известных методов получения структур на поверхности подложек, являющихся слоями наноразмерных кластеров, привлекают внимание своей контролируемостью и одностадийностью вакуумные методы, в том числе, испарительно-конденсационный метод [5] и метод введения атомного пара в уже приготовленную полимерную плёнку, находящуюся на подложке в вязкотекучем состоянии, где происходит диффузионное формирование кластеров, с последующим переводом плёнки в состояние твёрдого вещества [6].

В настоящем сообщении излагаются результаты работ, проведённых при выполнении НИР [7], по исследованию вакуумных технологий получения наночастиц на поверхности подложек.

Разработка лабораторной испарительно-конденсационной методики получения наночастиц алюминия, ванадия и их окислов проводилась с использованием экспериментальной установки испарительно-конденсационного нанесения наночастиц металлов на подложки, собранной на базе вакуумной напылительной установки ВУ-1А. На рис. 1 показана схема размещения генератора наночастиц под колпаком вакуумной установки и фотография собранного устройства, где: 1 – подложка, 2 – испаритель, 3 – «навеска», 4 – приспособления для формирования направленного потока газа, 5 – «свидетель» прибора оптического контроля толщины плёнок.



а

б

Рис. 1. Экспериментальная установка испарительно-конденсационного нанесения наночастиц металлов на подложки: а – конструктивная схема; б – фотография генератора наночастиц, установленного в реакционной камере установки

На проволочном вольфрамовом испарителе размещалась алюминиевая «навеска». В качестве подложки использовалась кварцевая пластина диаметром 20 мм, которая располагалась на расстоянии 200 мм от испарителя на «свидетеле» оптического контроля толщины. После откачки рабочего объёма вакуумной установки до давления 10^{-6} мм. рт. ст. в установку с помощью регулируемого натекавателя напускался инертный газ (аргон). Газ вводился в нижний отсек формирователя 4 газового потока через медную трубку; формирователь разделён на два отсека перегородкой-диафрагмой, в которой выполнено множество сквозных отверстий, обеспечивающих равномерное распределение газового потока по его сечению на выходе из формирователя. Во время подачи инертного газа откачка производилась форвакуумными насосами; регулируя поток инертного газа, можно было установить равновесное давление в вакуумной установке величиной порядка 0,3 мм рт. ст. Поток газа при помощи формирователя направлялся на подложку 1, одновременно «омывая» испаритель 2, как показано на рис. 1.

Во время напыления на испаритель подавался ток 150 А в течении (30–40) с. В результате эксперимента на подложке образовался слой наночастиц алюминия в виде чёрного полупрозрачного налёта.

Спектр оптического пропускания слоя наночастиц алюминия на подложке, измеренный на спектрофотометре СФ-56 в диапазоне от 190 до 1100 нм, представлен на рис. 2.

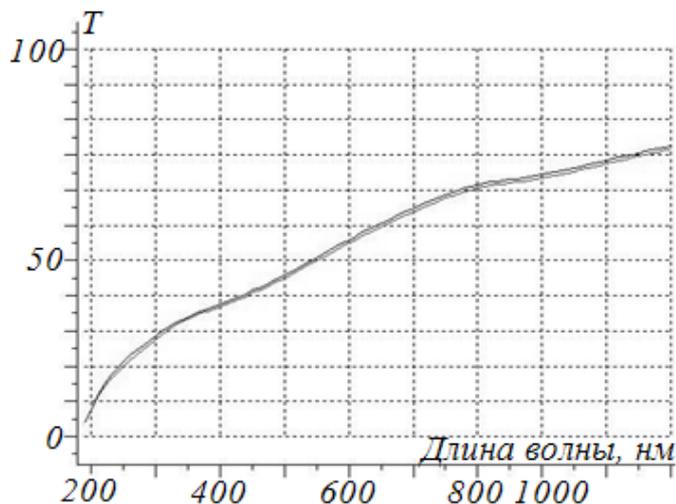


Рис. 2. Спектр оптического пропускания излучения слоем наночастиц алюминия на подложке из плавленного кварца в диапазоне от 190 до 1100 нм

Характер спектра соответствует спектру пропускания света наночастицами металла – увеличение пропускания с увеличением длины волны света.

Аналогичным алюминию методом получены наночастицы ванадия, с тем отличием, что в качестве испарителя использовалась молибденовая лента. Спектры пропускания слоёв наночастиц ванадия на подложке из плавленного кварца приведены на рис. 3.

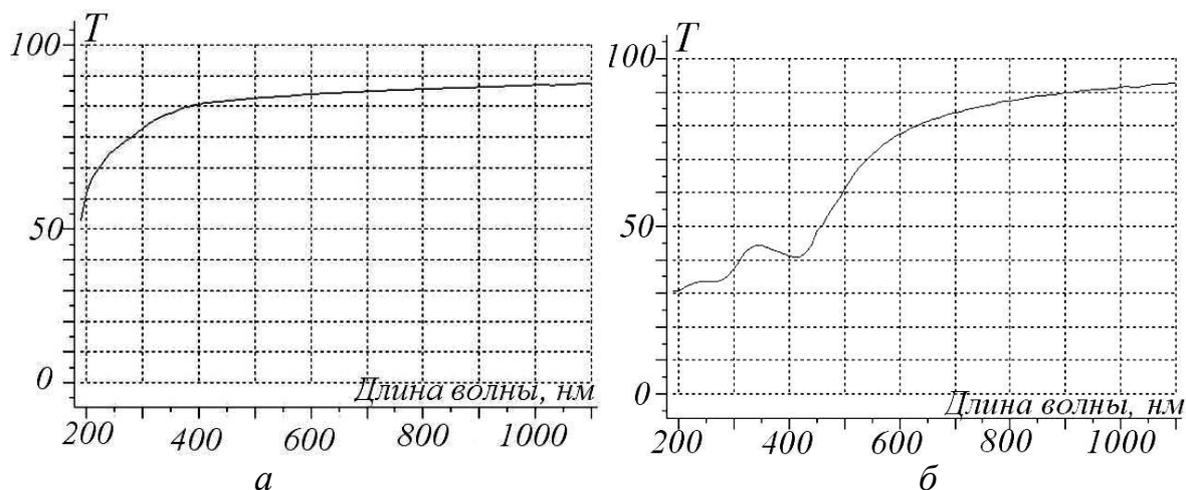


Рис. 3. Спектр оптического пропускания
в диапазоне от 190 до 1100 нм наночастиц:

a – ванадия; *б* – оксида ванадия

Исследована возможность преобразования наночастиц металлов в наночастицы окислов. Кварцевая подложка со слоем наночастиц извлекалась из вакуумной установки и отжигалась в атмосфере воздуха в пламени спиртовки. Через (3–5) минут слой наночастиц ванадия постепенно, начиная с края подложки, изменил свой цвет с серого на оранжевый. В соответствии с [8] оксид ванадия V_2O_5 имеет оранжевый цвет (все остальные оксиды ванадия имеют чёрный или серый цвет), что свидетельствует о преобразовании наночастиц ванадия в наночастицы пятиоксида ванадия. Спектры пропускания слоя наночастиц оксида, полученного окислением слоя металлических наночастиц ванадия (см. рис. 3, *a*) показаны на рис. 3, *б*. Уменьшение пропускания в коротковолновой области спектра может свидетельствовать об увеличении сечения экстинкции наночастиц при окислении, например, вследствие коагуляции. Небольшой пик поглощения вблизи длины волны 410 нм на рис. 3, *б* может свидетельствовать о некотором оптическом резонансе в частицах на этой длине волны.

Полученные на подложках слои наночастиц металлов имели к ним слабую адгезию. Для улучшения адгезии, а также для погружения наночастиц металла в полимерную матрицу, что имеет значение для создания нелинейно-оптических свойств у слоёв, проведены эксперименты по осаждению наночастиц на поверхность расплава полимерного слоя на подложке. Используемая методика отличается от описанной в [6] тем, что на поверхность осаждался не атомный пар, а кластеры металла, уже сформировавшиеся в разреженном газе в вакуумной установке.

Для получения полимерных слоёв изготавливался раствор «жидкого оргстекла» из стружки оргстекла, растворенной в бутилацетате в пропорции 200 мг стружки на 10 мл растворителя. Раствор наносился на поверхность дистиллированной воды из пипетки в количестве 2–3 капель и оставлялся в сухом и чистом боксе до полного высыхания мембраны. В результате на поверхности воды образовывалась пленка толщиной 0,8–1 мкм. Полученная плёнка переносилась на поверхность кварцевой пластины диаметром 20 мм путём поднятия пластины со дна емкости. Образец в специальном приспособлении, предназначенном для нагрева подложек, размещался в вакуумной установке ВУ-1А, как показано на рис. 1. Подложка нагревалась до 150 °С. На расплав оргстекла наносились наночастицы ванадия испарительно-конденсационным способом. На рис. 4 приведён оптический спектр пропускания полученной структуры в сравнении с спектром плёнки оргстекла (справа) без наночастиц.

Спектр на рис. 4, *а* качественно повторяет график на рис. 3, *а*, увеличение поглощения в случае наночастиц в полимерной матрице может быть вызвано увеличенным количеством наночастиц на пути светового луча.

Результаты работы заключаются в создании экспериментальной установки вакуумного нанесения слоёв наночастиц на подложки, исследовании технологий нанесения наночастиц металлов на подложки, их трансформации в наночастицы окислов, исследовании технологии получения слоёв наночастиц в полимерной матрице. Для характеристики наночастиц применена методика исследования спектров пропускания слоёв в широком спектральном диапазоне.

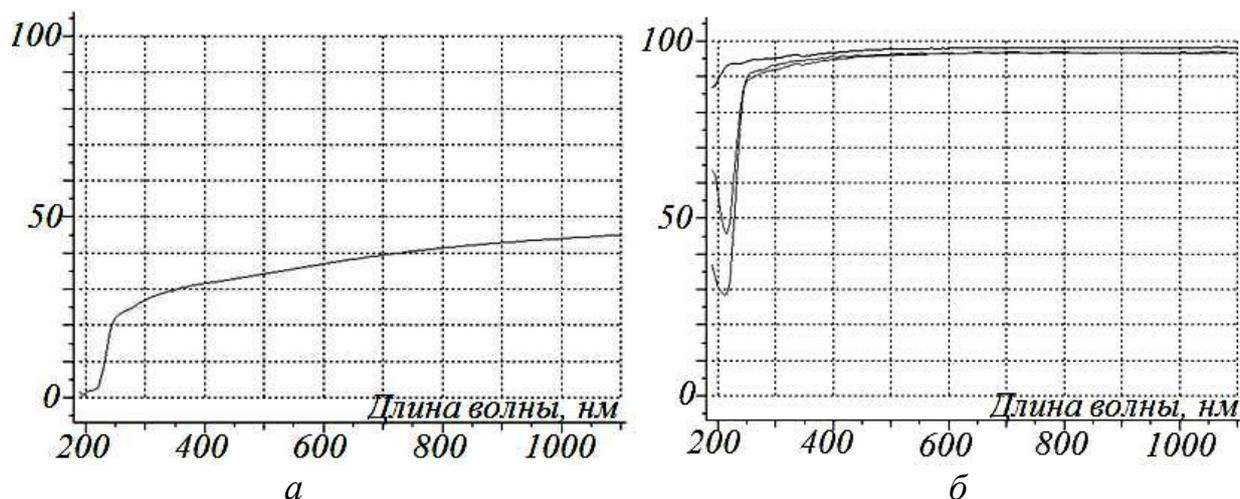


Рис. 4. Спектр пропускания света в диапазоне (190–1100) нм плёнки оргстекла: *а* – с наночастицами ванадия; *б* – без наночастиц

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России при выполнении ГК № 14.513.12.0001 от 28.02.2013 г. (шифр 2013-1.3-14-513-0018-047).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трусов Л.И., Холмянский В.А. Островковые металлические плёнки. – М.: Металлургия, 1973.
2. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. – М.: Химия, 2000.
3. Гусев Ф.И. Наноструктуры, наноматериалы, технологии. – М.: Физматлит, 2005.
4. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006.
5. Рыжонков Д.И. Наноматериалы: учебное пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
6. Формирование наночастиц серебра при осаждении металла на эпоксидную смолу, находящуюся в вязко-текучем состоянии / Степанов А.Л. и др. // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, Вып. 7. – С. 70-75.
7. Исследование путей создания материалов на основе фуллеренов и углеродных нанотрубок и технологий управления фотофизическими процессами в лазерных системах: Отчёт о НИР (промежут.) / Сиб. гос. геодез. акад.; рук. Чесноков В.В.; исполн. Чесноков Д.В., Шергин С.Л., Никулин Д.М., Райхерт В.А., Кочкарев Д.В., Михайлова Д.С., Сырнева А.С., Куз-

нецов М.В., Лаптев Е.В., Достовалов Н.Н., Сидоров А.А., Меркульев Е.А., Павлов А.А. – Новосибирск, 2013. – 219 с. – 012013.64694. – этап 1.

8. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия. 1969.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, М. В. Кузнецов,
Д. М. Никулин, А. С. Сырнева, Д. М. Михайлова, 2014

УДК 535.317; 621.283.4/5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЗИТНОЙ ФОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА В ОХЛАЖДАЕМЫХ МАТРИЧНЫХ ИК-ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Петр Порфирьевич Добровольский

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383)330-97-49, e-mail: porfir@ngs.ru

Геннадий Иванович Косолапов

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, ведущий инженер отдела моделирования оптико-электронных систем, тел. (383)330-91-11, e-mail: gen_kos@ngs.ru

Константин Павлович Шатунов

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, заведующий сектором отдела тепловидения и телевидения, тел. (383)330-97-49, e-mail: sconst@ngs.ru

Павел Алексеевич Алдохин

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 2/1, младший научный сотрудник отдела тепловидения и телевидения, тел. (383)330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований паразитного фонового инфракрасного излучения в кристатах матричных фотоприемников с помощью тепловизионных приборов.

Ключевые слова: тепловизор, криостат, фоновый сигнал.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE PARASITIC BACKGROUND COMPONENT OF THE SIGNAL IN THE COOLED INFRARED PHOTODETECTORS ARRAYS

Peters P. Dobrovolsky

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 630090, Russia, Novosibirsk, 8, Nikolaev Str., candidate of physical and mathematical sciences, leading research assistant, department of thermal imaging and television,

tel. (383)330-97-49, e-mail: porfir@ngs.ru

Gennady I. Kosolapov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 630090, Russia, Novosibirsk, 8, Nikolaev Str., leading engineer, department of modeling of optiko-electronic systems, tel. (383)330-97-49, e-mail: gen_kos@ngs.ru

Konstantin P. Shatunov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 630090, Russia, Novosibirsk, 8, Nikolaev Str., managing sector, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: sconst@ngs.ru

Pavel A. Aldokhin

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS «TDI AM») 630090, Russia, Novosibirsk, 8, Nikolaev Str., younger research assistant, department of thermal imaging and television, tel. (383) 330-97-49, e-mail: aldosha@ngs.ru

The results of the experimental researcher of the parasitic background infrared radiation in cryostats of the matrix photodetector are given in the paper. The experimental researches were performed using thermal imaging devices.

Key word: thermal image device, cryostat, background signal.

Тепловизионные приборы (ТВП) на основе охлаждаемых матричных фотоприемников (МФП) находят широкое применение в различных областях науки и техники. Одной из актуальных задач является расширение возможностей ТВП [1]. Одним из распространенных классов ТВП, работающих в инфракрасном (ИК) диапазоне, являются приборы, в которых используются охлаждаемые приемники излучения на основе эпитаксиальных слоев твердого раствора кадмий–ртуть–теллур (КРТ). Матрица расположена в криостате, в котором обеспечивается необходимый низкотемпературный режим. Она преобразует тепловой поток, состоящий из теплового изображения, сформированного объективом, и паразитного фонового потока, идущего из областей, находящихся вне объектива [2]. Паразитная компонента фоновой облученности (исходящая из областей, расположенных вне выходного зрачка оптической системы) является бесполезной и лишь ухудшает параметры приемника, так как ее воздействие эквивалентно повышению темнового тока МФП [3].

Для улучшения характеристик матричного фотоприемного устройства возникает необходимость уменьшения паразитного фонового излучения от элементов конструкции внутри криостата. С целью выяснения этой возможности был проведен ряд экспериментов, в которых регистрировалось тепловое изображение с помощью дополнительных ТВП с охлаждаемым и не охлаждаемым приемниками ИК-диапазона.

Экспериментальные работы выполнялись на трех криостатах с двумя регистрирующими ТВП. Перед входным окном исследуемого криостата устанавливался регистрирующий ТВП, с короткофокусным объективом, расстояние между которым (входным окном криостата и регистрирующего ТВП) составляло несколько сантиметров, что обеспечивало минимум ИК внешней подсветки. Полученный сигнал с исследуемого криостата записывался на цифровой видеоманитофон в процессе охлаждения исследуемого МФП от начала до выхода на рабочий режим. Полученное изображение с ТВП копировалось на персональный компьютер для дальнейшей обработки и анализа. В качестве экспериментальных образцов были использованы МФП в трех криостатах: два – в криостатах № 1 и № 2, изготовленных в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ», и в криостате № 3, изготовленном на одном из российских предприятий. Для наблюдения за исследуемыми МФП использовалось два ТВП: первый – на основе болометрической камеры фирмы «Indigo» (далее ТВП № 1), второй – на основе фотоприемника с охлаждаемой КРТ-матрицей, разработанной в ИФП СО РАН (далее ТВП № 2). Каждый регистрирующий ТВП оснащался своим входным объективом; объективы имели разные фокусные расстояния, но одинаковое относительное отверстие.

На рис. 1 показано первоначальное изображение охлажденной до рабочей температуры КРТ-матрицы фоточувствительных элементов в криостате № 1. Изображение получено с помощью ТВП № 1. Отчетливо видны области (обозначены буквой «а»), из которых наблюдается паразитное ИК-излучение, исходящее от торцевой «нагретой» части системы охлаждения криостата.

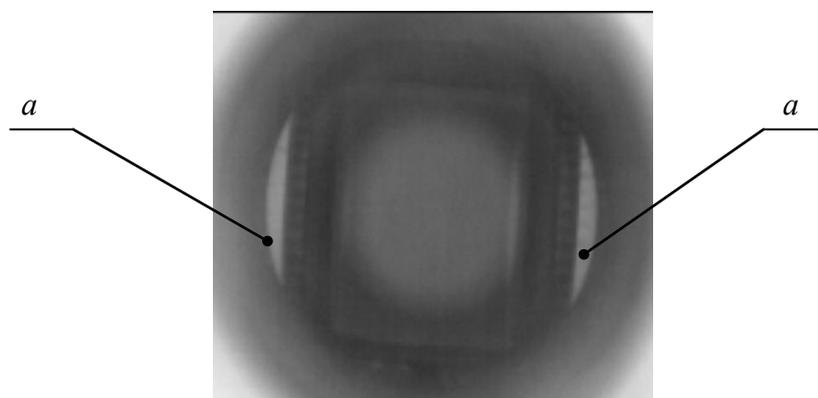


Рис. 1. Изображение КРТ матрицы:
а – области паразитного ИК-излучения

На рис. 2 показан уровень сигнала в одной из центральных строк матрицы (при рабочем режиме охлаждения). При максимально возможном значении сигнала 256 бит среднее значение в центре кадра составляет 138 бит, а в области паразитной засветки – 180 бит.

По результатам эксперимента было принято решение об оптимизации конструкции криостата, а именно: были рассчитаны и введены два дополнительных экрана, перекрывающие и отводящие паразитные потоки ИК-излучения.

Ниже на рис. 3 приведено изображение МФП в модернизированном криостате № 2. По сравнению с изображением на рис. 1 области паразитного ИК-излучения отсутствуют, а внутренний фон криостата имеет равномерный характер.

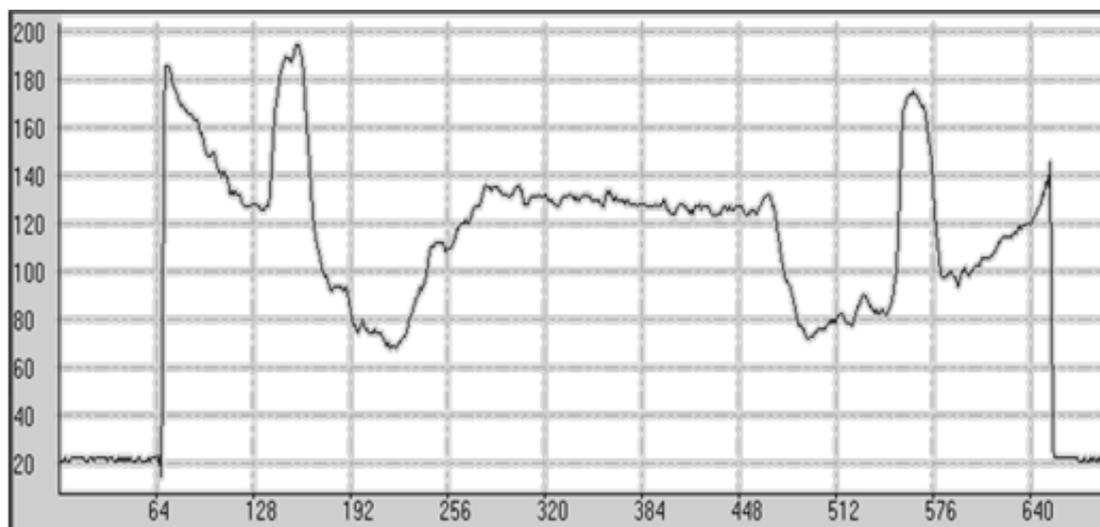


Рис. 2. Амплитуда сигнала в строке МФП с исходным криостатом (по оси ординат – амплитуда сигнала в битах 8-разрядного АЦП, по оси абсцисс – номера пикселей телевизионной строки)

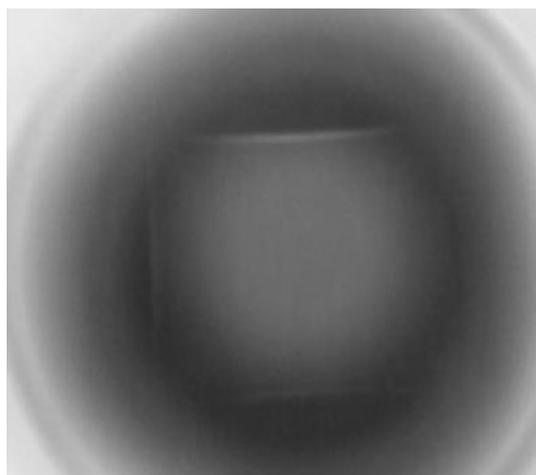


Рис. 3. Изображения матрицы в криостате № 2 Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ», полученного с помощью болометрической камеры «Indigo» (ТВП № 1)

На рис. 4 показана амплитуда сигнала в той же строке матрицы при тех же условиях охлаждения в криостате с оптимизированной конструкцией. В данном случае она не превышает 110 бит в центре кадра (снижение на 20 %), а в областях паразитной засветки наблюдается снижение среднего значения сигнала почти в 2,5 раза.

На рис. 5 показаны изображения МФП в криостате № 3, полученные с помощью ТВП № 2 в трех фазах охлаждения.

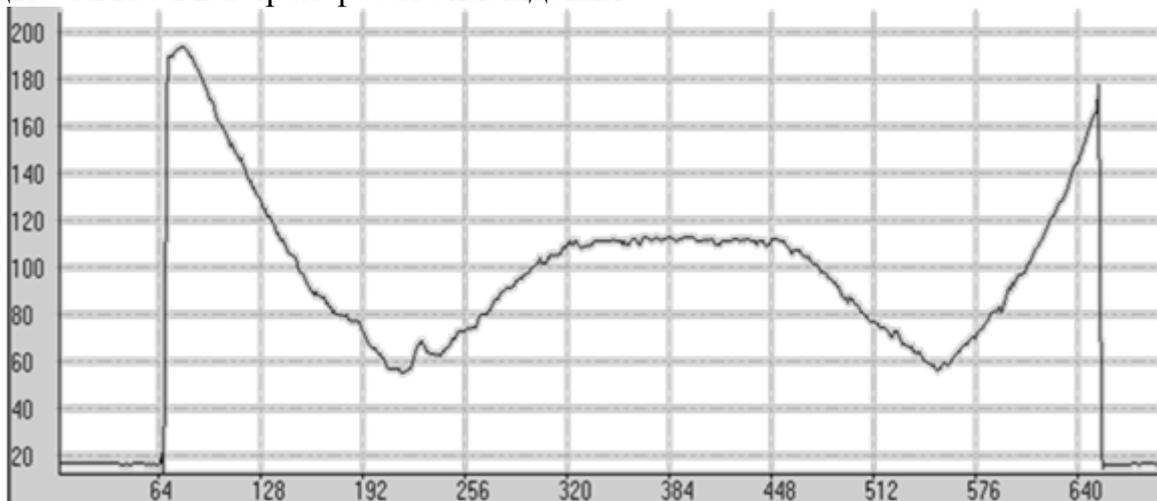


Рис. 4. Амплитуда сигнала в строке МФП с модернизированным криостатом (по оси ординат – амплитуда сигнала в битах 8-разрядного АЦП, по оси абсцисс – номера пикселей телевизионной строки)

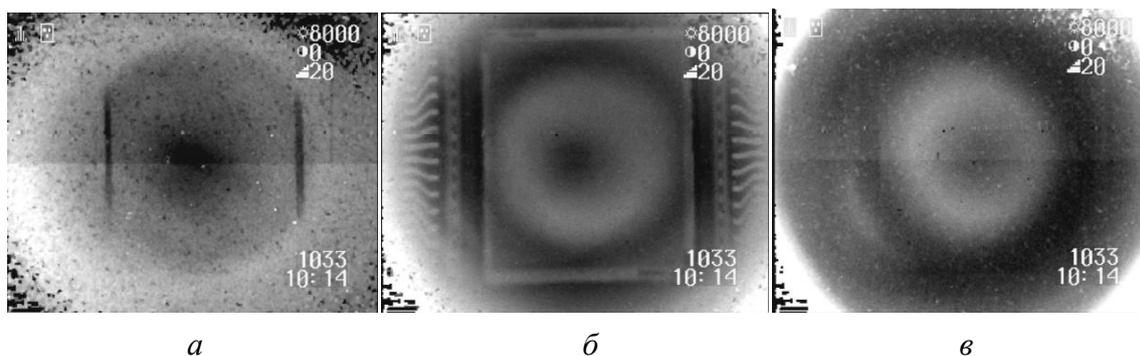


Рис. 5. Изображение матрицы в различных фазах охлаждения криостата № 3 (регистратор – ТВП № 2):

а – комнатная температура, *б* – промежуточная температура, *в* – температура жидкого азота

Интересной особенностью этого эксперимента является то, что при промежуточном охлаждении видны проводники, соединяющие матрицу с внешним

разъемом. При дальнейшем охлаждении изображение проводников пропадает, по-видимому, из-за недостаточного контраста. Однако это не означает, что отраженное (паразитное) излучение от них исчезло, и для того чтобы его уменьшить целесообразно закрыть контакты холодным поглощающим экраном.

Таким образом, предложенный тепловизионный метод контроля позволяет уверенно обнаруживать источники паразитной ИК-засветки приемников излучения в охлаждаемых криостатах, чтобы затем принимать необходимые меры по ее уменьшению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экспериментальные исследования паразитной фоновой составляющей сигнала в матричных ИК-фотоприемных устройствах / Г. И. Косолапов, П. П. Добровольский, С. М. Чурилов, К. П. Шатунов, П. А. Алдохин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т.1. – С. 85–89.

2. Патрашин А. И. Инфракрасное фотоприемное устройство с оптимальной диафрагмой // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 65–70.

3. Патрашин А. И. Теоретическое исследование фоновых облученностей ИК МФЧЭ с холодными диафрагмами заданных типов // Прикладная физика. – 2011. – № 3. – С. 98–106.

© П. П. Добровольский, Г. И. Косолапов,
К. П. Шатунов, П. А. Алдохин, 2014

УДК 621.356.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНИКА
АНОМАЛЬНОГО ФОТОНАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Нематэжон Рахимович Рахимов

Новосибирский государственный технический университет, 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 136, доктор технических наук, профессор кафедры защиты информации, e-mail: n_rah@ngs.ru

Донёрбек Дилишодович Алижанов

Новосибирский государственный технический университет, 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 136, аспирант кафедры автоматики, e-mail: doni.al@mail.ru

Вадим Аркадьевич Жмудь

Новосибирский государственный технический университет, 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 136, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики, e-mail: oao_nips@bk.ru

Олег Кузьмич Ушаков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры наносистем и опто-техники, тел. (383)361-04-71

Павел Вадимович Петров

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

В настоящее время вопросы исследования приемников оптического излучения (ПОИ) привлекают всё больше внимания специалистов в области разработки оптоэлектронных информационно-измерительных систем. В этом плане пленки, обладающие АФН (аномального фотонапряжения) – эффектами, представляют теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей – ПОИ.

Ключевые слова: АФН-элемент, оптоэлектроника, полупроводники.

**RESEARCH RECEIVER OF ANOMALOUS PHOTOVOLTAGE
FOR DEVELOPMENT OF OPTOELECTRONIC
INFORMATION-MEASURING SYSTEMS**

Nematzhon R. Rakhimov

Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630087, Russia, Novosibirsk, 136 N. Danchenko St., Professor, Department of Information Security, e-mail: n_rah@ngs.ru

Donyorbek D. Alijanov

Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630087, Russia, Novosibirsk, 136 N. Danchenko St., Post-graduate student, Department of Automation, e-mail: doni.al@mail.ru

Vadim A. Zhmud

Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630087, Russia, Novosibirsk, 136 N. Danchenko St., Professor, Department of Automation, e-mail: oao_nips@bk.ru

Oleg K. Ushakov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Assoc Prof, Department of Nanosystems and Optotechnics, tel. (383)361 04 71

Pavel V. Petrov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Assoc Prof, Department of Business Process Management, e-mail: krasko.petroff@yandex.ru

Currently, the research questions of optical radiation receivers (ROR) attract more attention specialists in the field of optoelectronic information - measuring systems. In this regard, the film having APF(anomalous photovoltage) - effects are the theoretical and practical interest in creating primary converters - ROR.

Key words: APF-element, optoelectronics, semiconductors.

Во всех применяемых в оптоэлектронике ПОИ, электрический сигнал формируется не за счет энергии света, а в результате вызываемого световым сигналом перераспределения энергии от независимого источника питания.

В отличие от обычных фотоприемников, АФН-элементы представляют собой ПОИ генераторного типа, т.е. пленки АФН-элемента непосредственно генерируют фотонапряжение, и являются электрическим генератором со световым питанием. Применение в оптоэлектронике АФН-элементов, как ПОИ автономного типа, открывают новые функциональные возможности в микроэлектронике. Например, в оптоэлектронных системах, где ПОИ служит АФН-элемент, не нужен источник электрического питания.

Для приборов на АФН-элементах необходимы индикаторы с высоким входным сопротивлением или согласующие звенья. Широкие возможности в микроминиатюризации открывают МОП – транзисторы и другие приборы с изолированным затвором.

В информационно – измерительных системах с большим числом элементов, сложные функциональные элементы такие, как АФН-элементы более перспективны. Их использование позволит снизить стоимость устройства при одновременном значительном увеличении общей надежности.

Если в оптоэлектронных микросхемах в качестве фотоприемника использовать АФН-элементы, то приборы смогут работать в области нанометрического диа-

пазона мощности. Они становятся практически энергонезависимыми, а в условиях естественной радиации, действуют без внешнего источника электрического питания.

К сожалению, очень мало изучено полупроводников, из которых можно получить АФН-элементы. Эти элементы очень чувствительны к магнитным, электрическим полям. В АФН-элементах наблюдаются фотовольтаические, фотоманнитные и магнито-оптические эффекты. Кроме того, в поляризованном свете проявляются многие свойства АФН-элементов. Основные характеристики и свойства АФН-элементов, определяющие области их технического применения, находятся на стадии изучения. В них протекают многообразные микропроцессы, для изучения которых необходимы новые методы изучения, такие, как методы компьютерного моделирования, изучение процессов на основе АФН - элементов.

Одной из областей применения АФН - пленок может стать оптическая толщина материала, где к фотоприемнику предъявляются требования высокой чувствительности. На рис.1, а приводится функциональная схема датчика толщины рулонных материалов (полимерные материалы, искусственная кожа, линолеум и др.) непосредственно на технологической линии их изготовления.

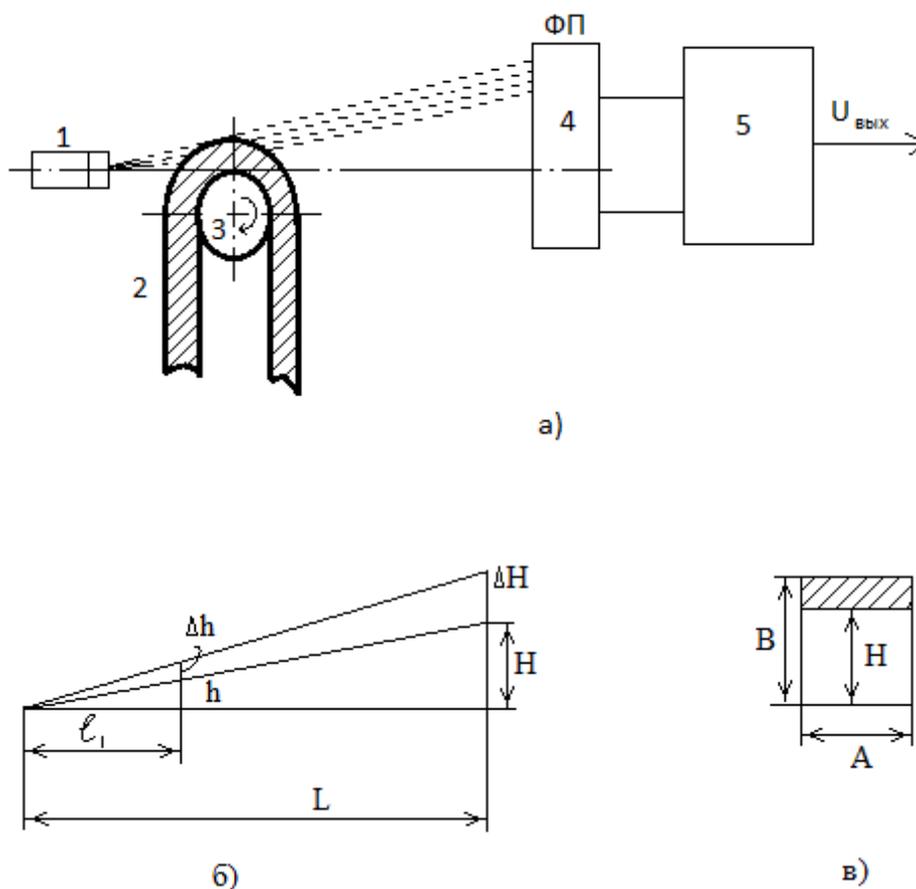


Рис. 1. Функциональная схема датчика толщины рулонных материалов (а) и поясняющие построения (б и в)

Работа датчика основана на том, что толщина рулонного материала – 2 перекрывает часть луча, распространяющегося от источника 1 излучения в направлении фотоприемника 4 и создает на нём тень на чувствительной поверхности фотоприемника 4.

Высота тени пропорциональна толщине материала. Чем выше тень, тем меньше количество светового потока, попадающего на фотоприемник.

Для непрерывного контроля в зону подается измерительный вал 3, вращающийся с постоянной скоростью, вместе с ним рулонный материал 2, а также инвертирующее устройство 5, служащее для установления прямой пропорциональности между выходным сигналом $U_{\text{вых}}$ датчика и толщиной рулонного материала.

Характеристика преобразования датчика толщины определяется следующим образом. Сначала рассчитывается зависимость между количеством попадающего на чувствительную поверхность фотоприемника светового потока $\Phi_{\text{и}}$ толщиной h рулонного материала. Это можно сделать в том случае, если известна диаграмма направленности силы излучения источника. Для светоизлучающих диодов она обычно в относительных единицах приводится в справочниках. Тогда, аппроксимируя эту диаграмму соответствующим уравнением, можно определить полный световой поток $\Phi_{\text{пол}}$, распространяемый светоизлучающим диодом в пространство [5]:

$$\Phi_{\text{пол}} = \int_{4\pi} I(\Omega) d\Omega, \quad (1)$$

где I – сила излучения;

Ω – телесный угол.

После решения интеграла (1) мы можем придать абсолютное значение диаграмме направленности, т.к. величина номинального полного светового потока светоизлучающих диодов также приводится в справочниках.

Для расчета количества потока Φ , попадающего на чувствительную поверхность фотоприемника, необходима знать ее форму и размеры. Пусть фотоприемник имеет прямоугольную поверхность с высотой B и шириной A (рис. 1, в).

Тогда количество потока $\Phi_{\text{н}}$, попадающего на часть поверхности фотоприемника, т.е. приходящегося на прямоугольник высотой B – H и шириной A (при условии отсутствия потерь в среде распространения), определяется по формуле (2):

$$\Phi_{\text{н}} = \int_{\Omega_{\text{н}}} I(\Omega) d\Omega, \quad (2)$$

где $\Omega_{\text{н}}$ – телесный угол, заключенный в четырехугольной пирамиде, грани которого образуют полупрямые, начинающиеся в центре источника и приходящие через точки пересечения сторон прямоугольника $(B-H) \times A$.

Вместе с тем, телесный угол определяется как отношение площади G сферической поверхности к квадрату ее радиуса по формуле (3):

$$\Omega_H = \frac{G}{R^2}, \quad (3)$$

где G – поверхность сферы, вырезанной выше описанной четырехугольной пирамидой.

Тогда, используя зависимости (3) и (2), можно получить поверхностный интеграл (4):

$$\Phi_H = \frac{1}{R_2} \iint_G I(x,y,z) dG, \quad (4)$$

где $I(x,y,z)$ – описание зависимости $I(\Omega)$ в прямоугольной системе координат x,y,z .

Решая по формуле (5) поверхностный интеграл для конкретного значения H , получим одну точку зависимости:

$$\Phi_H = f(B-H) \quad (5)$$

Присваивая H различные значения, рассчитаем всю зависимость, в целом. Для дальнейших расчетов необходимо знать энергетическую характеристику фотоприемника. Люкс – вольтовая характеристика АФН – пленок является существенно нелинейной с насыщением при высоких значениях освещенности.

Для работы датчика выбирается линейный участок этой характеристики и поэтому можем записать:

$$U_{фп} = k\Phi_H, \quad (6)$$

где $U_{фп}$ – фотонапряжение на АФН – пленке, генерируемое падающим на нее световым потоком Φ_H ;

k – крутизна характеристики.

Подставляя (5) в (6), получаем уравнение для инвертирующего устройства в виде (7):

$$U_{вых} = U_o - U_{фп}, \quad (7)$$

где U_o – постоянное напряжение.

Окончательное выражение для характеристики преобразования датчика определяется по формуле (8):

$$U_{вых} = U_o - kf(B-H) \quad (8)$$

Оценим чувствительность датчика. Пусть толщина h рулонного материала увеличилась на $+\Delta h$, тогда выходной сигнал увеличится также на $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и чувствительность S датчика определится по формуле (9):

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta h} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}h + \Delta h - U_{\text{ВЫХ}}h}{\Delta h} = \frac{kf(B-H) - (B-H-\Delta H)}{\Delta h} \quad (9)$$

Из чертежа (рис.1, б) имеем (10):

$$\Delta H = \frac{L}{l_1} \Delta h, \quad (10)$$

где L – расстояние от источника до фотоприемника;

l_1 – расстояние от источника до оси измерительного вала.

Теперь заменяя зависимость $f(B-H) \approx a(B-h)$, путем линеаризации ее в точке $(B-H)$, а также считая ΔH малой величиной и используя выражение (10), уравнение (9) можем записать в виде (11):

$$S = \frac{ka(B-A) - ka(B-H-\Delta H)}{\Delta h} = \frac{ka\Delta H}{\Delta h} = ka \frac{L}{l_1} \quad (11)$$

Отсюда видно, что чувствительность датчика прямо пропорционально связана с крутизной K энергетической характеристики фотоприемника. Поэтому применение высокочувствительных АФН – пленок в качестве фотоприемника в данном датчике и определяет во многом его работоспособность. Чувствительность датчика можно повысить также за счет роста отношения L/l_1 ; правда, это можно делать до определенного предела. С ростом расстояния L резко падает интенсивность светового потока, доходящего до фотоприемника, и она может оказаться за порогом чувствительности последнего.

Расчет параметров рассматриваемого датчика производится в следующей последовательности. При заданных значениях номинальной толщины h – ном рулонного материала, ее отклонений и известном диаметре D измерительного вала (в качества его можно использовать любой из подающих валов, имеющих в технологической линии и подходящих для этой цели) рассчитывается расстояние l_1 . Затем, исходя из паспортных данных светоизлучающего диода и линейного участка энергетической характеристики АФН – пленки, определяем максимальное расстояние L , при котором в отсутствии рулонного участка материала световой поток, подающей на АФН – пленку размером $B \times A$ имеет значение находящегося на границе линейного участка. Отношение L/l_1 с использованием выражения (10) позволяет рассчитать $H_{\text{НОМ}}$ и $\Delta H_{\text{МАХ}}$. Расчет характеристики преобразования датчика приведен выше. При недостаточной мощности одного светоизлучающего диода можно использовать несколько из них или удлинить ширину используемой АФН – пленки.

С этой целью составлены предписания алгоритмического типа для компьютерного моделирования процессов происходящих в АФН – элементах.

Проведены экспериментальные и теоретические исследования существующих материалов и работ по АФН – элементам из элементарных и сложных материалов, из которых можно получить высоковольтные аномально большие фотонапряжения [2].

В результате исследований составлены эквивалентные схемы АФН – элементов. На основе предложенной модели анализируются основные свойства и характеристики АФН – элементов.



Рис. 2. Систематизированная схема возможности применения АПОИ в области разработки оптоэлектронных информационно-измерительных системах

Расширение сфер и объёма применения АФН - приёмников для автоматизации производственных процессов связано с развитием технологии получения АФН-плёнок, совершенствованием их применения в качестве ПОИ, а также развитием метрологии и светотехники.

Очень интересным и перспективным является применение АФН-приёмников в области разработки оптоэлектронных информационно – измерительных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Найманбоев Р., Хатамов С. – В сб.: Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – Ташкент, 2004. – С. 165.
2. Рахимов Н. Р., Серьёзов А. Н. АФН-плёнки и их применение. – Новосибирск, 2005. – 65 с.
3. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: учеб. пособие. – М.: Трендз, 2006. – 272 с.
4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
5. Шамирзаев С.Х. Разработка оптоэлектронных датчиков для контроля физико-химических параметров веществ и материалов на основе АФН-приемника // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 56–59.
6. Рахимов Н. Р., Отажонов С. М., Алижанов Д. Д. Автономный приемник оптического излучения на основе АФН структур. – ФерГУ, Фергана, Узбекистан, 2011.

© Н. Р. Рахимов, Д. Д. Алижанов, В. А. Жмудь,
О. К. Ушаков, П. В. Петров, 2014

УДК 532.3., 530.182., 539.216.2.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИК МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДЛОЖЕК СЛОЯМИ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Евгений Владимирович Лаптев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, инженер кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: genius-1188@yandex.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

В статье представлены результаты лабораторных исследований технологических аспектов получения на подложках слоёв наночастиц и тонкоплёночных структур типа «наночастицы в полимерной матрице», обладающих нелинейно-оптическими свойствами. Получены образцы в виде суспензии из наночастиц никеля и серебра в полиимиде.

Ключевые слова: нанопорошок, наночастицы, полимерная матрица, суспензия.

LABORATORY TECHNIQUES MODIFEING SUBSTRATE SURFACE LAYERS METAL NANOPARTICLES

Dmitry M. Nikulin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph.D., Senior Lecturer of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Evgeniy V. Laptev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., post-graduate student, engineer Department of Nanosystems and optical technic, tel. (383)361-08-36, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer Department of Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

The article presents the results of laboratory studies on the technological aspects for the substrates of layers of nanoparticles and thin film structures such as "nanoparticles in a polymer matrix", having nonlinear optical properties. Samples in the form of suspension from nanoparticles nickel and silver in polyimide are received.

Key words: nanopowder, nanoparticles, polymeric matrix, suspension.

Разработки методов получения структур с наночастицами различных материалов на изолирующих подложках и тонкоплёночных структур типа «наночастицы в полимерной матрице» на подложках ведутся многими научными центрами, результаты исследований опубликованы в монографиях и учебных пособиях, например, [1,2,3,4]. Прикладная цель многих исследований – создание структур и оптических устройств на основе использования нелинейно-электрических и нелинейно-оптических свойств наночастиц на поверхности и в полимере.

В настоящей статье рассматриваются методы модифицирования поверхностей заранее приготовленными порошками наночастиц путём седиментационного осаждения из суспензий и путём нанесения слоёв наночастиц в полимерной матрице в виде плёнки на поверхности.

1. Осаждение частиц двуокиси кремния на поверхность плоской подложки из суспензии методом седиментации

Лабораторное устройство для нанесения частиц методом седиментации показано на рис. 1.

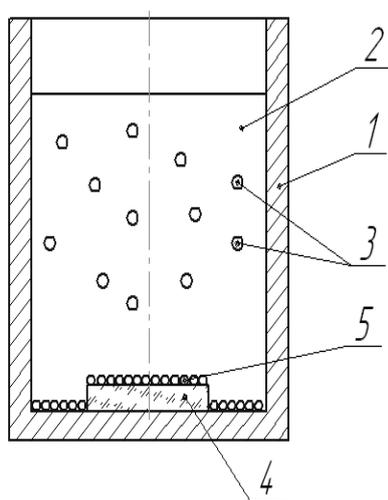


Рис. 1. Лабораторное устройство для нанесения частиц методом седиментации:

1 – химический высокий стакан, 2 – суспензия частиц в жидкости, 3 – наночастицы двуокиси кремния, 4 – экспериментальный образец подложки, 5 – осевший на подложку и дно стакана слой наночастиц

В качестве исходного материала использовались наночастицы двуокиси кремния в спиртовом растворе с размерами частиц 255-315 нм.

Фотографии результатов осаждения наночастиц с различными объемными концентрациями суспензий представлены на рис. 2.

Суспензия частиц готовилась смешиванием необходимого объема наночастиц в спирте с дистиллированной водой. Объемная концентрация частиц в суспензии рассчитывалась исходя из получения на подложке после полного оседания частиц одного слоя частиц или заданного числа слоёв. После смешивания составных частей суспензии проводилась её обработка ультразвуком для обеспечения равномерного распределения наночастиц по объему.

Как видно из фотографий, распределение частиц на поверхности подложки при осаждении седиментацией очень неравномерное.

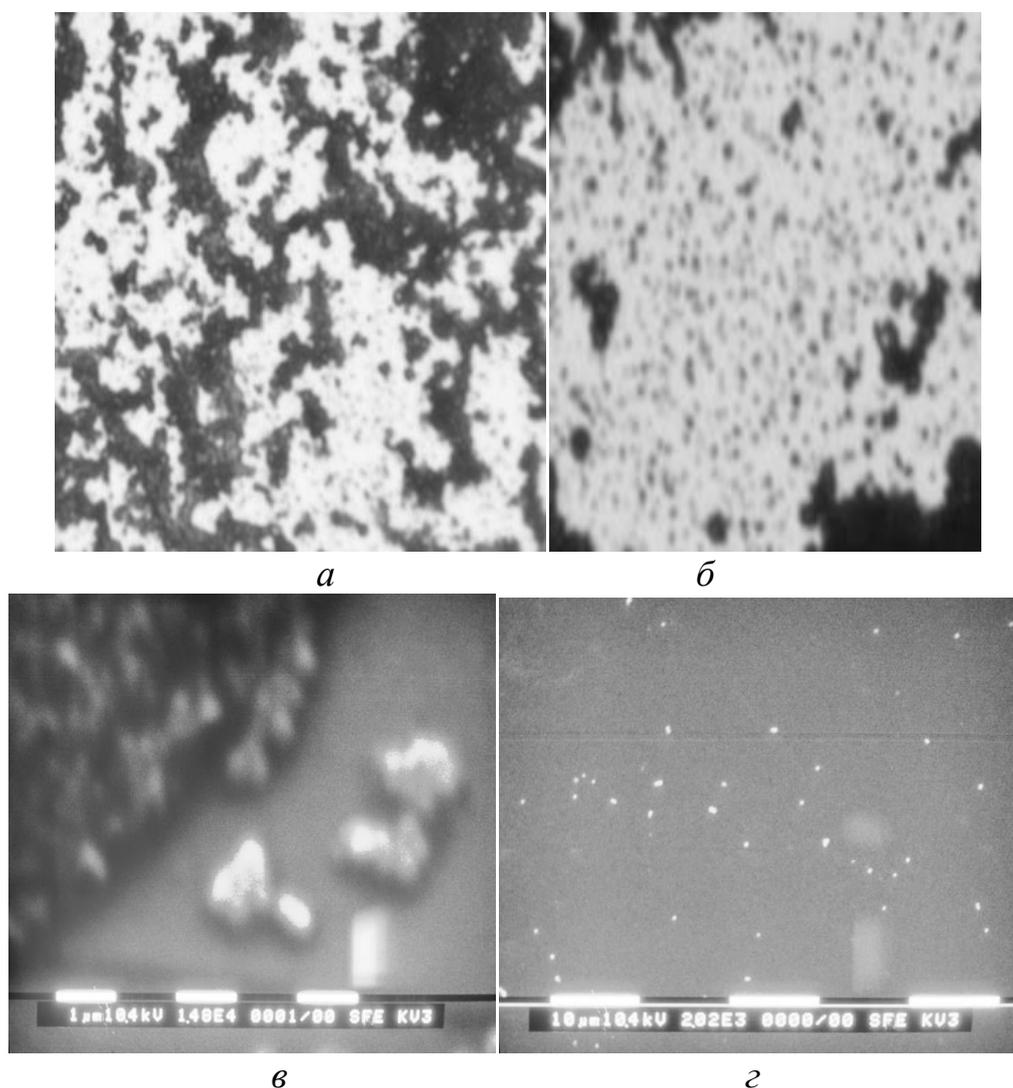


Рис. 2. Фотографии слоя из наночастиц на поверхностях подложки, полученного седиментацией:

а и *б* – средний размер отдельных кластеров из наночастиц двуокиси кремния (2-5) мкм; *в* – СЭМ снимок, цена деления шкалы 1 мкм;

z – СЭМ снимок, цена деления шкалы 10 мкм, средний размер наночастиц 300 нм. Плотность распределения наночастиц $20 \cdot 10^9$ частиц/м²

2. Осаждение полимерных плёнок с наночастицами карбида кремния

При осаждении частиц методом седиментации выявилась проблема возможности получения однослойного плотноупакованного покрытия. Частицы в слое располагаются неравномерно: имеются области практически без частиц и области с частицами, образующими холмики.

Исследовалась методика получения плотноупакованного однослойного покрытия с использованием метода флотации [5,6], при котором готовят плёнку твердеющего на поверхности жидкости лака, толщина слоя может быть до долей мкм. Для приготовления нитроцеллюлозы с включениями из наночастиц использовался нанопорошок карбида кремния с размерами наночастиц 50–60 нм, полученный в ООО Научно-производственная фирма «Нанопорошковые технологии», г. Новосибирск.

На рис. 3 показано устройство для получения слоя нитроцеллюлозы с включёнными в её состав наночастицами карбида кремния на поверхности подложки и микрофотография участка полимерной плёнки с наночастицами.

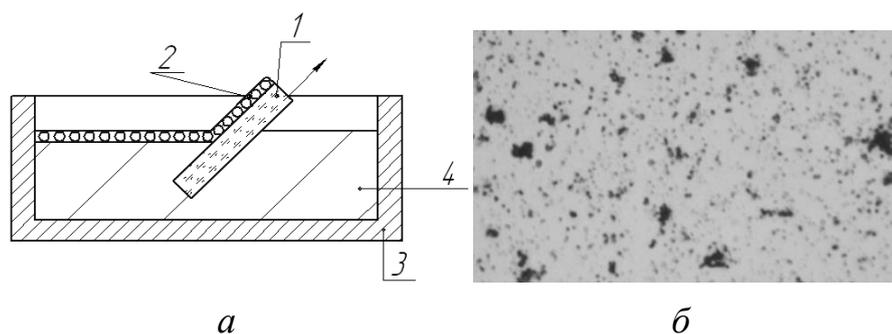


Рис. 3. Получение слоёв наночастиц карбида кремния в полимерной матрице нитроцеллюлозы методом флотации:

a – лабораторное устройство (*1* – экспериментальный образец подложки, *2* – нанесённый слой нитроцеллюлозы с включениями наночастиц, *3* – стеклянная кювета, *4* – дистиллированная вода); *б* – фотография слоя, увеличение 1200×

При получении суспензии в качестве рабочей жидкости использовался уксусная кислота, как растворитель нитроцеллюлозы (коллоксилина). В качестве стабилизатора суспензии опробовалась добавка олеиновой кислоты. Полученные плёнки имели более высокую концентрацию наночастиц, но отмечается наличие кластеров из частиц.

3. Получение стабилизированных суспензий наночастиц никеля и серебра в полиимиде

Суспензия приготавливалась добавлением в полиимид порошка наночастиц никеля без применения ПАВ и дисперсантов, контроль производился по поглощению проходящего оптического излучения с применением фотометра ПЭ 5400ВИ. Так как наночастицы никеля в порошке агломерированы, то для разделения наночастиц проводилась обработка суспензии ультразвуком с помощью ультразвуковой ванны «ГРАД 28-35» [7]. Перед измерениями суспензию разбавляли диметилформамидом в 20 раз по массе, обрабатывали ультразвуком и измеряли максимальное значение поглощения света на длине волны 450 нм при толщине слоя суспензии 10 мм; в течение 72 часов существенного осаждения наночастиц никеля не происходило. Гранулометрический состав суспензий определялся с помощью анализатора размеров частиц Photocor Compact [8].

Исследовано получение суспензий с наночастицами серебра двух типов по близкой к описанной выше методике.

На рис. 4 показаны гранулометрические профили суспензии наночастиц никеля и серебра в полиимиде. Наночастицы никеля имеют радиусы от 35 нм до 40 нм с максимумом распределения в области 37 нм; для наночастиц серебра в полиимиде в одном типе порошка радиусы частиц 10 – 15 нм, во втором – 22 – 30 нм.

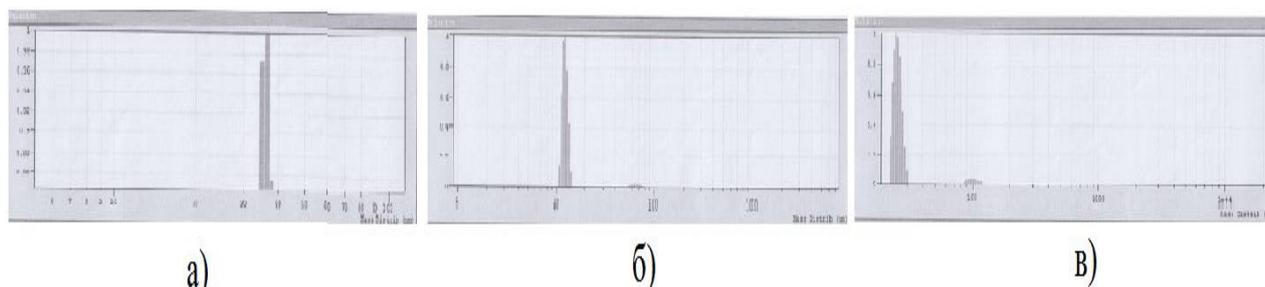


Рис. 4. Гранулометрический профиль суспензии наночастиц никеля (а) и серебра (б, в) в полиимиде (по оси x указаны значения радиусов наночастиц в нм; по оси y – концентрация наночастиц в относительных единицах от 0 до 1)

При визуальном анализе полученных суспензий отмечено, что даже малые остаточные концентрации частиц больших размеров (по данным анализатора) вносят очень большой вклад в степень мутности суспензий, вероятно, в связи с большими значениями сечения экстинкции больших частиц.

Результатом исследования явилась разработка лабораторных методик получения суспензий наночастиц никеля, карбида кремния и серебра в растворах полимеров и методики модифицирования поверхности подложек наночастицами как непосредственно на поверхности диэлектрических подложек, так и в виде слоёв наночастиц в полимерной матрице. Распределение наночастиц в слоях характеризуется беспорядочным неравномерным их расположением.

В заключение выражаем благодарность сотрудникам ЗАО «Новосибирские наноматериалы», г. Бердск, за предоставление материалов и участие в исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трусов Л.И., Холмянский В.А. Островковые металлические плёнки. – М.: Металлургия, 1973.
2. Гусев Ф.И. Наноструктуры, наноматериалы, технологии. – М.: Физматлит, 2005.
3. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006.
4. Каманина Н.В., Плеханов А.И. Механизмы ограничения оптического излучения фуллерено содержащих Пи-сопряженных органических структур на примере молекулы полиимида и СОАНР. // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т.93, вып. 3. – С. 444–453.
5. Эспе В. Технология электровакуумных материалов: вспомогательные материалы. В 3 т. Т. 3. – М.: Энергия, 1969.
6. Гугель Б. М. Люминофоры для электровакуумной промышленности. – М.: Энергия, 1967.
7. Характеристики ультразвуковой ванны «ГРАД 28-35» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.protehnology.ru/ultrazvukovaya_vanna_grad_28-35
8. Описание анализатора размеров частиц «Photocor Compact» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.photocor.ru/particle-size-analyzer/>

© Д. М. Никулин, Е. В. Лантев, Д. В. Кочкарёв, 2014

УДК 681.785.4

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Дмитрий Михайлович Никулин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

Разработана простая методика визуализации процессов получения и преобразования наноструктур с характерными размерами порядка (5–50) нм на подложках. Наблюдается рассеяние света на нанобъектах вблизи наружной поверхности полного внутреннего отражения (вариант тёмнопольного освещения), в том числе в момент лазерного воздействия. Предусмотрено одномерное наноразмерное сканирование зоны облучения.

Ключевые слова: визуализация, наноструктуры, рассеяние света, полное внутреннее отражение, лазерная обработка.

THE VISUALIZATION OF PROCESS OF SURFACE NANOSTRUCTURES CREATION

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of department of physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associated prof. of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Dmitry M. Nikulin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: dimflint@mail.ru

A simple method of visualization of processes forming and reforming nanostructures on substrates with characteristic dimensions (5–50) nm are developed. The light scattering on nanoobjects near external surface of total internal reflection (variant of dark-field illumination technique) are register, including moment of laser treatment. The one-dimensional nano scale scanning of irradiation area are provide.

Key words: visualization, nanostructures, light scattering, total internal reflection, laser treatment.

Для исследования нанообъектов в настоящее время широко привлекаются методы электронной, атомно-силовой микроскопии, методы спектроскопии, и др. [1]; почти всегда исследования объектов проводятся после их получения и помещения в исследовательский прибор, то есть, не в ходе технологического процесса. Использование эффектов полного внутреннего отражения света от границы раздела сред с разными показателями преломления для характеристики нанообъектов привлекает возможностью измерять параметры наноструктур

в ходе их образования, а также тем, что ширина зоны воздействия зондирующего излучения на объекты может быть в диапазоне единиц нм.

Одним из первых обратил внимание на возможность возбуждения флуоресценции в тонком слое среды, примыкающей к границе раздела, Л.И. Мандельштам. Использование затухающих волн падающего излучения для получения данных о спектре поглощения излучения за границей раздела сред рассматривается в работе [2]. В работах [3, 4] показано, что при флуоресцентной микроскопии с использованием полного внутреннего отражения достижима глубина резкости порядка 10 нм.

Ниже представлено описание простой лабораторной методики оптического исследования нанообъектов с размерами (5–50) нм в ходе их получения или преобразования лазерным воздействием, основанной на использовании эффектов рассеяния света наночастицами, находящимися в области затухающих волн падающего излучения вблизи поверхности полного внутреннего отражения. В соответствии с расчётом, при длине волны подсветки 450 нм и использовании подложки с показателем преломления $n = 2,6$ интенсивность излучения в зоне затухающих волн экспоненциально ослабевает в e раз при удалении от поверхности отражения на (16–43) нм и изменении угла падения от 70° до 30° . На самой поверхности интенсивность может превышать интенсивность падающего излучения в несколько раз, что позволяет изучать нанообъекты по их рассеивающей способности. На рис. 1, *а* схематически показана лазерная технологическая установка со столиком визуализации процесса лазерного формирования на поверхности подложки наноструктур.

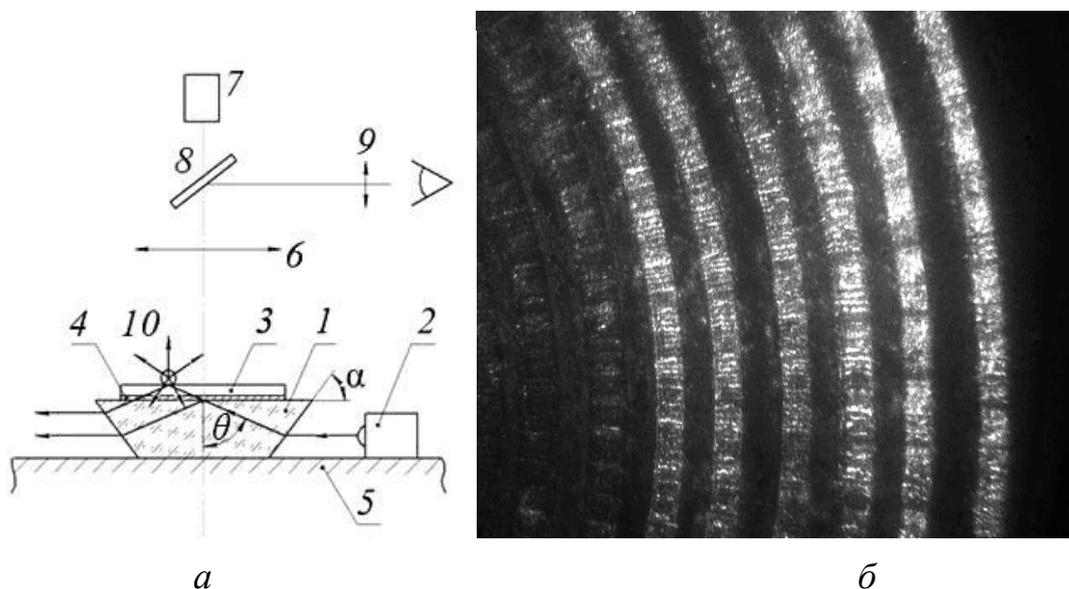


Рис. 1. Визуализация процесса получения наноструктур на поверхности:
а – схема лазерной технологической установки со встроенным столиком визуализации нанообъектов; *б* – фотография участка массива дорожек, образо-

ванных лазерной обработкой поверхности лейкосапфировой подложки, подсвечиваемой снизу под углом, большим угла полного внутреннего отражения

Столик 5 устанавливается под объективом 6 лазерной установки, фокусирующим излучение лазера 7 на подложку 3, содержит оптическую призму Дове 1, верхняя грань которой снизу подсвечивается светодиодом 2; обрабатываемая прозрачная подложка 3 устанавливается с прослойкой 4 иммерсионной жидкости на призму сверху; световой пучок светодиода направлялся под углом θ , большим угла полного внутреннего отражения.

Угол θ регулировался в пределах $(30-70)^\circ$; при облучении лейкосапфировой подложки одиночными лазерными импульсами длительностью 6 нс с длиной волны излучения 0,355 нм и интенсивностью, необходимой для сублимации вещества, на её поверхности формировались ямки с глубиной, увеличивающейся от импульса к импульсу. Образующийся на дне ямок нанорельеф высотой порядка единиц нм приводил к рассеянию затухающих волн падающего излучения светодиода (иллюстрируется стрелками на частице 10) и наблюдался с помощью встроенного микроскопного узла, состоящего из объектива 6, полупрозрачного зеркала 8 и окуляра 9. Микроснимок приведён на рис. 1, б. Дно ямок при сублимационной обработке получается наноструктурированным, что выявляется при наблюдении в микроскоп как светящаяся область на тёмном фоне не облучаемой поверхности подложки. По мере увеличения числа лазерных импульсов облучаемые области постепенно становились видимыми, их яркость возрастала, что наглядно характеризовало эффективность лазерной обработки.

Разработанная методика использована при создании технологий увеличения внешнего квантового выхода светодиодов за счёт нанесения на излучающую гладкую поверхность светодиодного кристалла слоя наночастиц карбида кремния, имеющих средний размер $(50-80)$ нм. На рис. 2 приведена микрофотография подложки с наночастицами на поверхности, демонстрирующая увеличение эффективности вывода излучения из подложки с большим показателем преломления в области с наночастицами.

Обнаружено, что нанесённые на излучающую поверхность светодиода при помощи скотча наночастицы увеличивают внешнюю квантовую эффективность на $(50-200)$ %.



Рис. 2. Область поверхности подложки с наночастицами карбида кремния, имеющими размеры 50 – 80 нм. Свечение возникает при рассеянии излучения подсветки, падающего изнутри подложки на поверхность под углом больше полного отражения, на наночастицах поверхности
Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ГК № 14.513.11.0101.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суздалев И.П. Физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006.
2. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. – М.: Мир, 1970.
3. Saffarian S., Kirchhausen T. Differential evanescence nanometry: live-cell fluorescence measurements with 10-nm axial resolution on the plasma membrane // *Biophys J.* – 2008. – V. 94. – P. 2333–2342.
4. Highly confined surface imaging by solid immersion total internal reflection fluorescence microscopy / Lin Wang et al. // *Optics Express.* – 2012. – V. 20, No. 3. – P. 3311-3324.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев, М. В. Кузнецов,
С. Л. Шергин, Д. М. Никулин, 2014

УДК 535.211:535.214

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ РЕЛЬЕФОВ
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТУГОПЛАВКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, техник кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ведущий инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов сублимационного лазерного формирования неупорядоченных рельефных структур с аспектным отношением (0,5–1) на поверхностях тугоплавких диэлектриков (например, лейкосапфир). Показана возможность создания технологии одностадийного «сухого» (без использования травителей) формирования микролинзовых поверхностных структур на лейкосапфире.

Ключевые слова: лазерная сублимация, рельеф на поверхности, полное внутреннее отражение, светодиод, тугоплавкие диэлектрики, лейкосапфир.

THE EXPERIMENTAL STUDIES LASER PROCESS OF SCATTERING RELIEFS FORMING ON THE SURFACES OF THE HIGH-MELTING DIELECTRICS

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of department of physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., technician of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: say1945@mail.ru

Valery A. Raykhert

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., leading engineer of Department Physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Associated prof. of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

The results of experimental studies sublimation laser process of unregulated relief structures with high aspect ratio (0,5–1) forming on the surfaces of the high-melting dielectrics (for example, leucosapphire) are present. The possibility of creation of one-stage “dry” (without etchants) technology of microlens surface structures forming on leucosapphire are shown.

Key words: laser sublimation, relief on surface, total internal reflection, LED, high-melting dielectrics, leucosapphire.

Проблемой при создании светодиодов является увеличение эффективности вывода излучения из кристалла светодиода в связи с большим значением показателя преломления используемых материалов [30]; используют преимущественно монокристаллические карбид кремния и лейкосапфир. Для увеличения внешнего квантового выхода светодиодов используются технологии создания рассеивающего рельефа в виде микролинзовых структур на излучающей или выходной поверхности светодиода и нанесения просветляюще-рассеивающих покрытий, подбирают форму светоизлучающего кристалла с отражающими гранями (фирма Cree Inc., [24,25]). Достигнутый в промышленных образцах светодиодов уровень эффективности не превышает 50 %. Подробный обзор светодиодной продукции компании CREE представлен в статье [9].

В работе [2] с целью увеличения эффективности вывода света на поверхности *n*-GaN был создан рассеивающий рельеф методом реактивного ионного травления в газовой смеси Cl₂:Ar, внешняя квантовая эффективность выросла на (25–30) %. При ионной обработке на указанной поверхности возникал неупорядоченный рельеф в виде столбиков и вертикальных пирамидок с характерными размерами в сотни нанометров.

В работе [3] развит метод создания рассеивающего свет микрорельефа на внешней стороне подложек SiC для уменьшения потерь при выводе света из светодиодного кристалла, связанных с эффектом полного внутреннего отражения в структурах AlGaIn/GaN. Предложено использовать тонкие слои фоторезиста в качестве случайных масок для процесса реактивного ионного травления подложки из карбида кремния. Оптимизацией режимов травления на поверхности подложки SiC получен микрорельеф с требуемыми параметрами, что привело к увеличению внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов более чем на 25 %.

Разработка отечественного мощного светодиодного кристалла представлена в работе [10]. Разработан светодиодный кристалл большой мощности с размером 1 мм², излучающий на длине волны 460 нм. Применение двухуровневой разводки *n*-контакта позволило получить рекордно низкое значение последовательного сопротивления.

В работе [11] рассматриваются вопросы повышения светоотдачи светодиодов за счёт увеличения эффективности выхода излучения из объёма кристалла. Широко применяются технологии случайного текстурирования (верхнего слоя *p*-GaN) и технологии профилированной сапфировой подложки. В последнем случае выращивание эпитаксиальных слоёв GaN производится не на гладкой, а на подвергнутой микрообработке подложке, что даёт два преимущества. Во-первых, благодаря более низкой плотности винтообразных изменений в пространственной решётке (threading dislocation) эпитаксиальных слоёв, выращенных по технологии ОСП, повышается внутренняя квантовая эффективность. Во-вторых, формы границы «эпитаксия – сапфир» работают в качестве центров рассеивания или преломления, что снижает общее внутреннее отражение, а следовательно, повышается эффективность светоотдачи.

Для повышения эффективности светодиодов прибегают к нанопрофилированию сапфира. Предпринимаются усилия по разработке технологии фотонных кристаллов – использовании периодических или квазипериодических структур с размерами, сравнимыми с длиной волны света, в качестве дифракционных решёток.

В работе [12] предложен усовершенствованный процесс, основанный на использовании наборов самоорганизующихся на поверхности фоточувствительного слоя полимерных наносфер, играющих роль наноразмерных сферических линз.

Таким образом, актуальными являются разработка и исследования технологий создания рельефов на поверхностях полного внутреннего отражения. Нами проведена разработка лабораторной технологии лазерного формирования рельефов на поверхностях кремния, карбида кремния, лейкосапфира. В настоящем сообщении приводится описание методик одностадийного (без использования фотолитографии и химических технологий) создания микролинзовых и различного характера неупорядоченных рельефов на поверхностях тугоплавких монокристаллов из лейкосапфира с использованием разработанной лазерной сублимационной технологии, представлены результаты экспериментов по созданию рельефов.

Лейкосапфир – искусственно выращенный монокристалл Al_2O_3 , теплопроводность которого равна (23,1–25,2) Вт/(м·°С), теплоёмкость равна 925 Дж/(кг·К) (при 27 °С) и 1436 Дж/(кг·К) (при 2223 °С) [9].

В качестве базовой для исследований используется экспериментальная установка, оптическая схема и внешний вид которой приведены на рис. 1.

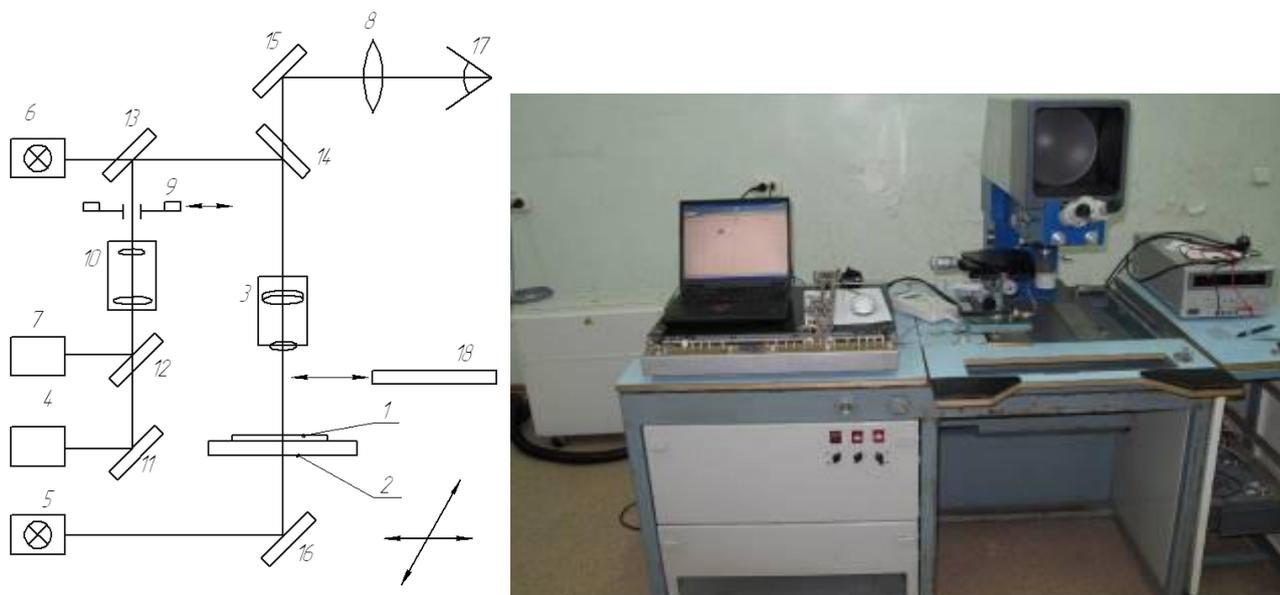


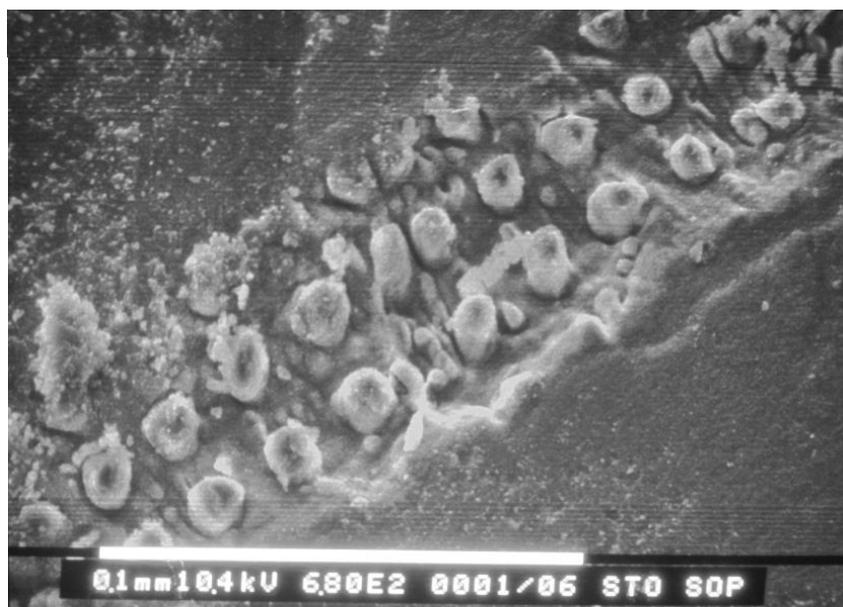
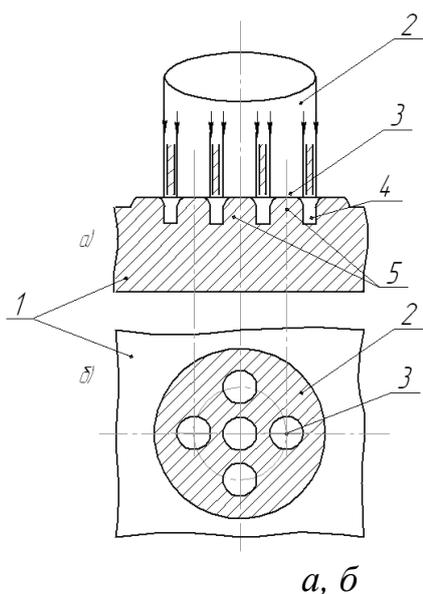
Рис. 1. Упрощённая оптическая схема и внешний вид лазерной установки микрообработки поверхностных структур тугоплавких полупроводников

При подготовке экспериментов в качестве излучателя выбран наносекундный твердотельный Nd:YAG лазер «Бриллиант» фирмы QUANTEL, имеющий параметры: длины волн генерации 1064, 532, 355, 266 нм; длительность импульса (4–6) нс; Энергия импульса – до 360 мДж на длине волны 1064 нм; средняя мощность лазера 3,6 Вт на длине волны 1064 нм; расходимость пучка – менее 0,5 мрад.

Лабораторная установка включает следующие элементы: 1 – обрабатываемая подложка; 2 – двухкоординатный микроскопный столик с ручным управлением; 3 – объектив для ультрафиолетового излучения; 4 – твердотельный лазер; 5 и 6 – источники подсветки подложки, использующие галогенные лампы накаливания; 7 – галогенный излучатель устройства формирования на подложке световой цветной метки; 8 – окулярная часть микроскопа наблюдения поверхности обрабатываемой подложки; 9 – сменная маска, окно которой формирует поперечное сечение лазерного пучка, отображается объективом 3 на поверхность подложки; 10 – коллиматор (расширитель) лазерного пучка; (11–16) – зеркала, 17 – наблюдатель; 18 – калориметрический измеритель мощности/энергии лазерного импульса.

В ряде случаев линзовые микроструктуры на поверхностях подложек из лейкосапфира образовывались воздействием на подложку лазерным пучком кольцевого сечения. На рис. 2 показано продольное сечение лазерного пучка (а) и вид на фокальное пятно на подложке (б).

Под воздействием лазерного излучения сублимируется материал подложки вне поля выступов, оставшийся материал выступов может служить микролинзой; может быть сформирован массив микролинз на поверхности подложки из лейкосапфира или карбида кремния.



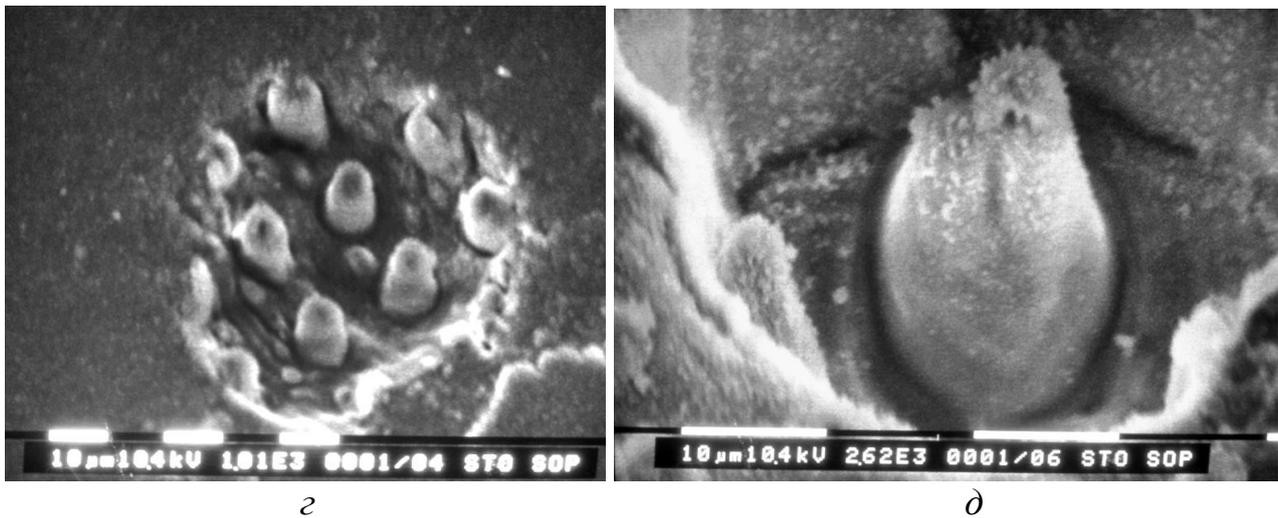


Рис. 2. Лазерное формирование микролинзовых структур:

а – продольное сечение лазерного пучка; *б* – фокальное пятно на подложке; *в, г, д* – СЭМ фотографии микролинзовых образований на поверхности лйкосапфировых подложек. Диаметр образований 3, 5, 6 мкм при высоте 8 мкм. Наклон столика 35°, ускоряющее напряжение 10 кВ, на образец нанесена проводящая плёнка Al

На рис. 2, *а, б*: 1 – подложка, 2 – лазерный пучок, 3 – каналы в лазерном световом потоке, 4 – кольцевые канавки в подложке вокруг выступов 5, являющихся микролинзами.

Для формирования излучений в виде пучков с кольцевым поперечным сечением использована проекционная оптическая схема с формированием изображения маски на поверхности обрабатываемой подложки.

Маска помещается в лабораторную установку в позиции 4 (см. рис. 1), её изображение на поверхности подложки, формируемое при использовании объектива с фокусным расстоянием 16 мм с уменьшением 30×, получается в виде рисунка с диаметрами островков $d = 1,7$ мкм при шаге их расположения 17 мкм; лазерное излучение, таким образом, должно попадать на поверхность подложки в областях между островками. Вследствие дифракции на объективе изображение островков получится не резким, что создаёт полутоновый эффект на краях островков и сглаживание вертикальных рельефов при сублимации.

При сублимационных воздействиях использовалось излучение с длиной волны $\lambda = 355$ нм, частота следования импульсов 50 Гц, длительность импульсов 5 нс; размер облучаемой области подложки приблизительно $d = 50$ мкм, средняя мощность излучения $P_{\text{ср}} = 4,5$ мВт; мощность в импульсе $P_{\text{им}} = 450$ МВт; импульсная плотность мощности падающего излучения $6,7 \cdot 10^{18}$ Вт/м².

Образцы подложек с рельефом исследовались с помощью оптического микроскопа и растрового электронного микроскопа Биомед-4 и РЭМ Philips SEM–505, а также с помощью оригинальной приставки к оптическому микроскопу, позволяющей выявлять эффекты нарушения полного внутреннего отражения поверхностей, обусловленные рельефом на пооверхности.

На рис. 2, в–д показаны СЭМ фотографии микролинзовых образований на поверхности лейкосапфировых подложек. На рис. 2, д глубина ямы 29,5 мкм, диаметр 50 мкм, высота и диаметр внутреннего выступа 19 мкм и 16 мкм; структура получена воздействием полого луча с интенсивностью $6,1 \cdot 10^{18}$ Вт/м², время импульсно-периодического облучения 10 с.

На рис. 2, з глубина кратера 6,5 мкм. Столбики имеют диаметр 8 мкм, получены при интенсивности $6 \cdot 10^{18}$ Вт/м² за время экспозиции 3 с. Структура рис. 2, в получена многократным дублированием облучения со смещением по одной координате с шагом 34 мкм.

Для лазерного формирования рассеивающего рельефа в виде массива кольцевых дорожек на поверхности лейкосапфира или карбида кремния разработан «моторизованный» предметный столик к лазерной установке, позволяющий с помощью шагового двигателя вращать подложку вокруг оси вращения, параллельной оптической оси объектива установки и возможностью изменять расстояние между осями. Лазерный луч при вращении столика описывает на поверхности фигуры в виде массива соосных окружностей, по каждой окружности сублимируется массив микроструктур фокального пятна, то есть структур, образующихся во время лазерного импульса. Окружность содержит приблизительно 700 дискретных позиций экспонирования, размер облучаемого за импульс участка 25×25 мкм.

На рис. 3 показаны оптические фотографии участков массива колец, полученные с рельефной поверхности лейкосапфировой подложки с различными увеличениями; подложка подсвечивалась светом светодиода снизу под углом, большим угла полного внутреннего отражения.

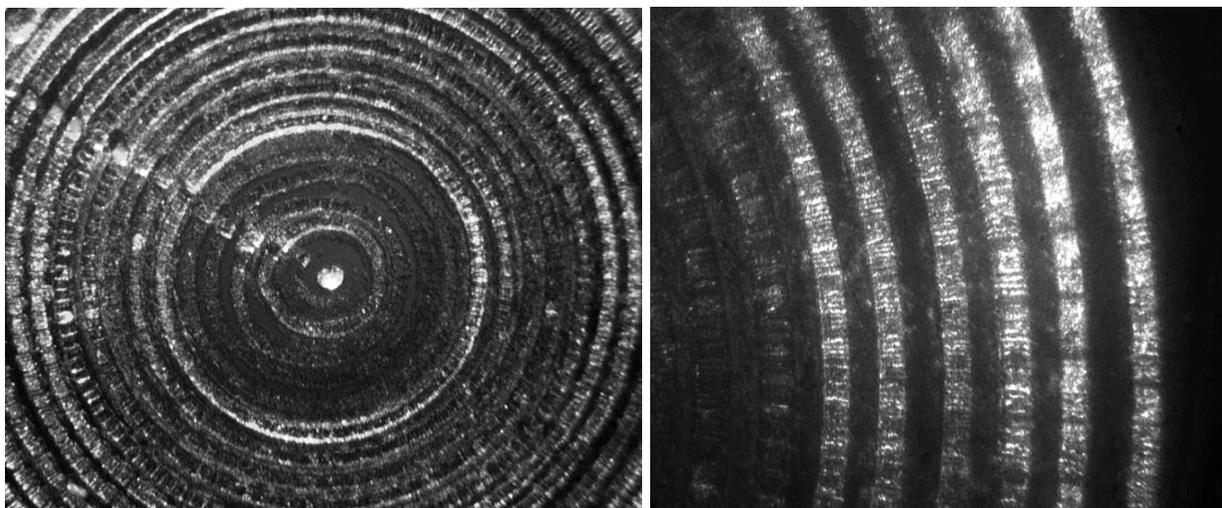


Рис. 3. Оптическая фотография массива колец, полученная с рельефной поверхности лейкосапфировой подложки, подсвечиваемой снизу под углом, большим угла полного внутреннего отражения (ширина колец и промежутков между ними 25 мкм)

Свет изнутри подложки при отсутствии рельефа в виде колец не проходит через поверхность подложки наружу; образованный лазерным воздействием рельеф на поверхности позволяет излучению пройти поверхность. Диаметр области подложки, заполненной массивом колец, порядка миллиметра.

На рис. 4 показаны оптические микрофотографии участков поверхности подложки с лазерным сублимационным рельефом, полученные в отражённом свете, также с различными увеличениями.

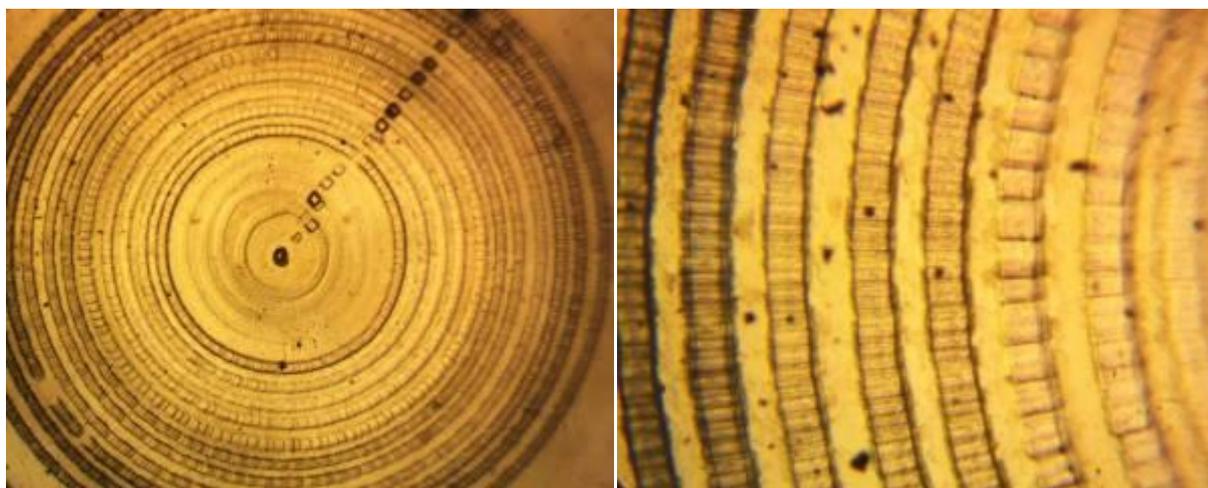


Рис. 4. Оптическая микрофотография системы колец в отражённом свете

На фотографиях на внутренних кольцах видны почти квадратные участки лазерной сублимационной обработки, стыкующиеся друг с другом своими краями; на внешних кольцах участки лазерного воздействия расположены с неоднократным перекрытием, накладываются друг на друга.

На рис. 5 показаны СЭМ фотографии массива колец на поверхности лейкосапфировой подложки. Фотографии получены под различными ракурсами и с разным увеличением. Рельеф поверхности сапфира на рисунке в сублимированных облучаемых лазером областях неупорядоченный, содержит выступы и впадины величиной (1–3) мкм со средней периодичностью их расположения порядка (2–3) мкм (аспектное отношение (0,5–1).

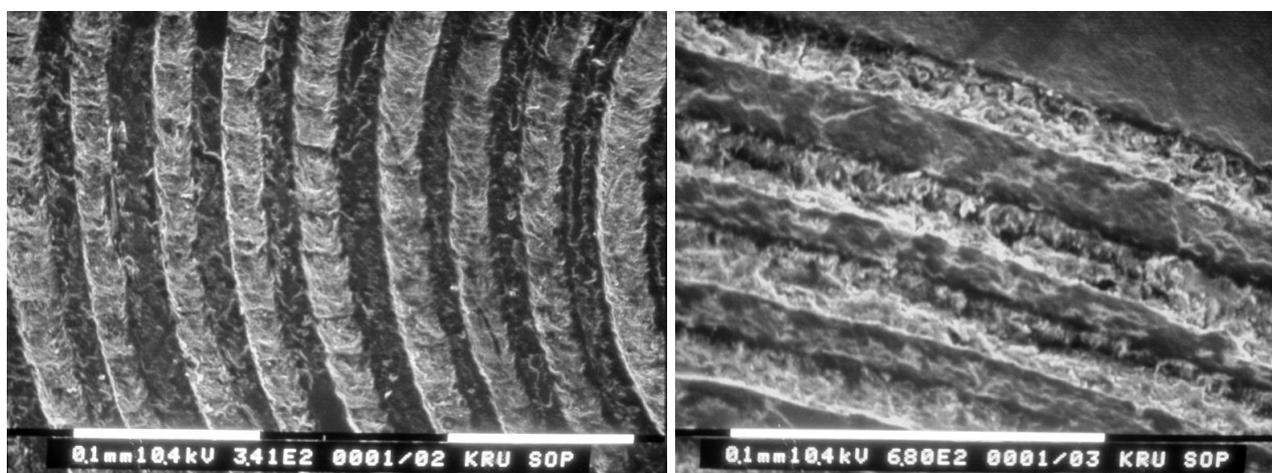


Рис. 5. СЭМ фотографии массива колец на поверхности лейкосапфировой подложки

Таким образом, разработаны экспериментальные методики лазерного получения поверхностных неупорядоченных рельефных структур с аспектным отношением порядка (0,5–1) на тугоплавких диэлектриках, в частности, на лейкосапфире, получены положительные результаты по направлению создания технологии одностадийного «сухого» (без использования травителей) получения микролинзовых поверхностных структур на лейкосапфире.

Результаты данных исследований применены при создании светодиодов с увеличенным внешним квантовым выходом.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ГК № 14.513.11.0101.

БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берг А., Дин П. Светодиоды. – М.: Мир, 1979.
2. Полищук А.Г., Туркин А.Н. Новое поколение светодиодов компании Cree для освещения // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 7. – С.20-23.
3. Туркин А.Н. Мощные светодиоды Cree для освещения: основные преимущества и перспективы применения // Полупроводниковая светотехника – 2009. – №2. – С.14-17.
4. Елисеев И. Обзор светодиодной продукции компании CREE // Новости электроники. – 2009. – № 9. – С. 5-12.
5. Синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN с удалённой сапфировой подложкой / И.П. Смирнова и др. // ФТП. – 2006. – Т. 40, Вып. 111. – С. 1397-1401.
6. Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC / И.П. Смирнова и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44, Вып. 5. – С. 684-687.
7. Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN / Д.А. Закгейм и др. // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, вып. 7. – С. 885-889.
8. Ки Донг Ли, Сжодин Р., Эрикссон Т. Нанотравление увеличивает эффективность светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №5. – С.22-24.
9. Selectively grown photonic crystal structures for high efficiency InGaN emitting diodes using nanospherical-lens lithography / Wei T. B. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 101, N. 21. – P. 211111 - 211111-5.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев, М. В. Кузнецов,
В. А. Райхерт, С. Л. Шергин, 2014

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ ИМПУЛЬСНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ТЕПЛООБМЕН

Александр Дмитриевич Назаров

ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Анатолий Федорович Серов

ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Виктор Иванович Терехов

ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, тел. (383)330-70-08, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследована интенсивность теплообмена при натекании импульсного водяного спрея на плоскую вертикальную теплообменную поверхность. Выполнено сравнение теплообмена с синхронным и несинхронным включением жидкостных клапанов для формирования капельной области.

Ключевые слова: теплообмен, импульсный газочапельный поток, структура капельной фазы.

INFLUENCE OF STRUCTURE OF DROPLET PHASE OF PULSE AEROSOL ON HEAT EXCHANGE

Alexandr D. Nazarov

Institute of Thermophysics, Russian Academy of Sciences, prosp. Lavrentyev 1, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., tel. (383)330-64-66, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

Anatoly F. Serov

Institute of Thermophysics, Russian Academy of Sciences, prosp. Lavrentyev 1, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Prof., tel. (383)330-64-66, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Victor I. Terekhov

Institute of Thermophysics, Russian Academy of Sciences, prosp. Lavrentyev 1, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Prof., tel. (383)330-70-08, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Comparison of the heat exchange with synchronous and non-synchronous switching liquid valves for aerosol.

Key words: heat transfer, two-phase pulse flow, droplet phase structure.

Введение

Применение газокапельного потока в качестве охладителя объясняется тем, что данный вид охлаждения обладает высокой интенсивностью процессов теплопереноса. Дополнительным преимуществом газокапельного потока является то, что его легко доставить на участки сложной поверхности, обеспечивая равномерное охлаждение всего объекта. Управляя режимом и направляя газокапельную струю на заданные участки, можно задавать режим охлаждения, поддерживать заданную температуру объекта, или устранять локальный перегрев на поверхности. Имеется возможность раздельной подачи компонент смеси с целью организации взаимодействия компонент только после контакта с рабочей поверхностью.

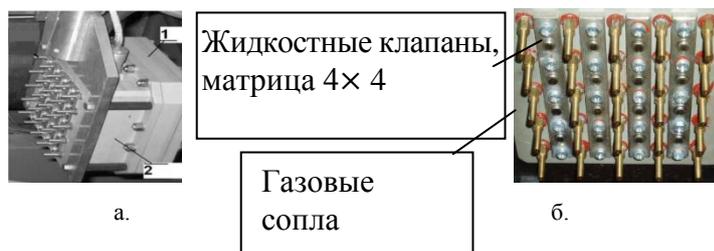
Не удивительно, что на сегодняшний день имеются многочисленные экспериментальные и теоретические исследования влияния характеристик газокапельного потока на эффективность теплообмена, как за границей (например, Ghodbane and Holman, 1991; Estes and Mudawar, 1995; Navedo, 2000; Chen et al., 2002, 2004) [1-4], так и в России (Исаченко В.П. и Кушнырёв В.И., 1984; Исаченко В.П. и Сидорова И.К., 1982; Alekseenko S., Bilsky A. [7], Heinz O., Pyushin B., Markovich D., 2003; Терехов В.И., Пахомов М.А., 2009) .

В настоящей работе приводятся результат экспериментального исследования влияния режима формирования импульсного газокапельного потока на теплообмен с поверхностью, нагретой ниже точки кипения воды.

Экспериментальное оборудование

Разработанный экспериментальный стенд, подробно описанный в [5], позволяет управлять факелом потока смеси и регистрировать параметры потока и

теплообмен плоского нагревателя к газокапельному потоку. Установка состоит из программируемого источника многоструйного импульсного спрея, цифрового калориметра с теплообменником и автоматизированной системы регистра-



ции параметров газокапельного потока, расхода охлаждающей жидкости, температуры, давления, теплового потока, толщины и скорости пленки на поверхности теплообменника.

Источник газокапельного потока состоит из камер для жидкости и газа (рис.1.а). На выходной поверхности газокапельного источника расположены 16-ть жидкостных форсунок в виде матрицы 4×4 (рис. 1.б). Форсунка представляет собой распылитель из четырех сопел диаметром 0,2 мм с общим электромагнитным клапаном. Расход жидкости изменяется за счет величина давления на входе форсунок ($P_l = 0,5 \text{ МПа} - 5 \text{ МПа}$). Режим работы каждого клапана с продолжительностью от 2 мс до 10 мс и частотой открытия клапана от 1 до 50 Гц позволяет выключать поток на заданное время и формировать газокапельный поток с заданной массой жидкой фазы и размером капель жидкости. Вокруг каждой жидкостной форсунки для создания спутного воздушного потока установлены 25 газовых сопла с диаметром выходного отверстия $0,45 \pm 0,05$ мм. Расход через газовые сопла задается давлением жидкости на входе ($P_g = 0 - 0.6 \text{ МПа}$). Источник формирует газокапельный поток, в котором движутся капельно-жидкостные области в постоянном спутном воздушном потоке. О расходе форсунок, распределении капельно-жидкостной фазы и спутного воздушного потока подробно можно узнать в [6].

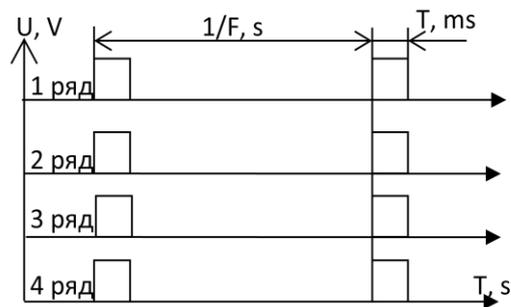
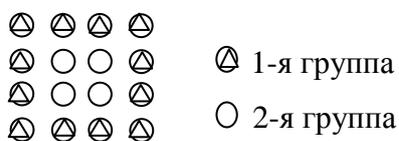


Рис. 2. Диаграмма работы инжекторов источника спрея в режиме А

Рис. 1. Источник воздушно-капельного потока:

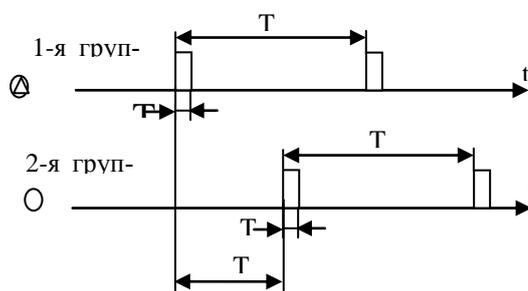
а – внешний вид источника, 1 – воздушная камера, 2 – жидкостная камера; б - выходная поверхность источника

Рис. 2. Диаграмма работы инжекторов источника спрея в режиме *A*. Разработанное микропроцессорное оборудование управления позволяет задавать индивидуальную программу работы каждого жидкостного инжектора в матрице газочапельного источника. Что дает возможность создавать аэрозоль с разным



а.

Рис. 3а. Состав 2-х групп матрицы жидкостных клапанов режима *B*



б.

Рис. 3б. Диаграмма работы 2-х групп инжекторов источника спрея:

T_r – длительность периода открытия клапанов группы; T – длительность открытия клапанов группы; T_f – сдвиг времени начала работы инжекторов второй группы относительно начала работы первой ($T_f = T_r/2$)

режимом неоднородности капельножидкой фазы, и исследовать их влияние на теплообмен.

В данной статье приводятся исследования теплообмена при работе матрицы жидкостных инжекторов в трех режимах. Режим *A* обозначает одновременное открытие и закрытие всех жидкостных форсунок [5, 6]. Диаграмма работы данного режима приведен на рис. 2.

Режим *B* – соответствует поочередной работе двух групп жидкостных клапанов. На рисунке 3а показана матрица клапанов с обозначением групп инжекторов; на рис. 3б диаграмма работы жидкостных клапанов режима *B*. Внутри группы инжекторы открываются и закрываются одновременно продолжительностью T_i . Открытие групп происходит отдельно во времени с периодом T_r . Сдвиг времени начала работы инжекторов второй группы относительно первой: $T_f = T_r/2$.

При режиме *B* матрица жидкостных клапанов разделена на группы с четырьмя инжекторами в каждой, расположенными в ряд горизонтально (рис. 4а). Рис.4б демонстрирует диаграмму взаимной работы групп. Время открытия клапанов во всех группах было одинаково, обозначенное переменной T_i , [с]. Период работы T_r жидкостных клапанов первой горизонтальной группы определял порядок работы инжекторов остальных групп. Время T_r делилось на равные отрезки, так, что бы закрытие четвертой группы по времени совпадало с открытием первой группы клапанов (см. рис. 4б).

Для выше описанных режимов временные интервалы принимали значения: $T_i = 2 \text{ мс} - 10 \text{ мс}$; $T_p = 100 \text{ мс} - 1000 \text{ мс}$. Расстояние между инжектором и теплообменником в данных экспериментах было фиксированным и составляло $0,23 \text{ м}$. Поддерживалась постоянная температура поверхности ($T_w = \text{const}$), равная $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость спутного потока $V_{\text{возд.}} = 5 \text{ м/с}$, скорость жидкостно-капельных областей 5.5 м/с . Измерения теплообмена проводились в атмосферных условиях при давлении около 0.1 мПа и температуре среды около $20 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (показания фиксировались). Температура воздушной и жидкостной составляющих аэрозоля во время эксперимента записывались и составляли: жидкости – $7 \text{ }^\circ\text{C} \div 13 \text{ }^\circ\text{C}$; воздуха – $20 \text{ }^\circ\text{C} \div 22 \text{ }^\circ\text{C}$. Эксперименты проходили при атмосферном давлении.

Результаты и их обсуждение

Средний по поверхности теплообменника коэффициент теплоотдачи определялся как

$$H = Q_T / F_T (T_w - T_s),$$

где Q_T – тепловая энергия теплообменника; F_T – его площадь, а T_w и T_s – температуры теплообменной поверхности и жидкости, подаваемой в форсунки.

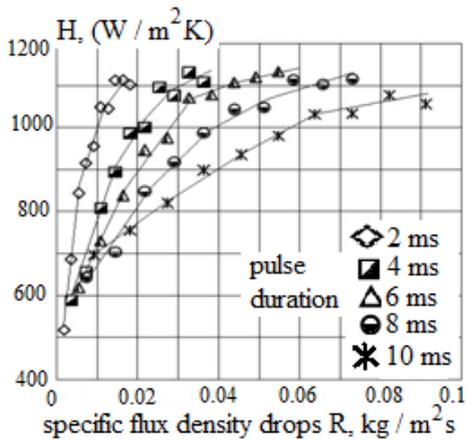
На рис. 5 показаны три графика с семейством зависимостей коэффициента



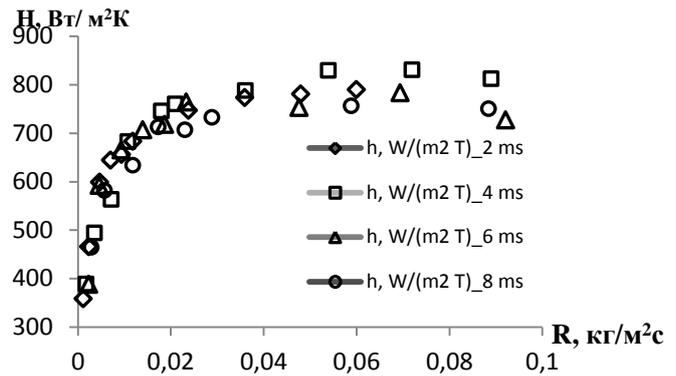
Рис. 4. а - группировка матрицы жидкостных клапанов режима В; б - диаграмма работы

теплообмена H [Вт/м²К] от удельной плотности потока капель R [кг/м²с]. Кривая на графике соответствует режиму работы при одном значении длительности открытия жидкостных клапанов T_i . Изменение расхода жидкости происходит за счет изменения периода открытия клапанов T_p . Рисунок 5а демонстрирует динамику коэффициента теплообмена при синхронном открытии и закрытии всех жидкостных клапанов

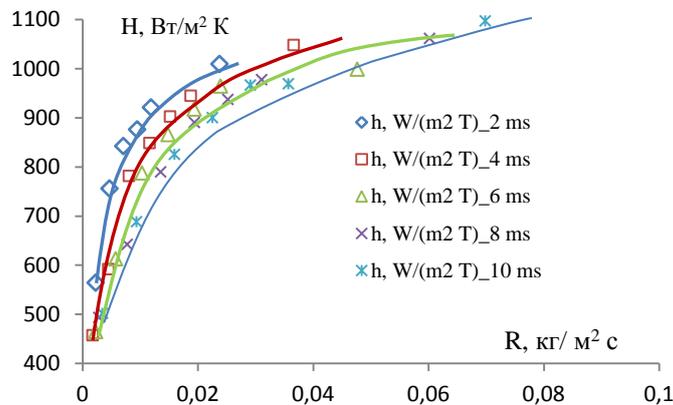
аэрозольного источника (режим А, рис. 2). Рис. 5б – при программном орошении двумя группами (режим Б, рис. 3), и рис. 5в – при программном орошении четырьмя группами (реж. В, рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 5. Зависимость изменения теплового потока от удельной плотности потока капель:

а – синхронная работа клапанов; б – работа 2-х групп; в – работа 4-х групп

Из графика рис. 5а видно, что при синхронном открытии всех 16-ти жидкостных клапанов (режим А), в зависимости от длительности импульса опытные данные заметно расслаиваются. Причем максимум коэффициента теплоотдачи для менее длительных импульсов достигается при значительно меньших объемах орошения. Группировка капель в зависимости от частоты повторения импульсов приводит к выводу, что при частоте повторения, когда «голова» следующего импульса настигает «хвост» предыдущего импульса режим охлаждения переходит в режим орошения непрерывным газокпельным потоком. Следовательно, использование коротких импульсов подачи жидкости является более эффективным с точки зрения интенсификации теплоотдачи. При этом величина самого максимума практически слабо зависит от скорости орошения.

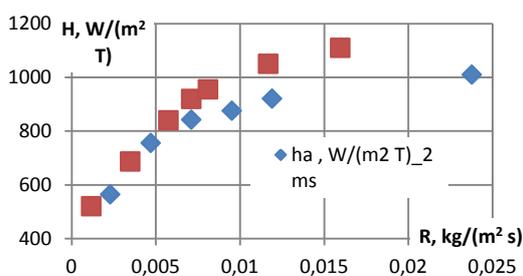
Из сравнения коэффициентов теплоотдачи при работе источника в режиме В с режимом А видно, что при режиме В значения коэффициента теплообмена,

как и при режиме *A*, асимптотически стремятся примерно к одному максимальному значению коэффициента теплоотдачи. Однако ярко выраженного расслоения зависимостей от длительностей импульсов не наблюдается. Значение максимума режима *B* на 25 % ниже режима *A*. Максимум режима *B* достигается при расходе $\sim R = 0,02 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$. В режиме *A* такому расходу максимум коэффициента теплоотдачи соответствует длительности импульса $T_i = 2 \text{ мс}$ (рис.5а). Можно заключить, что при режиме *B* коэффициент теплоотдачи не зависит от длительности открытия жидкостных клапанов, формирующих капельные области импульсного аэрозоля.

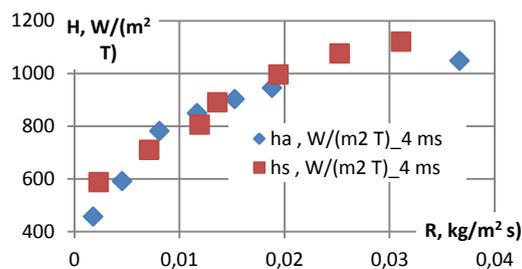
При сравнении семейств зависимостей коэффициента теплообмена режимов *A* и *B* видно, что для всех значений T_i коэффициенты теплообмена асимптотически стремятся к постоянному значению, которое для синхронной работы (режим *A*) жидкостных клапанов, примерно, на 10 % выше, чем для несинхронного (режим *B*).

Детальное сравнение поведения коэффициента теплообмена режимов *A* и *B* работы источника для каждого значения T_i показано на рис. 6.

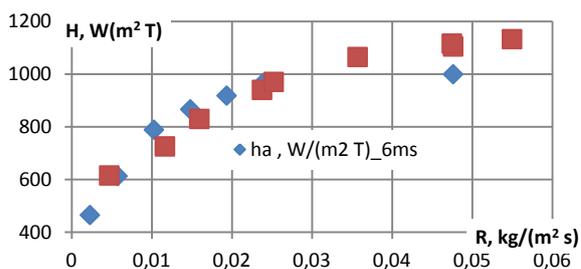
Сравнение показывает, что при $T_i = 2 \text{ мс}$ охлаждающий эффект выше при работе жидкостных клапанов в режиме *A* (рис.6а). При значениях $T_i = 4 \text{ мс}$, 6 мс значения коэффициента во всем диапазоне расхода жидкой фазы обоих режимов работы сопоставимы друг с другом (рис.6 б, в). Эффективность режима *B* по сравнению с работой режима *A* начинает проявляться при $T_i = 8 \text{ мс}$, и продолжает увеличиваться при $T_i = 10 \text{ мс}$ (см. рис.6 г, д). Объясняется это тем, что при длительности $T_i = 10 \text{ мс}$ поверхность теплообменника более равномерно покрывается жидкостью, в следствии сокращается площадь «сухих» участков.



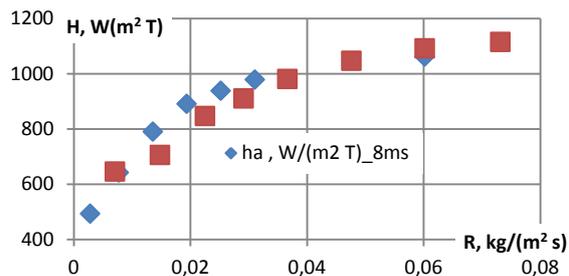
а) Продолжительность открытия клапанов $T_i = 2 \text{ мс}$



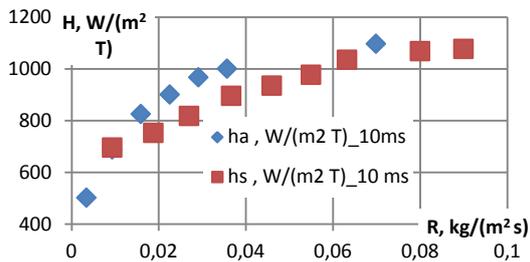
б) Продолжительность открытия клапанов $T_i = 4 \text{ мс}$



в) Продолжительность открытия клапанов $T_i = 6 \text{ мс}$



г) Продолжительность открытия клапанов $T_i = 8 \text{ мс}$



д)
Продолжительность открытия
клапанов $T_i = 10$ мс

Рис. 6. Сравнение коэффициентов теплоотдачи при синхронной и несинхронной работе клапанов жидкости

Заключение

Экспериментально исследована структура факела двухфазного спрея и интенсивность теплообмена при натекании импульсного водяного спрея на плоскую вертикальную теплообменную поверхность при разных режимах формирования капельной фазы. Показано, что есть режимы формирования импульсного спрея, когда изменение длительности капельной области T_i не влияет на теплообмен (режим *Б*). Есть режимы, при которых наблюдается уменьшение максимального значения коэффициента теплоотдачи (сравнение режимов *А* и *Б*). Из сравнения теплообмена при синхронном (режим *А*) и несинхронных (режим *Б* и *В*) режимах формирования капельной области можно сделать вывод, что в целом нестационарный газокapельный поток приводит к интенсификации теплообмена по сравнению с стационарным газокapельным потоком. Однако надо стремиться, чтобы теплообменная поверхность орошалась жидкостью равномерно, т.к. неравномерное распределение жидкости с большими участками сухой поверхности снижают эффективность теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ghodbane, M., Holman, J.P., 1991. Experimental study of spray cooling with freon-113. Int. J. Heat Mass Transfer 34, 1163–1174.
2. Estes, K.A., Mudawar, I., 1995. Comparison of two-phase electronic cooling using free jets and sprays. J. Electron. Packag. 117, 323–332.
3. Navedo, J., 2000. Parametric effects of spray characteristics on spray cooling heat transfer. Ph.D. dissertation, University of Central Florida.
4. Chen, R.-H., Chow, L.C., Navedo, J.E., 2004. Optimal spray characteristics in water spray cooling. Int. J. Heat Mass Transfer 47, 5095–5099.
5. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Структура импульсной распыленной струи при изменении ее частотных характеристик. - Теплофизика высоких температур. 2011. Т.49. №1. С. 116.

6. Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И., Шаров К.А. Экспериментальное исследование испарительного охлаждения импульсным спреем. Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82. № 6. С. 116.

7. Alekseenko S., Bilsky A., Heinz O., Ilyushin B., Markovich D. Near - Wall Characteristics of Impinging Turbulent Jet // Proc. of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Antalya, Turkey, 12 - 17 okt. 2003. Pp. 235 -241.

© А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, В. И. Терехов, 2014

УДК 681.7.069.3

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МАТРИЧНЫХ ПРИЁМНИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ С АНТЕННО-СВЯЗАННЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Рассматриваются технологические проблемы создания матричных приёмников излучения терагерцового диапазона на основе детекторов с антенно-связанными чувствительными

элементами на примере использования диодов Шоттки, изготавливаемых по оригинальной лазерно-пиролитической технологии, с внутрипиксельными встроенными микроантеннами.

Ключевые слова: матричный приёмник излучения, антенно-связанный чувствительный элемент, диод Шоттки, ЛПФХО, внутрипиксельная микроантенна.

OPPORTUNITY OF CREATION MATRIX RADIATION DETECTORS WITH OPTICAL ANTENNA SENSORS

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo st., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

A technological problems of matrix THz-detector with optical antenna sensors creation are discussed. As example LCVD-making Schottky diode with intra-pixel build-in microantennas are considered.

Key words: matrix THz-detector, optical antenna sensor, Schottky diode, LCVD, intra-pixel build-in microantenna.

Терагерцовое излучение обладает, в сравнении с излучением видимого и ИК диапазонов спектра, рядом особенностей, привлекающих к нему в последнее время внимание исследователей [1–4]. Электромагнитные волны терагерцового диапазона (0,1–100 ТГц) поглощаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину. Его можно использовать в тех же применениях для просвечивания предметов, где сейчас используется рентген, однако, в отличие от рентгеновских лучей, терагерцовое излучение не опасно, поскольку не производит ионизацию среды и повреждение биомолекул. Терагерцовые частоты примерно соответствуют колебательным частотам молекул. Отражённые, поглощённые в среде или прошедшие сквозь неё терагерцовые волны несут в себе богатейшую информацию об объекте.

Важнейшая особенность терагерцового диапазона – возможность существенного, на порядки величины, расширения полосы частот сигналов в системах связи, в микроэлектронных устройствах при переходе на этот диапазон.

Все это определяет потенциально широкий спектр применения терагерцового излучения.

Для целей детектирования терагерцовых излучений в известной литературе рассматривается применение оптоакустических ячеек Голея [2], обеспечивающих измерение модулированных сигналов с частотой модуляции порядка кГц; разработан однопиксельный приёмник на основе использования диода Шоттки и планарной внутрипиксельной микроантенны, требующий сканирования для получения изображения [3], изготавливаемый по КМОП-технологии с

0,13 мкм топологической нормой; представлены результаты испытаний терагерцовой камеры с матрицей приёмника изображения на частоте 0,8 ТГц на основе применения кремниевого МОП транзистора [4], с числом пикселей в матрице 1024 и встроенной в каждый пиксел планарной кольцевой микроантенной. Частота модуляции принимаемых указанными твердотельными приёмниками сигналов не имеет ограничений, свойственных оптоакустическим.

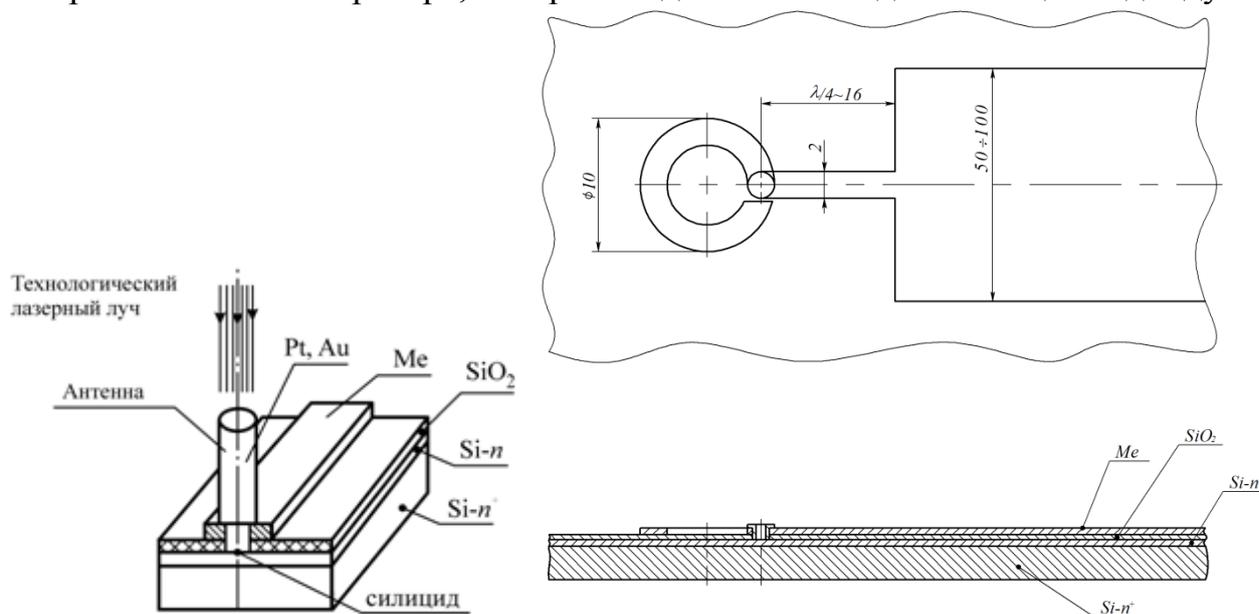
В нашем сообщении рассматриваются проблемы создания матричных приёмников изображения терагерцового диапазона на основе детекторов электромагнитного излучения с антенно-связанными чувствительными элементами на примере использования диодов Шоттки, изготавливаемых по оригинальной лазерно-пиролитической технологии, и внутривидеопиксельных встроенных микроантенн.

Требования к конструкции встраиваемых в пиксел микроантенн определяются поперечным характером электромагнитных волн и технологическими ограничениями их изготовления. На рис. 1 представлены схематически штыревая и планарная конструкции антенны.

Расположение антенны относительно проводящей подложки и её размеры и соотношение сторон определяют её диаграмму направленности. На рис. 2 приведены диаграммы направленности четвертьволновой штыревой антенны (рис. 2, а) и полуволновой антенны (рис. 2, б), которая может быть планарной и закреплённой на проводящей основе или в свободном пространстве, как показано на рисунке.

Лепесток диаграммы направленности четвертьволновой антенны в виде вертикального штыря расположен вдоль поверхности проводящей основы; полуволновая антенна показана в свободном пространстве; если она изготовлена в виде планарной конструкции, лепесток диаграммы направленности направлен перпендикулярно подложке.

Ниже обсуждается вариант кольцевой антенны в виде изогнутого в кольцо четвертьволнового вибратора, который подключается одним концом к диоду.



*a**б*

Рис. 1. Конструкции внутрипиксельных микроантенн:

a – схема штыревой антенны, интегрированной с диодом Шоттки и расположенной на поверхности кремниевого чипа; *б* – топологическая схема антенно-диодной ячейки с планарной антенной на поверхности кремниевого чипа

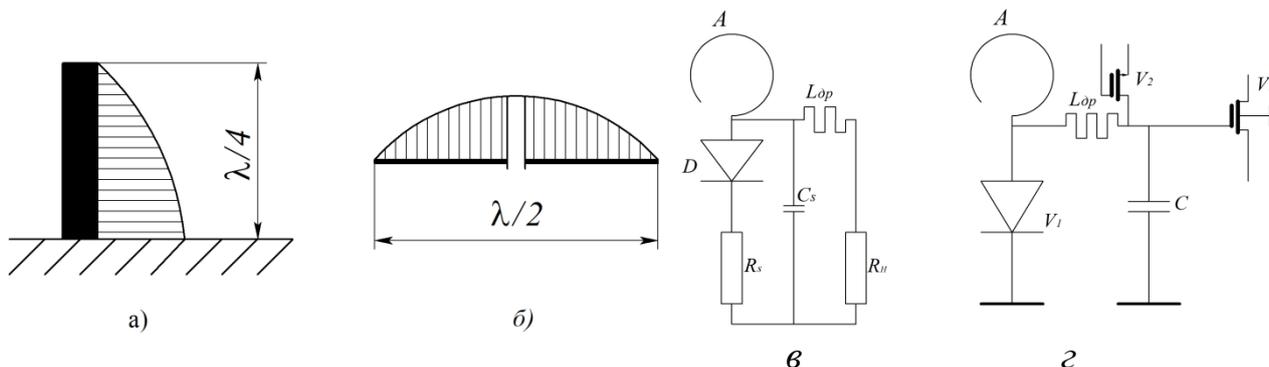


Рис. 2. Диаграммы направленности антенн:

a – четвертьволновой; *б* – полуволновой. Эквивалентные схемы: *в* – антенно-диодной ячейки приёмника изображения; *г* – пикселя матрицы приёмника терагерцового изображения с диодом Шоттки

Эквивалентные схемы антенно-диодной ячейки приёмной матрицы и пикселя матрицы приёмника приведены на рис. 2, *в* и *г*, соответственно.

У кольцевой микроантенны *A* один конец свободный, второй конец соединён с электродом диода Шоттки *D*, C_S и R_S – ёмкость и сопротивление контакта металл-полупроводник, R_n – нагрузочное сопротивление, L_{dr} – дроссель, изолирующий диодно-антенный узел от нагрузки по высокой частоте. Кольцевая антенна фактически является четвертьволновым вибратором, который изогнут в кольцо и плоскостью кольца расположен параллельно подложке, диаграмма направленности представляет собой лепесток, осью симметрии направленный по нормали к подложке. Дроссель может быть выполнен в виде сосредоточенной микрополосковой индуктивности, то есть, в виде металлической полоски шириной, много меньшей ширины полосковых линий, входящих в структуру ячейки, или в виде четвертьволнового изолятора, то есть, виде секции полосковой линии, входом которой является электрод диода Шоттки, а выход подключён к полосковой линии с малым волновым сопротивлением. Малое выходное сопротивление Z_H изолятора трансформируется в высокое входное Z_{BX} в соответствии с уравнением:

$$Z_{BX} = Z_q^2 / Z_H, \quad (1)$$

где Z_q – волновое сопротивление изолятора.

Ячейки объединены в матрицу, состояние ячеек периодически опрашивается с помощью вспомогательных полупроводниковых элементов, входящих в пиксель матрицы. Возможная эквивалентная схема пикселя матрицы показана на рис. 2, *з*. Терагерцовый сигнал из антенны A детектируется диодом V_1 Шоттки; ток диода заряжает конденсатор C в течение длительности кадра. Конденсатор периодически разряжается через ключ V_2 ; сигнал в виде изменения напряжения на конденсаторе усиливается полевым транзистором V_3 . Схема предъявляет высокие требования к вентильным свойствам диода: ток утечки диода должен быть малым.

Основой матрицы с ячейками является кремниевая n^+ подложка с эпитаксиальным n^- слоем; подложка покрыта слоем диэлектрика; в качестве материала металлического рисунка разводки может быть использован алюминий. Диод Шоттки формируется лазерным импульсным облучением в парах металлоорганического соединения. Структура может быть изготовлена по стандартной МОП технологии с 2-микронной топологической нормой, за исключением формирования электродов диода – диаметр порядка десятков нанометров.

В целом вольт-амперная характеристика контакта с барьером Шоттки в широких пределах изменения тока соответствует характеристике типа

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{akT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где a – коэффициент «неидеальности».

При обратном смещении ток через контакт обычно увеличивается с ростом напряжения. Особенностью выпрямляющих контактов металл - полупроводник, отличающих их от p - n -переходов, является отсутствие инжекции неосновных носителей в полупроводник при прямых напряжениях.

Таким образом, в диоде Шоттки отсутствуют накопление неосновных носителей заряда в областях диода при прямом напряжении и рассасывание этого заряда при изменении знака напряжения. Это улучшает быстродействие диода.

Традиционно используемые методы получения переходов металл – полупроводник [5] являются многоступенными, включают этапы подготовки поверхности полупроводника к нанесению плёнок путём их отмывок и обработки в вакууме, например, ионной очисткой, нанесение плёнок напылением в вакууме, литографические процессы для получения топологических структур необходимой конфигурации.

Для обеспечения быстродействия фотоприёмника в терагерцовом диапазоне необходимо уменьшать электрическую ёмкость между его электродами и величину последовательного сопротивления диода. Поперечник электродов для терагерцового диапазона может составлять 100 нм и менее; для уменьшения последовательного сопротивления толщина слоя полупроводника должна быть

меньше поперечника электрода [6]. Электрическая ёмкость уменьшается с уменьшением электродов, в случае антенно-связанных приёмников размеры электрода диода Шоттки могут быть уменьшены до величины, много меньшей длины волны детектируемого излучения. Следует учитывать, что фотоприёмник изображения представляет собой матрицу фотоприёмников, может содержать сотни тысяч регулярно расположенных чувствительных элементов. Таким образом, необходимо решать задачу одновременного обеспечения сверхмалых размеров сенсоров и их получения в виде упорядоченной матрицы значительных размеров.

Исследуемая методика формирования тонкой плёнки материала металлического электрода диода на поверхности полупроводника основывается на технологии лазерно-пиролитического осаждения металлов на поверхность подложки из парогазовой фазы (LCVD) [7]. В настоящем исследовании эта технология применена к получению плёночных электродов диодов Шоттки.

Исследуемый импульсный наносекундный лазерно-пиролитический метод является одноступенным. Металл осаждается на подложку локально в пределах фокального пятна лазерного излучения, при этом поверхность подложки на переднем фронте лазерного импульса за счёт теплового воздействия излучения в течение долей наносекунды термически отжигается и очищается от легколетучих загрязнений и примесей, затем в ходе того же импульса происходит лазерно-пиролитический процесс осаждения атомов металла на поверхность; облучение импульсно-периодическое, и на следующих импульсах процессы повторяются. Предполагается, что такое сочетание в одном цикле технологии операций очистки поверхности и нанесения на поверхность материала электрода может обеспечить повышенную степень химической чистоты перехода металл-полупроводник и высокие электрофизические параметры перехода.

Проведены оценочные экспериментальные исследования получения антенно-связанных диодов Шоттки лазерным пиролитическим формированием электродов осаждением металла рения на монокристаллическую кремниевую подложку.

Процесс лазерного осаждения проводился в технологической лазерной установке [7] в вакуумной камере при давлении паров декакарбонила дирения порядка (1–10) Па (температура вакуумной камеры (50–80) °С). Схема камеры показана на рис. 3, *a*. На рисунке: 1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – порошок карбонила, 4 – прозрачное окно ввода излучения, 5 – объектив лазерной установки, 6 – штуцер вакуумной откачки камеры, 7 – уплотнительное кольцо.

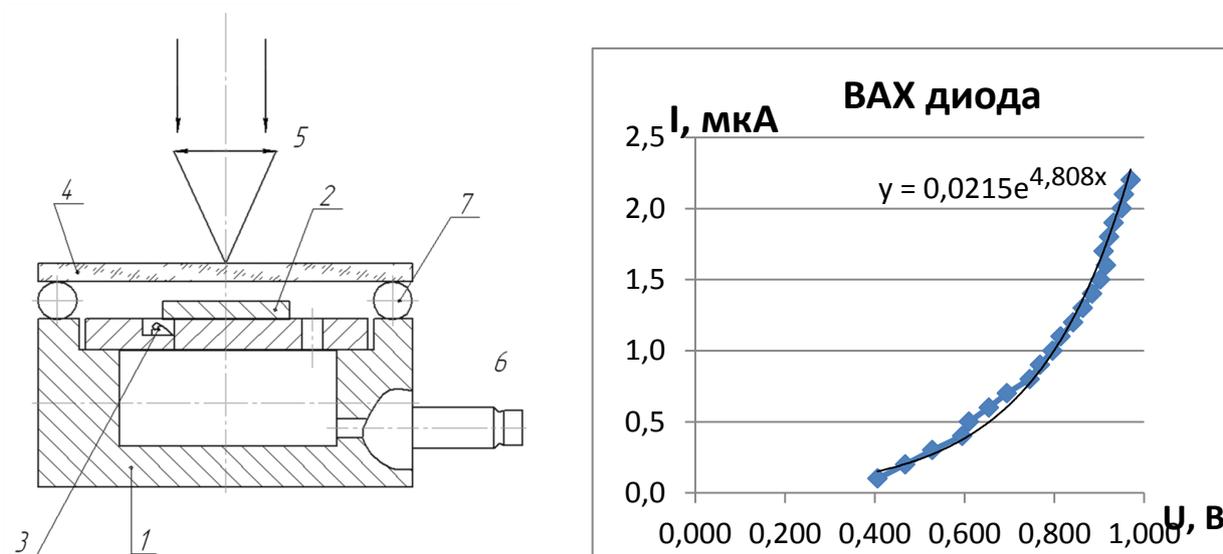


Рис. 3. Лазерно-пиролитическое осаждение электродов диодов Шоттки:

а – схема вакуумной камеры; *б* – вольт-амперная характеристика диода Шоттки с анодом из рения на кремнии КЭФ–0,3

Получены образцы в виде кремниевого чипа с осаждённым лазерно-пиролитическим методом на поверхности кремния рисунком металлических рениевых электродов: размер чипа $10 \times 10 \times 0,3$ мм; кремний КЭФ–0,3 *n*-типа; размеры электрода 25×25 мкм; толщина плёнки рения 0,1 мкм. На поверхности чипа также сформирован лазерно-пиролитическим осаждением рения прототип внутрипиксельной планарной антенны (четвертьволнового вибратора): длина планарной антенны 50 мкм, ширина полоски антенны и толщина 10 мкм и 0,2 мкм, соответственно.

Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 3, б. Характеристика имеет обычный для диодов вид; обратная ветвь характеристики снималась при напряжении до минус 1 В, измеренные токи менее 0,1 мкА; прямые токи до 2,2 мкА при напряжении до 1 В. Сплошная кривая аппроксимирует характеристику математической функцией, приведённой в верхней части графика.

Таким образом, рассмотрены перспективы создания матричных приёмников изображения терагерцового диапазона на основе детекторов электромагнитного излучения с антенно-связанными чувствительными элементами на примере использования диодов Шоттки, изготавливаемых по оригинальной лазерно-пиролитической технологии, и внутрипиксельных встроенных микроантенн. Полученные результаты оценочных технологических исследований процессов получения диодов Шоттки подтверждают целесообразность продолжения исследований по данному направлению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Highly sensitive fast Schottky-diode detectors in experiments on Novosibirsk free electron laser / E.I. Kolobanov et al. // The Joint 30th International Conference Infrared and Millimeter

Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 19-23 Sept. 2005., IRMMW-THz 2005. – 2005. – V. 1. – P. 154-155.

2. Пат. 2414688 РФ, МПК G01J 5/42. Матричный приёмник терагерцового излучения / Кузнецов С.А., Федорин В.Н., Гельфанд А.В., Паулиш А.Г. – № 2010111202/28 ; заявл. 23.03.2010 ; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8.

3. 280 GHz and 860 GHz Image Sensors Using Schottky-Barrier Diodes in 0.13 μ m Digital CMOS / Ruonan Han et al. // Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International, 19-23 Feb. 2012, San Francisco, CA. – P. 254–256.

4. A 1kPixel CMOS Camera Chip for 25fps Real-Time Terahertz Imaging Applications / Sherry H. et al. // Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International, 19-23 Feb. 2012, San Francisco, CA. – P. 252–254.

5. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. – М.: Радио и связь, 1982.

6. Huang C.L., Van Duzer T. Schottky Diodes and Other Devices On Thin Silicon membranes // IEEE Transaction on Electron Devices. – 1976. – V. 23, № 6. – P. 579-583.

7. Чесноков В. В. Резникова Е. Ф., Чесноков Д. В. Лазерные наносекундные микротехнологии: монография; под общ. ред. Д. В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 300 с.

© В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>В. Г. Меледин.</i> Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности.....	3
2. <i>К. Д. Волкова, Т. Н. Хацевич.</i> Оптические системы с переменными характеристиками	13
3. <i>В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский.</i> Формулы параксиальной оптики для двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения	21
4. <i>Т. В. Парфёнова, Т. Н. Хацевич.</i> Оптические системы для двух тепловизионных диапазонов	26
5. <i>Е. О. Ульянова, П. А. Алдохин.</i> ИК-объективы для широкоформатных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств диапазонов 3–5 мкм и 8–12 мкм.....	32
6. <i>М. П. Егоренко.</i> Двухспектральная оптическая система для медицинской аппаратуры.....	37
7. <i>Ю. Н. Пономарев, А. В. Климкин, Б. Г. Агеев, Г. В. Симонова.</i> Оптическая схема двухволнового лазерного газоанализатора ИК-диапазона.....	40
8. <i>Е. В. Власов, А. М. Ковалев.</i> О контрасте комбинированных изображений в 3D дисплеях, стимулирующих аккомодацию глаза	45
9. <i>А. Г. Верховгляд, В. В. Герасимов, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, С. Н. Макаров, Д. Г. Родионов.</i> Ближнепольная сканирующая приставка для терагерцового микроскопа с блоком нарушенного полного внутреннего отражения.....	49
10. <i>Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов.</i> Способ коррекции дифференциального хроматизма в двухволновом оптическом интерферометре.....	55
11. <i>Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк.</i> Повышение поперечного разрешения при измерении 3d рельефа интерференционным методом.....	59
12. <i>В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Ю. А. Фесько.</i> Методика и результаты измерения температуры сложных поверхностей на основе поляризационных термограмм.....	65
13. <i>М. В. Киселев, В. В. Золотцев, А. А. Козлов, Д. С. Шелковой.</i> Малогабаритный тепловизионный модуль на основе микроболометрического фотоприемного устройства	72
14. <i>А. В. Голицын, И. О. Михайлов, В. Б. Шлишевский.</i> Конструкция миниатюрного комбинированного объектива-моноблока с жидкими линзами	76
15. <i>Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева.</i> Разработка методики виртуальных испытаний оптико-электронной системы измерения координат	81

16. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, М. В. Кузнецов, В. А. Райхерт, Д. М. Никулин.</i> Формирование барьеров Шоттки на кремнии <i>n</i> -типа методом LCVD.....	86
17. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев, М. В. Кузнецов, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин.</i> Характеристики светодиодов с SiC подложкой, полученных с применением лазерного формирования структуры выходной поверхности	93
18. <i>Д. В. Чесноков, В. В. Чесноков.</i> Методы увеличения прозрачности поверхностей полного внутреннего отражения	102
19. <i>А. С. Сырнева, В. А. Райхерт.</i> Оптический резонатор полного внутреннего отражения с возможностью компенсации угловых положений его граней	113
20. <i>А. Г. Верховгляд, М. А. Завьялова, В. П. Корольков.</i> Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем.....	117
21. <i>В. И. Патерикин.</i> Предварительный анализ кристаллических структур штормгласа в качестве индикатора приземных барических образований и фронтов	123
22. <i>И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов.</i> Особенности цветовой калибровки измерительных систем.....	128
23. <i>В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев.</i> Метод измерения микроканалов, сформированных фемтосекундным лазером на оптически прозрачных материалах	135
24. <i>В. С. Айрапетян, С. Г. Губин, А. В. Макеев.</i> Оптические исследования шероховатости поверхностей деталей боеприпасов с отсечкой пороховых газов.....	140
25. <i>С. А. Шойдин.</i> Влияние шумов голограмм на формирование восстановленного сигнала	144
26. <i>В. И. Наливайко, М. А. Пономарева.</i> Анализ поведения экстремальных областей при согласовании планарных многослойных волноводных структур	149
27. <i>Д. Г. Макарова.</i> Влияние показателя преломления материала на коррекционные свойства линзы в субмиллиметровом диапазоне спектра.....	157
28. <i>Э. Г. Косцов, И. В. Князев.</i> МЭМС дифракционные решетки с перестраиваемой полем длиной световой волны.....	161
29. <i>В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова.</i> Влияние показателей преломления жидкостного элемента на эффекте электросмачивания на его коррекционные свойства	167
30. <i>В. С. Соколов, Г. А. Кащеева, Ф. А. Журавель.</i> Максимально правдоподобные оценки параметров оптических сигналов с учетом квантовой природы света и аддитивного шума на примере лазерных доплеровских систем.....	171

31. <i>В. С. Соболев, А. М. Щербаченко, Е. Н. Уткин.</i> Бесконтактная методика измерения параметров движения диффузно рассеивающих объектов на основе модуляции зондирующего лазерного излучения	177
32. <i>Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова.</i> Особенности формирования изображений объемным внеосевым ГОЭ	182
33. <i>Д. В. Чесноков, В. В. Чесноков, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин, Д. В. Кочкарев, Д. М. Никулин, М. В. Кузнецов, И. О. Михайлов.</i> Экспериментальное исследование пороговых энергетических характеристик и быстродействия тонкоплёночных термооптических затворов в видимом и ИК диапазонах спектра	190
34. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, М. В. Кузнецов, Д. М. Никулин, А. С. Сырнева, Д. С. Михайлова.</i> Исследование процессов получения слоёв наночастиц алюминия и ванадия на поверхности подложек в вакууме	199
35. <i>П. П. Добровольский, Г. И. Косолапов, К. П. Шатунов, П. А. Алдохин.</i> Экспериментальные исследования паразитной фоновой составляющей сигнала в охлаждаемых матричных ИК-фотоприемных устройствах	205
36. <i>Н. Р. Рахимов, Д. Д. Алижанов, В. А. Жмудь, О. К. Ушаков, П. В. Петров.</i> Исследование приемника аномального фотонапряжения для разработки оптоэлектронной информационно-измерительной системы.....	211
37. <i>Д. М. Никулин, Е. В. Лаптев, Д. В. Кочкарев.</i> Лабораторные исследования методик модифицирования поверхностей подложек слоями наночастиц металлов	219
38. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев, М. В. Кузнецов, С. Л. Шергин, Д. М. Никулин.</i> Визуализация процесса получения наноструктур на поверхности	225
39. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, Д. В. Кочкарев, М. В. Кузнецов, В. А. Райхерт, С. Л. Шергин.</i> Экспериментальные исследования лазерных процессов формирования рассеивающих рельефов на поверхностях тугоплавких диэлектриков	230
40. <i>А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, В. И. Терехов.</i> Влияние режима формирования капельной фазы импульсного аэрозоля на теплообмен	239
41. <i>В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков.</i> Перспективы создания матричных приёмников изображения с антенно-связанными чувствительными элементами	247

CONTENTS

1. <i>V. G. Meledin</i> . Optoelectronic information systems for science and industry	3
2. <i>K. D. Volkova, T. N. Khatsevich</i> . Optical systems with variable characteristics	13
3. <i>V. S. Efremov, D. G. Makarova, V. B. Shlishevsky</i> . Formulas of paraxial optics for two-fluid systems with variable magnification	21
4. <i>T. V. Parfyonova, T. N. Khatsevich</i> . Optical system for two thermovision bands	26
5. <i>E. O. Ulyanova, P. A. Aldohin</i> . IR-lenses for the large-format cooled photodetector arrays for the spectral ranges 3–5 μm and 8–12 μm	32
6. <i>M. P. Egorenko</i> . Two spectral optical system for medical devices	37
7. <i>Yu. N. Ponomarev, A. V. Klimkin, B. G. Ageev, G. V. Simonova</i> . Optical design of dual wavelength laser infrared range gas-analyzer	40
8. <i>E. V. Vlasov, A. M. Kovalev</i> . The contrast of the combined images in a 3D displays with eye accommodation stimulating	45
9. <i>A. G. Verkhoglyad, V. V. Gerasimov, M. A. Zavjalova, B. A. Knyazev, S. N. Makarov, D. G. Rodionov</i> . Near-field scanning module for terahertz spectrometer frustrated total internal reflection	49
10. <i>E. V. Sysoev, R. V. Kulikov</i> . The differential chromatism correction method in the two-wave interferometer	55
11. <i>E. V. Sysoev, I. A. Vykhristyuk</i> . Improvement of lateral resolution of 3d relief measurement by interferometric method	59
12. <i>V. M. Tymkul, L. V. Tymkul, Yu. A. Fesko</i> . Methods and results of temperature measuring complicated surface based on polarization thermogram	65
13. <i>M. V. Kiselev, V. V. Zolotcev, A. A. Kozlov, D. S. Shelkovoy</i> . Compact thermal imaging module based on microbolometer photodetector	72
14. <i>A. V. Golitsyn, I. O. Mikhailov, V. B. Shlishevsky</i> . The design of the miniature lenses-monoblock based on of liquid lenses	76
15. <i>E. V. Grickevich, P. A. Zviagintseva</i> . Development of method of virtual testing of optoelectronic position measuring system	81
16. <i>V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, M. V. Kuznetsov, V. A. Reichert, D. M. Nikulin</i> . The creation of Schottky barrier on <i>n</i> -si by LCVD method	86
17. <i>V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, D. V. Kochkarev, M. V. Kuznetsov, V. A. Raykhert, S. L. Shergin</i> . Properties of led on SiC substrate with laser forming of output surface structure	93
18. <i>D. V. Chesnokov, V. V. Chesnokov</i> . The methods of transparence increasing for interfaces with total internal reflection	102

19. A. S. Syrneva, V. A. Reichert. Optical resonator of total internal reflection with who options angular provisions of its faces.....	113
20. A. G. Verkhoglyad, M. A. Zavjalova, V. P. Korolkov. Sensor of autofocus for circle laser writing system.....	117
21. V. I. Paterikin. Preliminary analysis of the shtormglass crystal structures as an indicator of surface pressure systems and fronts.....	123
22. I. G. Palchikova, E. S. Smirnov. Features of colour calibration for measuring systems.....	128
23. V. P. Bessmeltsev, E. D. Bulushev. Method for measuring of microchannels formed by femtosecond laser on optically transporant materials	1
24. V. S. Ayrapetyan, S. G. Gubin, A. V. Makeev. Optical research surface roughnes sammunition cut off powder gases	140
25. S. A. Shoydin. Influence of hologram noises on formation of the restored signal.....	144
26. V. I. Nalivaiko, M. A. Ponomareva. Analysis of extreme region behaviourfor coupling of planar multilayered waveguide structures	149
27. D. G. Makarova. Correctional properties of single lens of different materials in a submillimetric range of lengths of waves.....	157
28. E. G. Kostsov, I. V. Knyazev. The frequency characteristics of new elements MEMS diffractive grating light valve	161
29. V. S. Efremov, D. G. Makarova. Influence of refractive index of liquid elements based on electrowetting to correctional properties	167
30. V. S. Sobolev, G. A. Kashcheeva, F. A. Zhuravel. Maximum likelihood estimates of optical signals parameters in view of the quantum nature of light and additive noise on example of laser dopler systems	171
31. V. S. Sobolev, A. M. Shcherbachenko, E. N. Utkin. Contactless methods of movement parameters measurement for diffuze scattering objects on the base of the probing laser radiation modulation.....	177
32. Yu. S. Batomunkuev, A. A. Dianova. Features of imaging formed by volume nonaxial HOEs	182
33. D. V. Chesnokov, V. V. Chesnokov, V. A. Reichert, S. L. Shergin, D. V. Kochkarev, D. M. Nikulin, M. V. Kuznetsov, I. O. Mihajlov. The experimental investigation of threshold energetic properties and rapidity of action thin film thermo-optical shutters in visible and IR diapason of light	190
34. V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, M. V. Kuznetsov, D. M. Nikulin, A. S. Syrneva, D. S. Mihajlova. The investigation of processes of aluminum and vanadium nanoparticle's layers creation on surface of substrate in vacuum.....	199
35. P. P. Dobrovolsky, G. I. Kosolapov, K. P. Shatunov, P. A. Aldokhin. Experimental researches of the parasitic background component of the signal in the cooled infrared photodetectors arrays	205
36. N. R. Rakhimov, D. D. Alijanov, V. A. Zhmud, O. K. Ushakov, P. V. Petrov. Research receiver of anomalous photovoltage for development of optoelectronic information-measuring systems	211

37. <i>D. M. Nikulin, E. V. Laptev, D. V. Kochkarev.</i> Laboratory techniques modifeing substrate surface layers metal nanoparticles	219
38. <i>V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, D. V. Kochkarev, M. V. Kuznetsov, S. L. Shergin, D. M. Nikulin.</i> The visualization of process of surface nanostructures creation.....	225
39. <i>V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov, D. V. Kochkarev, M. V. Kuznetsov, V. A. Raykhert, S. L. Shergin.</i> The experimental studies laser process of scattering reliefs forming on the surfaces of the high-melting dielectrics	230
40. <i>A. D. Nazarov, A. F. Serov, V. I. Terekhov.</i> Influence of structure of droplet phase of pulse aerosol on heat exchange	239
41. <i>V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov.</i> Opportunity of creation matrix radation detectors with optical antenna sensors	247

Научное издание

X Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

СибОптика-2014

Т. 1

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 22.04.2014. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 15,11. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.