

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»
(СГУГиТ)

XII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

СибОптика-2016

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2016

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

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

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем
и оплотехники СГУГиТ, Новосибирск
Д. В. Чесноков

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

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 111 с.

ISBN 978-5-87693-926-5 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-924-1

ISBN 978-5-87693-901-2

В сборнике опубликованы материалы XII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2016».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-926-5 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-924-1

ISBN 978-5-87693-901-2

© СГУГиТ, 2016

Сборник включен в систему РИНЦ.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ МИКРООБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Сергей Геннадиевич Баев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, главный специалист, тел. (383)333-24-91, e-mail: baev@iae.nsk.su

Виктор Павлович Бессмельцев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, зав. лабораторией лазерной графики, тел. (383)333-24-91, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Евгений Дмитриевич Булушев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-24-91, e-mail: e.d.bulushev@gmail.com

Николай Владимирович Голошевский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-24-91, e-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Евгений Петрович Горяев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер конструктор, тел. (383)333-24-91, e-mail: goryaev_e@mail.ru

Вадим Викторович Кастеров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер электроник, тел. (383)333-24-91, e-mail: kasterov@iae.nsk.su

Михаил Викторович Максимов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер конструктор, тел. (383)333-24-91, e-mail: mmaks@ngs.ru

Константин Константинович Смирнов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер программист, тел. (383)333-24-91, e-mail: kot@iae.nsk.su

Рассмотрены особенности создания аппаратно-программных средств для лазерной фемтосекундной микрообработки стекол и других хрупких диэлектрических материалов. Кратко представлены результаты работы по созданию лазерной прецизионной системы микрообработки таких материалов с интегрированными средствами контроля качества и математического обеспечения для оптимизации параметров обработки.

Ключевые слова: лазерная фемтосекундная микрообработка, автоматизированный контроль качества, конфокальные хроматические сенсоры, регрессионный анализ.

TECHNOLOGY FEATURES OF FEMTOSECOND LASER MICRO-MACHINING OPTICAL MATERIALS

Sergey G. Baev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, chief specialist, tel. (383)333-24-91, e-mail: baev@iae.nsk.su

Victor P. Bessmeltsev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, Ph. D., head of laboratory of the laser graphics, tel. (383)333-24-91, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Evgeny D. Bulushev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, junior research fellow, tel. (383)333-24-91, e-mail: e.d.bulushev@gmail.com

Nikolay V. Goloshevsky

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, junior research fellow, tel. (383)333-24-91, e-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Evgeny P. Goryaev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, leading constructor, tel. (383)333-24-91, e-mail: goryaev_e@mail.ru

Vadim V. Kasterov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, electronics engineer, tel. (383)333-24-91, e-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Mikhail V. Maksimov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, leading constructor, tel. (383)333-24-91, e-mail: mmaks@ngs.ru

Konstantin K. Smirnov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, leading software engineer, tel. (383)333-24-91, e-mail: kot@iae.nsk.su

Features of creation of hardware and software for laser femtosecond microprocessing of glasses and other fragile dielectric materials are considered. Results of work on creation of laser precision system of microprocessing of such materials with the integrated control devices of quality and software for optimization of parameters of processing are briefly presented.

Key words: femtosecond laser micro-machining, automated quality inspection, confocal chromatic sensors, regression analysis.

В течение многих десятков лет механическая гравировка резиста с последующим травлением была основным способом формирования оптических шкал, сеток и лимбов на поверхности деталей оптических приборов. Однако возросшие требования к точности, воспроизводимости и разрешению элементов подобных изделий требуют разработки новых методов обработки.

С появлением пико и затем фемтосекундных мощных промышленных лазеров казалось, что проблема обработки материалов, таких как стекло и керамика, с помощью лазерного формообразования имеет простое технологическое решение. Так как тепловые процессы, возникающие при фемтосекундной обработке, сведены к минимуму и теоретически исчезающе малы, то и проблемы формирования микросколов и трещин возникающие при обработке стекла и высокотемпературной керамики лазерами с наносекундной длительностью не должны присутствовать. Однако эксперименты, проведенные с реальными материалами и реальными режимами обработки, показали, что добиться микронной или субмикронной шероховатости края без микросколов и микротрещин совсем не просто.

Кроме того применение системы формообразования с использованием источников фемтосекундного излучения в настоящее время имеют ограниченное промышленное применение, что объясняется как высокой стоимостью оборудования, так и следующими технологическими факторами:

1. для прецизионной (ошибки обработки менее 1 мкм) микрообработки изделий размерами более $100 \times 100 \text{ мм}^2$ при высокой производительности (скорость перемещения луча до 1 м/с), требуется применение составной системы сканирования лазерного луча и, соответственно, создание специальных алгоритмов управления, аппаратного и программного обеспечения;

2. рельеф обрабатываемой поверхности обычно существенно больше, чем глубина фокуса ($\sim 5 \text{ мкм}$), что требует автоматической фокусировки лазерного излучения в зоне плоскости обработки и динамического определения размеров этой зоны;

3. при изготовлении больших серий изделий необходима разработка встроенной системы автоматизированного контроля качества;

4. для достижения высокой воспроизводимости при заданном качестве требуется внедрение и реализации методов для определения оптимальных режимов лазерной микрообработки.

С учетом указанных факторов разработан комплекс фемтосекундной лазерной микрообработки, включающий в себя трехканальную (1030, 515 и 343 нм) систему формирования и позиционирования сфокусированного лазерного пучка субмикронного размера на основе составной системы сканирования [1]. Для увеличения производительности обработки, фокусирование и развертка из-

лучения каналов основной и второй гармоник (1030, 515 нм) производится при помощи электромеханических блоков микросканирования на основе электромеханических сканеров и объективов плоского поля. Блоки микросканирования и фокусировки, а также датчик фокуса и модуль технического зрения с осветителем расположены на каретке механизма вертикального перемещения Z. Обрабатываемые детали располагаются на вакуумном рабочем столе механизма прецизионного двух координатного привода X,Y.

Управление комплексом осуществляется с компьютера, соединенного по каналу USB соединенный с контроллером. Контроллер устройства Scan control осуществляет управление всеми блоками системы.

Основные технические характеристики системы:

- | | |
|---|--------------|
| – максимальная скорость обработки, мм/с | до 1000 |
| – минимальная ширина гравированной линии, мкм | 3 |
| – минимальная дискретность позиционирования, нм | 50 |
| – максимальный размер зоны обработки, мм | 200x200x100. |

Для автоматизации серийного производства, измерения формируемых объектов и контроля качества лазерной микрообработки разработана система на основе сканирующего профилометра и программного обеспечения “Profilometer”. Комплекс включает конфокальные хроматические сенсоры, трёх-координатную систему позиционирования, высокоразрешающую систему технического зрения и обеспечивает следующие технические характеристики:

- область сканирования $200 \times 200 \text{ мм}^2$;
- максимальная толщина образца 50 мм;
- получение профиля объекта с погрешностями менее 100 нм со скоростью сканирования до 100 мм\сек головками C1 и C2:
 - C1: разрешение XY – 4 мкм, Z – 75 нм, диапазон по Z – 4 мм);
 - C2: разрешение XY – 0.9 мкм, Z – 5 нм, диапазон по Z – 130 мкм);
- получение изображений 10 Мп с разрешением 4 мкм;
- сшивка в изображение высокого разрешения ($> 1 \text{ Гп}$) с погрешностями менее 10 мкм.

При обработке данных профилометрии используются алгоритмы совмещения с САД-моделью [2] и выделения границ объектов на изображениях и профилограммах объектов [3]. Результаты работы алгоритмов приведены на рисунке.

Применение таких алгоритмов позволяет определить показатели качества изделий и провести их сравнение с требуемыми значениями по системе допусков (таблица).

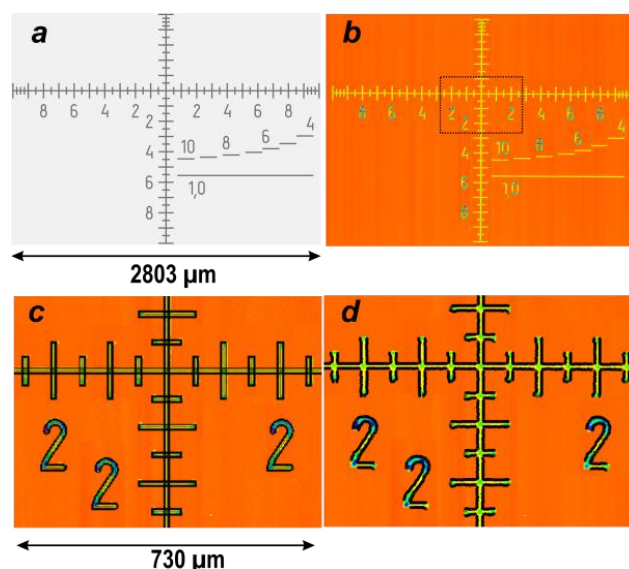


Рис. Контроль качества нанесения сетки на поверхность стекла фемтосекундным лазерным излучением:

а) изображение CAD-модели; б) карта высот, полученная в результате измерения поверхности стекла на сканирующем профилометре; в) результат автоматического совмещения с CAD-моделью (увеличенная область); д) выделение границ структурных элементов

При задании режимом лазерной микро- модификации предложено использовать экспериментальный подход на основе планирования экспериментов [4]– [7], состоящий из следующей последовательности этапов: проведение тестовых экспериментов при различных режимах обработки; измерение объектов: определение их размеров и показателей качества; построение математической модели зависимости показателей качества изделия от технологических параметров обработки; определение области оптимальных значений параметров на основе модели. На этапе построения модели используется регрессионный анализ и искусственные нейронные сети. Использование разработанных методов позволило автоматизировать процесс определения оптимальных параметров. Показана возможность оптимизации режимов высокоскоростной фемтосекундной лазерной микрообработки стекла с помощью разработанных алгоритмов и регрессионного анализа данных[9]. Полученная по тестовым данным регрессионная модель позволила существенно ускорить процесс определения режимов лазерной микрообработки стекла ВК7 для получения микроканалов с глубиной в диапазоне 1-30 мкм и имеет среднюю погрешность, не превышающую 10%. Установлены режимы обработки стекла ВК7, обеспечивающие высокие показатели качества изделий (шероховатость дна менее 0,5 мкм, минимальные сколы) при высокой производительности обработки (более 0,3 мм³/мин).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами. *Автометрия* №1, 2007, стр. 116-126.
2. В. П. Бессмельцев and Е. Д. Булушев, 'Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки', *Компьютерная оптика*, vol. 38, no. 2, pp. 343–350, 2014.
3. V. P. Bessmeltsev, E. D. Bulushev, and N. V. Goloshevsky, 'Method for Localizing and Measuring Structures Formed under Laser Microprocessing', *Pattern Recognit. Image Anal. Adv. Math. Theory Appl.*, vol. 21, no. 3, pp. 373–376, 2011.
4. L. Orazi, G. Cuccolini, A. Fortunato, and G. Tani, 'An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 46, no. 1, pp. 163–171, May 2009.
5. A. Soveja, E. Cicala, D. Grevey, and J. M. Jouvard, 'Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach', *Opt. Lasers Eng.*, vol. 46, no. 9, pp. 671–678, 2008.
6. C. K. Desai and A. Shaikh, 'Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 9–12, pp. 865–882, Oct. 2011.
7. J. Ciurana, G. Arias, and T. Ozel, 'Neural Network Modeling and Particle Swarm Optimization (PSO) of Process Parameters in Pulsed Laser Micromachining of Hardened AISI H13 Steel', *Mater. Manuf. Process.*, vol. 24, no. 3, pp. 358–368, Feb. 2009.
8. S. K. Dhara, a. S. Kuar, and S. Mitra, 'An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 1–2, pp. 39–46, Sep. 2007.
9. E. D. Bulushev, V. P. Bessmeltsev, A. V. Dostovalov, N. V. Goloshevsky, and A. A. Wolf, 'High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser', *Opt. Lasers Eng.*, vol. 79, pp. 39–47, 2016.

© С. Г. Баев, В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев, Н. В. Голошевский,
Е. П. Горяев, В. В. Кастеров, М. В. Максимов, К. К. Смирнов, 2016

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГРАДИЕНТНО-АКТИВИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ
С КОНЦЕНТРАЦИОННЫМИ ПРОФИЛЯМИ ИОНОВ Yb^{3+} И Er^{3+}**

Елена Валерьевна Строганова

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

Валерий Викторович Галуцкий

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптоэлектроники, тел. (918)419-32-95, e-mail: galutskiy17v@mail.ru

Николай Николаевич Налбантов

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, аспирант кафедры оптоэлектроники, тел. (929)854-39-72, e-mail: nikovv92@mail.ru

Алексей Сергеевич Козин

Кубанский государственный университет, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, аспирант кафедры оптоэлектроники, тел. (918)291-97-77, e-mail: krogot@mail.ru

Впервые исследованы люминесцентные свойства градиентно активированных кристаллов ниобата лития с концентрационными профилями оптических центров ионов иттербия и эрбия. Показано, что спектрально-люминесцентные свойства градиентных кристаллов коррелируются с концентрационными профилями оптических центров доноров Yb^{3+} и акцепторов Er^{3+} .

Ключевые слова: градиентно-активированные кристаллы, концентрационные профили оптических центров, спектрально-люминесцентные свойства.

**SPECTRAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF THE GRADIENT
ACTIVATED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS WITH CONCENTRATION PROFILES
OF IONS Yb^{3+} AND Er^{3+}**

Elena V. Stroganova

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropol st., Ph. D., associate Professor at the Department of optoelectronics, tel. (928)423-12-35, e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Valeriy V. Galucci

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropol st., Ph. D., associate Professor at the Department of optoelectronics, tel. (918)419-32-95, e-mail: galutskiy17v@mail.ru

Nikolai N. Nalbantov

Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropol st., postgraduate student of the Department of optoelectronics, tel. (929)854-39-72, e-mail: nikovv92@mail.ru

Luminescent properties of lithium niobate crystals with non-uniform distribution of ytterbium and erbium ions were studied for the first time. Correlation between shapes of profiles of dopants' concentrations, and spectral and kinetic properties of infrared and green luminescence was discovered.

Key words: non-uniformly doped crystals, concentration profiles of optical centers, spectral and kinetic properties.

Лазерные кристаллы ниобата лития с неоднородным распределением ионов эрбия и иттербия [1], высокая генерационная эффективность которых была описана в работах [2-3], отличаются развитым спектром энергетических состояний, что позволяет наблюдать лазерную генерацию как в ИК-диапазоне (1,5 мкм), так и в видимой области (зеленые и красные ап-конверсионные линии). Данная особенность открывает перспективы создания многоканальных лазерных систем на базе одного кристалла. Однако эффективность совместной генерации вышеперечисленных спектральных компонент недостаточно изучена для целей оптимизации энергетических параметров системы.

На рис. 1 представлены концентрационные профили оптических центров Yb и Er (рис. 1, а) градиентно-активированного кристалла LiNbO_3 , полученного в КубГУ (рис. 1, б). Изменение спектров поглощения и излучения ионов эрбия в различных точках кристалла.

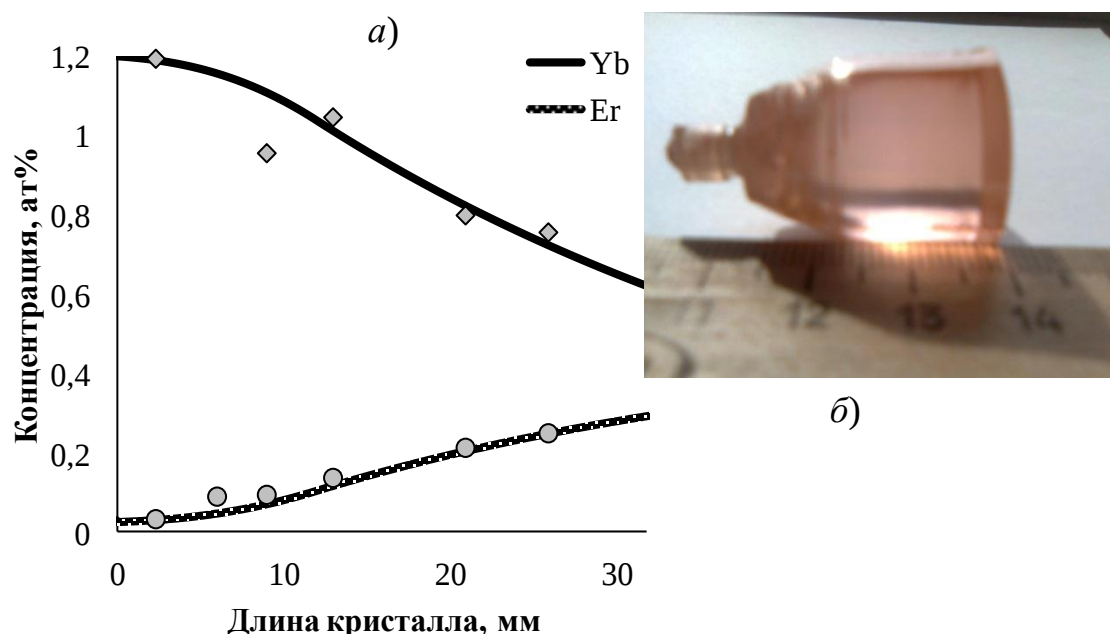


Рис. 1. Концентрационные профили оптических центров Yb и Er (а) в кристалле LiNbO_3 (рис. 1, б): маркерами на рис. 1, а отмечены интегральные коэффициенты поглощения оптических центров, измеренные в различных координатах кристалла

На рис. 2 представлены спектры излучения ионов эрбия после накачки излучением полупроводникового лазерного диода ATC SEMICONDUCTOR DEVICES LDD-10 с длиной волны генерации на 980 нм в непрерывном режиме работы, измеренные в различных координатах исследуемого кристаллического образца в спектральных областях 520-580 нм (ап-конверсия) (рис. 2, а) и 1400-1700 нм (рис. 2, б).

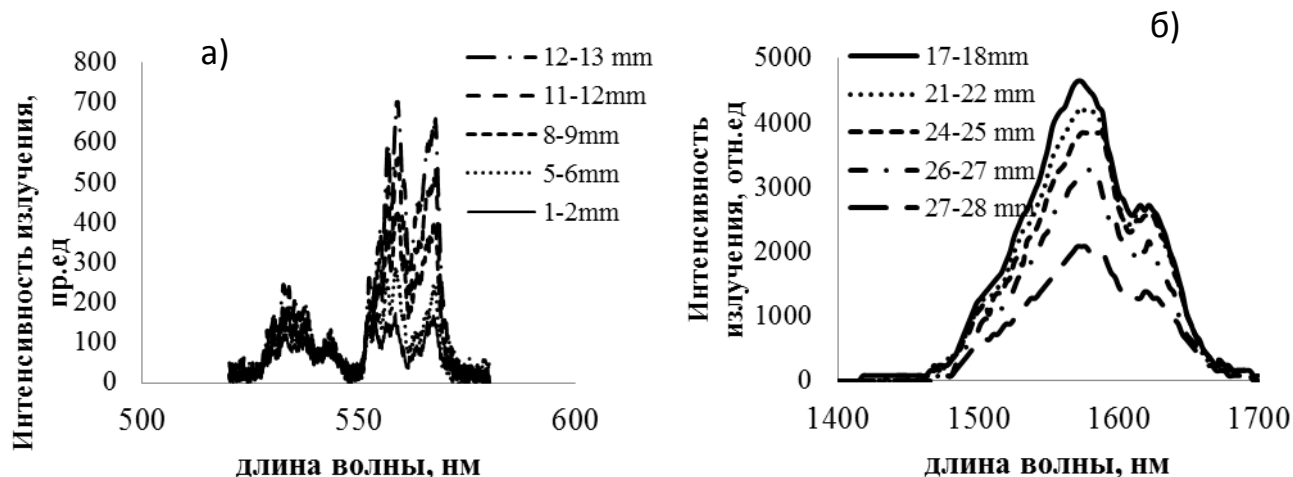


Рис. 2. Спектры излучения ионов эрбия, измеренные в различных координатах кристалла:

- а) изменение интенсивности ап-конверсии Er в спектральной области 520-580 нм;
 б) изменение интенсивности Er в области 1400-1700 нм

Как видно из представленных исследований, интенсивность излучение процесса ап-конверсии Er^{3+} увеличивается с ростом концентрации оптических центров. Однако, интенсивность излучения в области 1,5 мкм с ростом концентрации оптических центров уменьшается.

На рис. 3 представлена корреляция процессов поглощения и излучения оптических центров с концентрационными профилями. Исследования показали, что излучение в области 1,5 мкм ионов-акцепторов Er^{3+} хорошо коррелируется с концентрационным профилем ионов-доноров Yb^{3+} . Зависимость интенсивности 1,5 мкм излучения ионов Er^{3+} от концентрации доноров Yb^{3+} может быть объяснено с позиции прямого и обратного безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения в системе взаимодействия доноров и акцепторов. На рис. 4 представлена кинетика люминесценции $\text{LiNbO}_3:\text{Yb},\text{Er}$, измеренная после импульса основной гармоники $\text{YAG}:\text{Nd}$ лазера на длине волны 1620 нм. Неэкспоненциальный вид кривой кинетики затухания подтверждает наличие прямого и обратного процесса переноса энергии электронного возбуждения между донорами Yb^{3+} и акцепторами Er^{3+} .

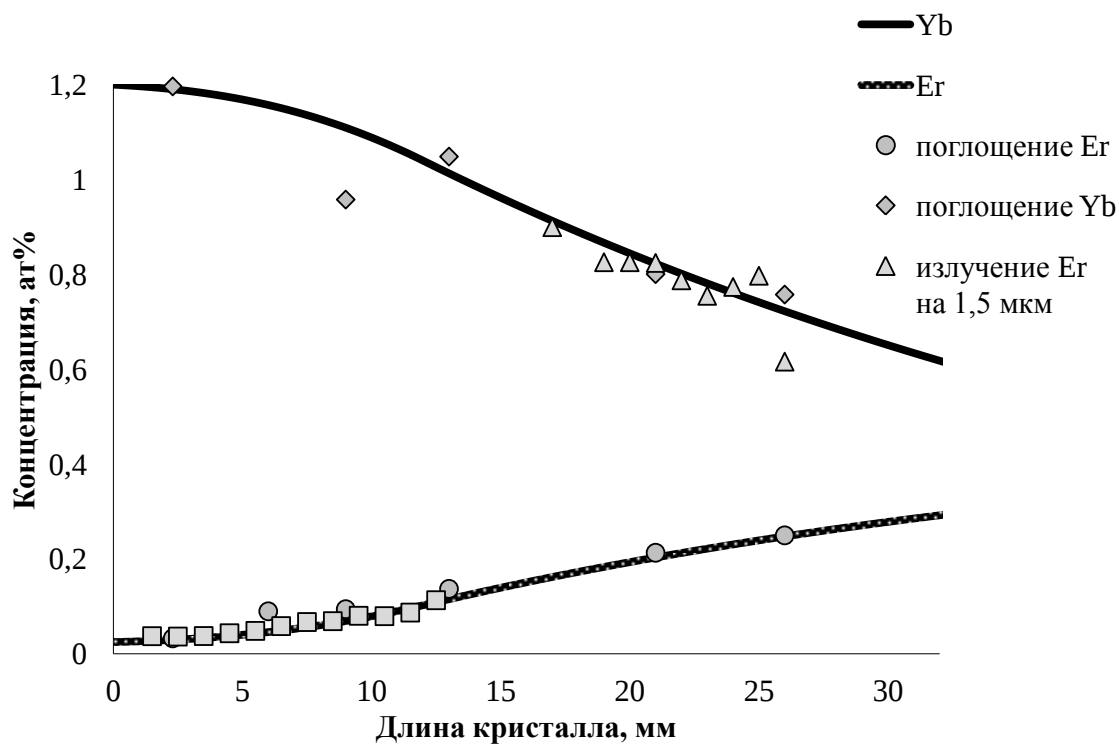


Рис. 3. Корреляция процессов поглощения и излучения оптических центров Er^{3+} и Yb^{3+} с концентрационными профилями

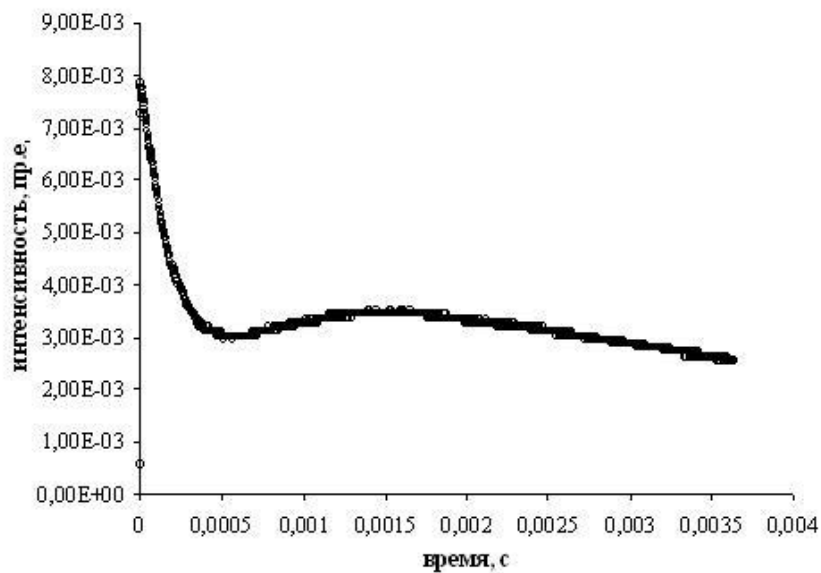


Рис. 4. Кинетика затухания люминесценции кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$, измеренная после возбуждения импульсом основной гармоники лазера YAG:Nd на длине волны 1620 нм

Была проведена оценка эффективности излучения ап-конверсии ионов Er^{3+} в спектральной области 520-580 нм. Для решения задачи использовали измеритель мощности THOR LABS S370C, с чувствительностью 3,87 мВ/Ватт. На рис. 5 представлен спектр интенсивности оптического излучения, которое по эффективности составляет порядка 10 % от поглощенной энергии лазерного диода, с длиной волны генерации 980 нм, кристаллом $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$.

Теоретические исследования, проведенные по результатам оценки квантовой эффективности процесса ап-конверсии для зеленой спектральной линии, полностью соответствуют экспериментальным данным и составляют величину порядка 12 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований получено, что величина интенсивности 1,5 мкм излучения в градиентно-активированных кристаллах коррелируется с концентрационным профилем доноров Yb^{3+} , что объясняется процессами прямого и обратного переноса энергии электронного возбуждения между примесными оптическими центрами. Проведены теоретические и экспериментальные исследования квантовой эффективности ап-конверсии в зеленой спектральной области ионов Er^{3+} , которая составляет порядка 10-12%.

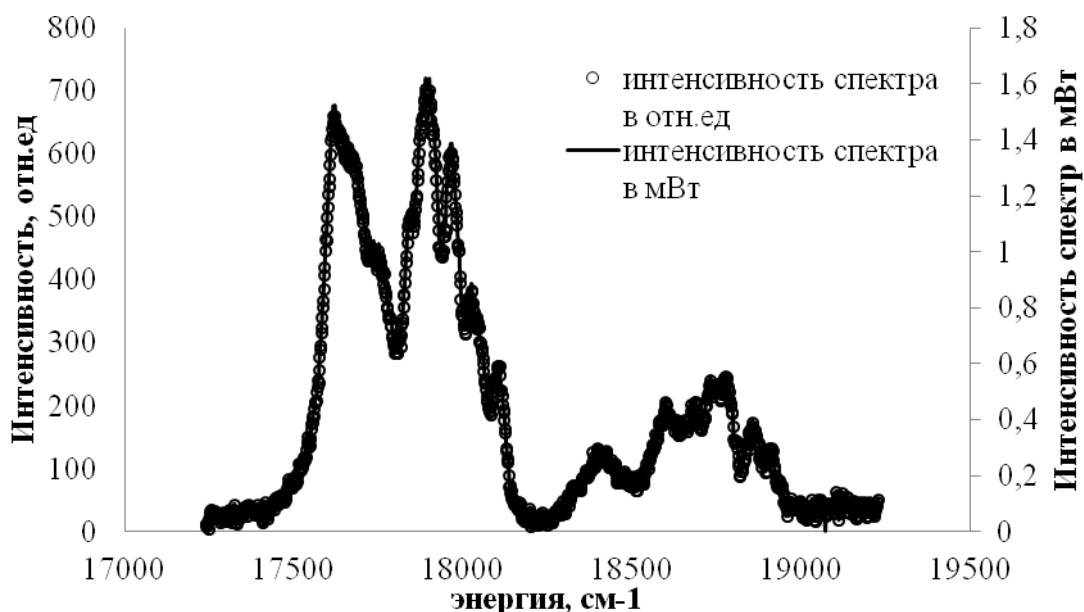


Рис. 5. Оптическая мощность излучения процесса ап-конверсии ионов Er в кристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$

Работа выполнена в рамках государственного задания 2014/75 НИР №1291 (14/200-г).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging / E. V. Stroganova, V. V. Galutskiy, M. I. Vatlina // Journal of Crystal Growth. – 2009.- V. 311. – №4. – P. 1190-1194.
2. Увеличение эффективности накачки при использовании градиентно-сенсibilизированных лазерных кристаллов / Е. В. Строганова, В. В. Галуцкий, Д. С. Ткачев и др. // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117. - №6. – С. 1012-1017.
3. Особенности преобразования частоты в градиентных кристаллах PPLN / Е. В. Строганова, В. В. Галуцкий, С. А. Шмаргилов, Н. А. Яковенко // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №1. – С. 30-33.

© Е. В. Строганова, В. В. Галуцкий, Н. Н. Налбантов, А. С. Козин, 2016

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО МИКРОРЕЛЬЕФА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ГИБРИДНОГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА «ГИБРИМЕР-ТАТС»

Николай Геннадьевич МIRONNIKOV

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер, аспирант, тел. (923)777-59-58, e-mail: mironnikov.nikolay@gmail.com

Виктор Павлович Корольков

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

Дмитрий Игоревич Деревянко

Институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, инженер, аспирант лаборатории органических светочувствительных материалов, тел. (952)927-17-32, e-mail: dmitryderevianko@gmail.com

Владимир Владимирович Шелковников

Институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 9, зав. лабораторией органических светочувствительных материалов, тел. (952)927-17-32, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

Исследованы оптические методы формирования многоуровневого микрорельефа в тонких пленках фотополимеризованного гибридного материала «Гибример-ТАТС», разработанного в НИОХ СО РАН на основе акрилатных и тиол-силоксановых олигомеров.

Ключевые слова: гибридный фотополимер, лазерная литография, контактная печать, многоуровневые дифракционные оптические элементы, микрооптика.

OPTICAL FABRICATION METHODS OF MULTILEVEL RELIEF IN THIN FILMS OF HYBRID PHOTOPOLYMERIC MATERIAL «HYBRIMER-TATC»

Nikolay G. Mironnikov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, MSc, Physical department, tel. (923)777-59-58, e-mail: mironnikov.nikolay@gmail.com

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, senior researcher of laboratory of diffractive optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: victork@iae.nsk.su

Dmitriy I. Derevyanko

Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 9 Akademik Lavrentiev Prospect, engineer, Laboratory of Organic Lightsensitive Materials, tel. (952)927-17-32, e-mail: dmitryderevianko@gmail.com

Vladimir V. Shelkovnikov

Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 9 Akademik Lavrentiev Prospect, laboratory head, Laboratory of Organic Lightsensitive Materials, tel. (952)927-17-32, e-mail: vice@nioch.nsc.ru

Optical methods for fabrication of multilevel relief in thin films of hybrid photopolymeric material «Hybrimer-TATC», synthesized in Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS on base of acrylate and thiol-siloxane oligomers.

Key words: hybrid photopolymer, laser lithography, contact printing, multilevel diffractive optical elements, microoptics.

Дальнейшее развитие оптического приборостроения в немалой степени связано с использованием многоуровневых дифракционных и микрооптических элементов. Фотополимерные гибридные органически-неорганические композиции активно исследуются в последние два десятилетия не только как репликационный материал для тиражирования оптических микроструктурированных компонентов [1], но и как рельефообразующий материал для лазерных и фотолитографических технологий [2, 3]. Достоинствами таких материалов является повышенная прочность по сравнению с органическими фоторезистами, оптическая прозрачность, химическая устойчивость к растворам щелочей и кислот, а также более широкий температурный диапазон устойчивости фотоотвержденного материала в сравнении с обычными полимерами. Наиболее известными и широко используемыми гибридными материалами является серия гибридных полимеров ORMOCER[®], разработанных Фраунгоферовским институтом исследования силикатов (ISC) [1], полимеры данной серии широко используются для формирования на поверхности стеклянных подложек достаточно прочных микроструктурированных оптических элементов экономически эффективной репликацией исходного рельефа кварцевой, кремниевой или металлической матрицы. Так же разработаны варианты процесса формирования бинарных (с двумя уровнями рельефа) микроструктур на материалах серии ORMOCER[®] путем прямой лазерной записи или фотолитографического экспонирования через фотошаблон.

В работах [4, 5] проведен синтез и исследованы термомеханические, оптические и термооптические свойства гибридного фотополимерного материала (ГФМ) на основе тетракрилатного мономера (ТА) и тиол-силоксанового (ТС) олигомера, использованных в качестве структурных блоков ГФМ. Кроме указанных олигомеров, в качестве инициатора фотополимеризации в композицию добавляется гексафторфосфат 2,4-диэтил-9-оксо-10-(4-гептилоксифенил)-9Н-тио-ксантения [6]. Было показано, что при фотополимеризации гибридной композиции образуются сшитые жесткие пленки гибридного материала, обладающие высокой термической устойчивостью до 300 °С, как в инертной, так и в окислительной атмосферах. Измерение показателя преломления ГФМ ($n=1,521$) показало близость его коэффициента преломления к стеклам марки Крон ($n=1,517$), благодаря чему можно устранить паразитное отражение от интерфейса стекло-полимер при использовании стеклянных подложек, как основы

для формирования микрорельефа в тонком слое фотополимера. Таким образом, можно получать элементы, механическая стабильность формы которых определяется толстой стеклянной подложкой и устраняется влияние его усадки на формируемую микроструктуру. Это делает чрезвычайно важным дальнейшее исследование возможностей применения этого фотополимера для различных оптических технологий формирования микроструктур. Целью данной работы является исследование формирования многоуровневых дифракционных структур в гибридной фотополимерной композиции (ГФК) на основе указанных олигомеров (далее обозначенной как ГФК «Гибример-ТАТС»), нанесенных на стеклянную подложку при экспонировании на установках сканирующей лазерной литографии импульсным излучением с длиной волны 355 и непрерывным 405 нм.

Эксперименты по экспонированию тонких слоев ГФМ «Гибример-ТАТС» проводилось на лазерном генераторе микроизображений (ЛГМ). Диаметр записывающего пучка в фокусе составил 3-4 мкм. В ЛГМ установлен импульсный волоконный лазер с модуляцией добротности резонатора со следующими параметрами: длина волны излучения лазера 355 нм, частота повторения импульсов 1 – 3 кГц, длительность импульсов – 50 нс, стабильность мощности $< \pm 3\%$, максимальная выходная средняя мощность ~ 7 мВт. Мощность излучения варьировалась с помощью моторизованного аттенюатора переменной плотности в диапазоне 1:100. Включение экспонирующего пучка в заданном диапазоне координат осуществлялось с помощью механического затвора. Сканирование сфокусированного пучка можно производить с помощью двухкоординатного моторизованного стола со скоростью перемещения 10-100 мм/с.

Изготовление фотополимерных структур для определения характеристических кривых включало следующие этапы:

I. Нанесение ГФМ методом центрифугирования. Слой толщиной 1 мкм наносили на стеклянную подложку размером $2,5 \times 2,5$ см² при скорости вращения 6000 об/с, а слой толщиной 4 мкм – при скорости 3000 об/с. Ускорение - 300 об/с², время нанесения - 40 сек. Полученную пленку подвергают сушке в печи при температуре 50°C, 1 мин.

II. Запись участков с заданным уровнем экспозиции с помощью ЛГМ.

III. Проявление и сушка структур. В качестве проявителя в работе был использован этиловый эфир левулиновой кислоты. Было выявлено, что для слоя толщиной 1 мкм достаточно двух секунд для проявления, а для 4 мкм – 6 секунд; при проявлении более 30 секунд начинает происходить размывание отвержденного ГФМ. После проявления остатки растворителя удаляются сжатым воздухом. Далее образец помещается в печь, где происходит сушка при температуре 95°C в течении 10 мин.

Высота рельефа фотополимеризованных участков измерялась с помощью интерферометра белого света (WLI, Breitmeyer GmbH).

Лазерная запись микрорельефа в ГФМ. На рис. 1, а показаны полученные на ЛГМ характеристические кривые для ГФМ с соотношением ТА:ТС 14:1 для пленок толщиной 1 и 4 мкм при экспонировании на длине волны 355 нм импульсным излучением с длительностью импульсов – 50 нс.

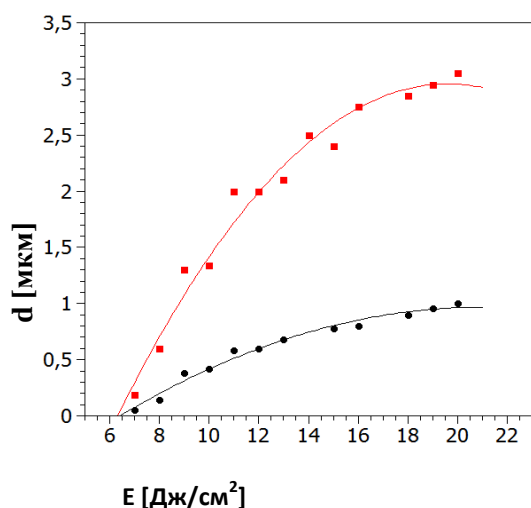


Рис. 1. Характеристические кривые ГФМ (ТА:ТС 14:1)
а – черный – пленок толщиной 1 мкм, красный – для пленок толщиной 4 мкм

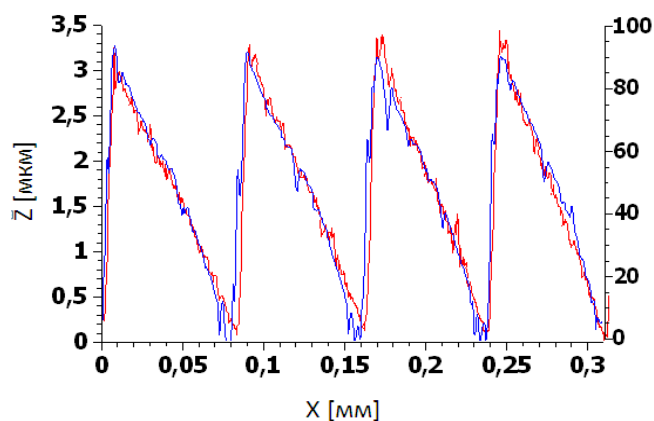


Рис. 2. Профиль поверхности дифракционной структуры (синий график, ось слева) и нормированный коэффициент пропускания (красный, ось справа) полутонного фотошаблона

Как видно из графика на рис. 1, где представлены характеристические кривые, формы кривых очень близки для толщины исходной пленки 1 и 4 мкм. Диапазон изменения экспозиции для получения рельефа переменной глубины составляет примерно 1:3, что вполне достаточно для формирования многоуровневого микрорельефа дифракционных оптических и микрооптических элементов.

На рис. 2 показана профилограмма дифракционной структуры, полученной экспонированием импульсным лазерным излучением на длине 355 нм через полутонный фотошаблон из LDW-стекла [7]. Экспонирование через маску производилось на ЛГМ расфокусированным лазерным пучком. Период дифракционных зон равен примерно 80 мкм. Из рис. 2 видно, что форма рельефа решетки практически точно соответствует профилю пропускания маски.

Необходимо отметить, что диапазон экспозиции для получения рельефа, показанного на рис. 2, составил 7-20 Дж/см², что в несколько раз превышает эффективную дозу для фоторезистов и аналогичных фотополимерных материалов ORMOCER. Пониженная чувствительность ГФК в приведенных условиях записи на наш взгляд объясняется двумя факторами. Коэффициент экстинкции фотоинициатора в диапазоне 350-410 нм мал, порядка 1000 М⁻¹см⁻¹, а также ингибирование кислородом свободных радикалов, образованных в результате распада молекул фотоинициатора, в тонких пленках толщиной порядка 1 мкм значительное [8]. Кроме того, режим импульсной записи по сравнению с режимом непрерывной записи снижает чувствительность материала, работающего на механизме свободно-радикальной фотополимеризации, из-за протекания темновых реакций рекомбинации радикалов и нарушения закона взаимозаместимости. Последнее подтверждается измерением фоточувствительности ГФМ

на длине волны 405 нм, на которой была проведена запись решеток на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300IAE [9] путем кругового сканирования лазерного пучка с непрерывным излучением, сфокусированного в пятно диаметром 0.8 мкм. При плотности энергии непрерывного излучения 1.6 Дж/см² были сформированы решетки с глубиной 1 мкм. Таким образом, применение непрерывного лазерного излучения позволяет поднять чувствительность на порядок величины, несмотря на то, что поглощение исходного ГФМ на 405 нм ниже, чем на 355 нм.

Исследование прямой лазерной записи на материале «Гибример-ТАТС» продемонстрировало возможность формирования многоуровневого 3D рельефа записи в диапазоне изменения экспозиции 1:3 импульсным излучением на длине волны 355 нм. Определена фоточувствительность и форма характеристических кривых ГФМ при прямой импульсной лазерной записи на 355 нм и непрерывной записи 405 нм. Показано увеличение чувствительности материала на порядок величина с 16 Дж/см² до 1,6 Дж/см² при использовании непрерывного лазерного излучения. Полученный ГФМ может быть использован как негативный рельефообразующий фотоматериал с переменной полутоновой величиной рельефа для фотолитографических и лазерных технологий изготовления дифракционных и микрооптических элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://www.ormocere.de/en.html>
2. Kärkkäinen A.H.O., Rantala J.T., Maaninen A., Jabbour G.E., Descour M.R. Siloxane-based hybrid glass materials for binary and grayscale mask photoimaging // *Advanced Materials*. 2002. v.14, N7, 535-540.
3. Bae B.S. High photosensitive sol-gel hybrid materials for direct photo-imprinting of micro-optics. // *Journal Sol-Gel Science and Technology*. 2004. 31, P. 309-315.
4. Shelkovnikov V.V., Ektova L.V., Orlova N.A., Ogneva L.N., Derevyanko D.I., Shundrina I.K., Salnikov G.E., Yanshole L.V. Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers. // *Journal of Materials Science*. 2015. 50(23). 2015, p. 7544-7556.
5. . Н.Г. Миронников, В.П. Корольков, Д.И. Деревянко, В.В. Шелковников⁴, О.Б. Витрик, А.Ю. Жиженко, «Исследование оптических и термооптических характеристик гибридного фотополимерного материала на основе тиол-силоксановых и акрилатных олигомеров», *Автометрия*, N3, 2016 (принято в печать).
6. Loskutov V. A., Shelkovnikov V. V. // *Russ. J. Org. Chem.* 2006. V. 42. № 2. С. 313.
7. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол // *Автометрия*. 1998. №6. С.27-37.
8. Frigione M., Esposito C. Corcione Rheological and Kinetic Characterization of UV Photopolymerizable Formulations as a Function of the Boehmite Nanoparticle Content // *The Open Materials Science Journal*, 2012, 6, P. 68-76.
9. Korolkov V.P., Poleshchuk A. G. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements // *Proc. SPIE*. 2007. V.6732. 67320X.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МОНОКРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

Алексей Владимирович Сосунов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева 15, аспирант кафедры физики твердого тела, тел. (342)239-64-10, e-mail: alexeisosunov@gmail.com

Роман Сергеевич Пономарев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева 15, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела, тел. (342)239-64-10, e-mail: rsponomarev@psu.ru

Впервые исследованы механические свойства приповерхностного слоя монокристалла ниобата лития конгруэнтного состава X-среза производства Sipat после излома. Методом электронной микроскопии показано, что структура приповерхностного слоя (до 20 мкм) значительно отличается от структуры объема ниобата лития и имеет четкую границу раздела. Глубина внедрения алмазного индентора при заданной нагрузке 2 мкН вдоль поперечного сечения образца после излома значительно увеличивается внутри и на границе приповерхностного слоя, что свидетельствует об увеличенной плотности дислокаций в данной области.

Ключевые слова: ниобат лития, приповерхностный слой, плотность дислокаций.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE SUBSURFACE LAYER OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTAL

Aleksey V. Sosunov

Perm State National Research University, 614990, Russia, Perm, 15 Bukirev st., Ph. D. student of the Department of Solid State Physics, tel. (342)239-64-10, e-mail: alexeisosunov@gmail.com

Roman S. Ponomarev

Perm State National Research University, 614990, Russia, Perm, 15 Bukirev st., Ph. D., assistant of the Department of Solid State Physics, tel. (342)239-64-10, e-mail: rsponomarev@psu.ru

Mechanical properties were studied for the first time of the subsurface layer of a single crystal of lithium niobate congruent X-cut purchase Sipat after the fracture. By electron microscopy shows that the structure of the subsurface layer (till 20 microns) is significantly different from volume structure of lithium niobate and has a clear line. Penetration depth of diamond indenter for a given load of 2 μ N along the cross section of the sample increases considerably after fracture at the line and within the subsurface layer, which testifies to an increase in the dislocation density.

Key words: lithium niobate, subsurface layer, dislocation density.

Монокристалл ниобата лития (НЛ) широко используется в качестве материала подложки для различных устройств, таких как электро-оптические модуляторы [1], акустооптические фильтры, нелинейно-оптические устройства преобразования частоты, лазеры [2], и т.д. Широкое применение НЛ в оптических приложениях обусловлено набором его уникальных свойств, таких как чрезвы-

чайно высокая температура Кюри, химическая и механическая стабильность, широкий диапазон прозрачности, высокие электрооптические коэффициенты и возможность микроструктурирования (поллинг).

Важным вопросом при изготовлении оптических устройств на основе пластин НЛ является их окончательное качество поверхности, т.к. большинство структур создаётся именно в приповерхностном слое глубиной не более 10 мкм. Процесс шлифовки и полировки включает в себя различные механические и химические обработки кристалла. Авторы [3] показали, что поверхность кристаллов может иметь множество царапин и дефектов не только после механической, но даже после химической обработки. Ранее сообщалось о наличии царапин на поверхности НЛ, структурных модификаций в слое глубиной до 15 мкм [4-6]. Химическая и механическая обработка кристаллов приводит к появлению поверхностного напряжения, а также увеличению плотности дислокаций, которое необходимо контролировать или сводить к минимуму.

НЛ находится в переходной зоне между мягкими и хрупкими твердыми телами по своим механическим свойствам. Из того, что было сказано ранее о введении структурных изменений после традиционной полировки пластин НЛ ясно, что он является трудным материалом для машинной обработки. Тем не менее, высокое качество поверхности (шероховатость) и приповерхностного слоя без дополнительных повреждений являются строго необходимыми для использования НЛ в высокопроизводительных, высокостабильных фотонных устройствах. Изучение механических свойств НЛ является необходимым условием для успешного изготовления и эксплуатации высокоэффективных устройств. Несмотря на свою важность, в настоящее время есть всего несколько публикаций по данной тематике [7-9]. В данной работе продемонстрировано существенное увеличение плотности дислокаций в приповерхностном слое пластин НЛ.

На рис. 1 представлено изображение структуры поперечного сечения образца НЛ конгруэнтного состава X-среза производства Sipat после излома, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400N при ускоряющем напряжении 20 кВ. Видно, что структура приповерхностного слоя (до 20 мкм) значительно отличается от структуры остального НЛ. При переходе приповерхностный слой – “глубинный слой” имеется четкая граница. Интуитивно понятно, что в области приповерхностного слоя должна быть увеличена плотность дефектов структуры.

Известно, что механические свойства материала зависят от плотности дислокаций. На рис. 2. представлен график зависимости глубины внедрения алмазного индентора от расстояния до границы образца при заданной нагрузке 2 мкН. В области приповерхностного слоя глубина внедрения в среднем увеличивается в 5 раз по сравнению с “глубинным слоем”. Также наблюдается четкий скачок увеличения глубины проникновения зонда на границе приповерхностный слой – “глубинный слой”. Полученные результаты хорошо согласуются друг с другом и подтверждают существенное увеличение плотности дислокаций в приповерхностном слое НЛ после традиционной обработки.

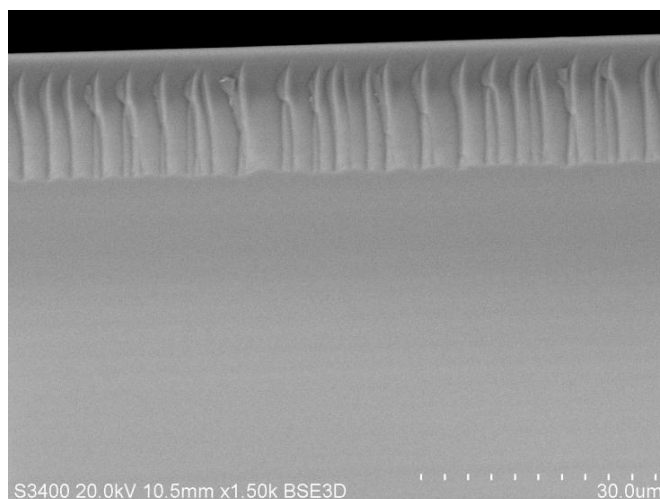


Рис. 1. Поперечное сечение НЛ после излома

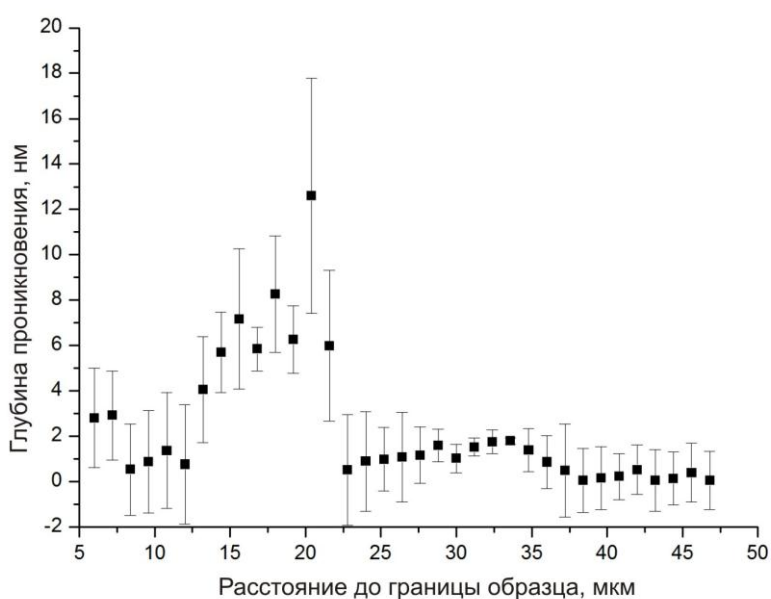


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения индентора от расстояния до границы образца вдоль поперечного сечения, представленного на рис. 1

Таким образом, при производстве интегрально-оптических схем на базе НЛ необходимо учитывать влияние структуры приповерхностного слоя. В настоящее время нет ответа на вопросы связанные со стабильностью оптических характеристик модуляторов, дрейфом показателя преломления, как в короткий временной интервал, так и длительный, проблемы связанные с процессом протекания протонного обмена при создании оптических волноводов и т.д.

Полученные результаты могут дать ответ на эти вопросы, а контроль и минимизация плотности дефектов в приповерхностной области позволит избавиться от указанных нежелательных явлений или существенно их минимизировать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wooten E., Kissa K., Yi-Yan A. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. J. Sel. Top. Quant. Electron. 2000. Vol. 6. № 1. P. 69-82
2. Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals. Phys. Stat. Sol. 2004. Vol. 201. № 2. P. 253-283.
3. Zhong Z. W. Recent Advanced in Polishing of Advanced Materials. Materials Manufacturing Processing. 2008. Vol. 23. P. 449-456.
4. Caccavale F., Morbiato A., Properzi M., Galinetto P., Marinone M., Samoggia G. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2004. Vol. 67. P. 5451.
5. Galinetto P., Marinone M., Grando D., Samoggia G., Caccavale F., Morbiato A., Musolino M. Micro-Raman analysis on LiNbO₃ substrates and surfaces: Compositional homogeneity and effects of etching and polishing processes on structural properties. Optical Laser Engineering. 2007. Vol. 45. P. 380-384.
6. Кострицкий С.М., Новомлинцев А.В. Композиционная неоднородность приповерхностных нарушенных слоев в монокристаллах LiNbO₃. ФТТ. 1996. Т. 38. № 5. С. 1614–1616.
7. Basu S., Zhou A., Barsoum W. Reversible dislocation motion under contact loading in LiNbO₃ single crystal. J. Mater. Res. 2008. Vol. 23. № 5. P. 1334-1338.
8. Zhang Z., Yang S., Xu C., Bo Wang, Duan N. Deformation and stress at pop-in of lithium niobate induced by nanoindentation. Scripta Mater. 2014. Vol. 77. P. 56-59.
9. Bhagavat S., Kao I. Nanoindentation of lithium niobate: hardness anisotropy and pop-in phenomenon. Mater. Science Engineer. A. 2005. Vol. 393. P. 327-331.

© А. В. Сосунов, Р. С. Пономарев, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МОНОХРОМАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, ДИФРАГИРОВАВШЕЙ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБКАХ

Станислав Олегович Алебастров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, студент

Юрий Цыдыпович Батомункеев

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

Александра Алексеевна Дианова

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

Николай Николаевич Достовалов

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

Павел Сергеевич Орлов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, студент

Экспериментально исследуется пространственное распределение амплитуды колебаний акустической монохроматической волны, дифрагировавшей на цилиндрических трубках.

Ключевые слова: акустическая волна, элемент, дифракционный элемент.

RESEARCH OF ACOUSTIC MONOCHROMATIC WAVE DIFFRACTED BY THE CYLINDRICAL TUBES

Stanislav O. Alebastrov

Siberian State University of Geosystems and Technology, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, student

Yury Ts. Batomunkuev

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

Alexandra A. Dianova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., postgraduate, student, e-mail: opttechnic@mail.ru

Nikolai N. Dostovalov

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

The spatial distribution of the amplitude of the acoustic oscillations of a monochromatic wave diffracted by cylindrical tubes is experimentally investigated.

Key words: holographic optical elements, higher order aberrations.

В настоящее время уделяется большое внимание изучению характеристик дифракционных элементов, имеющих микронные размеры. Как правило, они представляют собой зонные пластинки с относительно малым количеством зон Френеля [1]. Столь малые размеры этих элементов приводят к необходимости разработки и использования микромеханических и микроэлектронных измерительных датчиков для исследования их оптических характеристик. Кроме этого существует проблема применимости для расчета изображающих свойств и aberrаций таких элементов известных методов, как метод характеристической функции или лучевой метод [2]. В то же время в качестве физических аналогий можно рассмотреть акустические дифракционные элементы с подобными дифракционными структурами и исследовать пространственное распределение амплитуды колебаний акустического поля дифрагировавшей ультразвуковой волны. Именно это и являлось целью работы.

В работе были рассчитаны и изготовлены тонкостенные цилиндрические трубки с разными радиусами и толщиной. Диаметры цилиндрических трубок равны диаметрам четных зон Френеля, а длины трубок рассчитывались по формуле

$$L_m = 2[1 - (1 - 1/(m+1))^{1/2}]a,$$

где L_m – длина трубок, m – номер четных зон Френеля, a – расстояние от центра трубок до источника волны и до плоскости наблюдения дифракционной картины. В первом приближении длина L_m трубок не зависит от длины волны. Из этих трубок может быть составлена модель объемной зонной пластины с переменной толщиной, у которой две соседние зоны Френеля отделены тонкими цилиндрическими (или коническими) трубками.

В работе выполнены измерения пространственного распределения амплитуды колебаний акустического поля дифрагировавшей ультразвуковой волны с частотой 40 кГц на цилиндрических трубках с диаметрами 101 мм, 144 мм, 177 мм, 205 мм, 230 мм, равными диаметрам первых пяти четных радиусов зон Френеля. Длины трубок равны соответственно: 111 мм, 64 мм, 45 мм, 35 мм, 29 мм.

На рисунке представлены графики соответственно распределения амплитуды и интенсивности колебаний акустического поля дифрагировавшей волны на цилиндрической трубке диаметром 144 мм. Источник волны расположен на оси трубки на расстоянии 300 мм от центра трубки, а плоскость наблюдения удалена от центра трубки на 300 мм и перпендикулярна ее оси. Пунктирами

указана величина амплитуды колебаний ультразвуковой волны в плоскости наблюдения при отсутствии трубки. В работе обсуждаются полученные экспериментальные результаты. Указывается, что расположение возникающих боковых максимумов и минимумов дифракционной картины, не может быть объяснено простой моделью интерференции двух волн, отраженной от трубки сходящейся волны и расходящейся волны от источника.

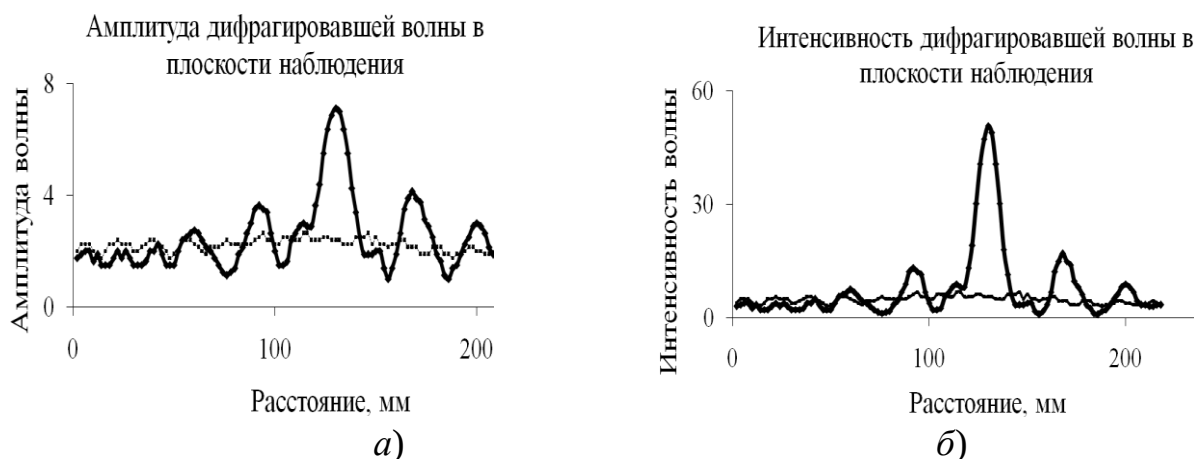


Рис. Графики распределения в плоскости наблюдения ультразвуковой волны:

а) амплитуды колебаний; б) интенсивности колебаний

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Расчет рентгеновской голограммной линзы для нанометрового диапазона спектра // Вестник НГУ. – Сер. «Физика». – 2009. – Т. 4, вып. 2. – С. 3–7.
2. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. – Л., ГОИ. – 1984. – 140 с.

© С. О. Алебастров, Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова,
Н. Н. Достовалов, П. С. Орлов, 2016

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ ОБЪЕМНОГО ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Юрий Цыдыпович Батомункуев

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

Рассматривается расчет глубины резкости объемного голограммного оптического элемента с учетом его толщины и селективности.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент.

CALCULATION OF THE DEPTH OF FIELD FOR VOLUME HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

Yury Ts. Batomunkuev

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

The depth of field for volume holographic optical element considering of its thickness and selectivity is calculated.

Key words: holographic optical element.

Известно, что формула расчета глубины резкости тонкого голограммного оптического элемента (ГОЭ) в пространстве изображения, может быть представлена в виде

$$\Delta \approx 2z_i d/D,$$

где Δ – глубина резкости, z_i – расстояние от ГОЭ до плоскости изображения, d – допустимый поперечный размер геометрической аберрации в изображении, D – световой диаметр ГОЭ [1].

Однако, для объемного ГОЭ расчет глубины резкости изображения требует учета его отличительных особенностей по сравнению с тонким ГОЭ, а именно: толщины и селективности. В частности, учет толщины приводит к существованию двух оптимальных рабочих схем объемного ГОЭ, а учет селективности приводит к зависимости его светового диаметра D от толщины L , от рабочей длины волны λ_c , от расположений предметной плоскости и плоскости изображения [2]. Так зависимость светового диаметра D объемного ГОЭ от толщины L задается формулой [3]

$$D = 2(\lambda_c / L^2 F_{202})^{1/2},$$

где F_{202} – аберрационный коэффициент.

Оптимальные расстояния z_c , z_i от ГОЭ до предметной плоскости и плоскости изображения могут быть определены из выражений: $z_c = 2F/(1 + P_0)$, $z_i = 2F/(1$

– P_0), где F – фокусное расстояние на рабочей длине волны [2]. Параметр $P_0 = (\beta_0 - 1)m\lambda_0/\lambda_c(\beta_0 + 1)$, где β_0 – коэффициент поперечного увеличения ГОЭ на стадии его записи, m – коэффициент усадки [2]. Глубина резкости объемного ГОЭ определяется независимо в предметной области и в области изображения. На рис. 1 представлены графики численных расчетов зависимости глубины резкости в предметной плоскости (сплошная линия) и в плоскости изображения (пунктирная линия) от изменений рабочей длины волны и толщины ГОЭ. В качестве примера рассмотрен ГОЭ, имеющий: $L=0,4$ мм, $\lambda_c=532$ нм, $\lambda_0=632,8$ нм, $m=1$, $F=59,47$ мм, $\beta_0=1,2$. Получено, что зависимость глубины резкости, как в предметной плоскости, так и в плоскости изображения ГОЭ носит нелинейный характер от изменения рабочей длины волны λ_c , уменьшается при приближении к длине волны записи λ_0 , а при $|\lambda_c - \lambda_0| \gg 10$ нм существенно превышает глубину резкости аналогичного тонкого ГОЭ (нижние линейные графики на рис. 1, а). При $\lambda_c = \lambda_0$ глубины резкости объемного и тонкого ГОЭ практически совпадают. При увеличении толщины рассматриваемого ГОЭ от 0,05 мм до 1 мм (рис. 1, б) имеет место линейное изменение его глубины резкости, как в предметной плоскости, так и в плоскости изображения. При уменьшении толщины глубина резкости объемного ГОЭ стремится к значению для тонкого ГОЭ.

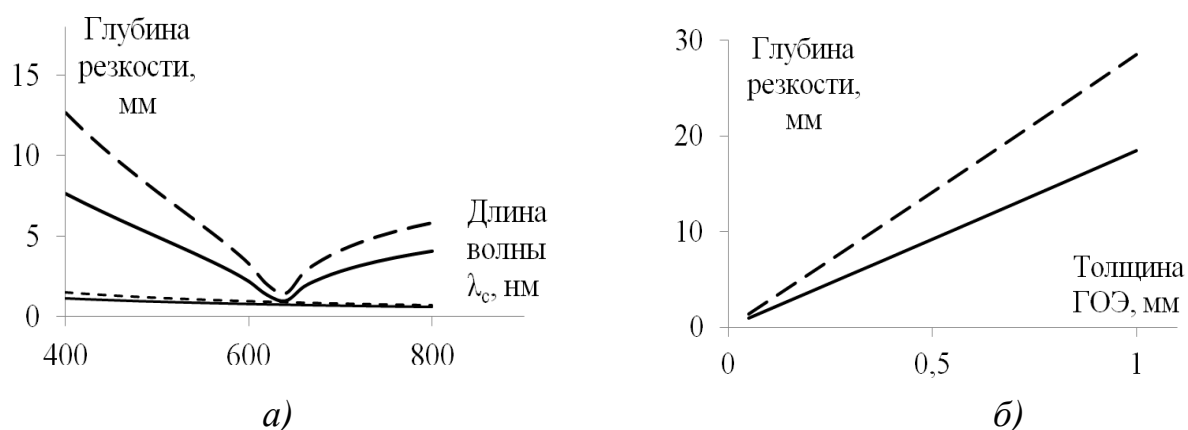


Рис. 1. Графики зависимости глубины резкости объемного ГОЭ:
а) от изменения рабочей длины световой волны; б) от толщины ГОЭ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meier R.W. Magnification and third-order aberration in holography // JOSA. – 1965. – V.55, N.8. – P. 987-992.
2. Батомункуев, Ю.Ц. Зеркально-линзовая модель объемных голограммных оптических элементов / Ю.Ц. Батомункуев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 48-52.
3. Батомункуев, Ю.Ц. Аберрации объемного голограммного оптического элемента, полученного с помощью цилиндрической объектной и сферической опорной волн / Ю.Ц. Батомункуев // Оптический журнал. – 2013. – Т.80, № 8. – С. 31-36.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2016

ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Юрий Цыдыпович Батомункуев

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

Александра Алексеевна Дианова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

В работе представлены результаты расчета хроматических aberrаций дифракционных элементов на примере объемного голограммного оптического элемента.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, хроматическая aberrация.

CHROMATIC ABERRATIONS OF DIFFRACTIVE ELEMENTS

Yury Ts. Batomunkuev

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

Alexandra A. Dianova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., postgraduate student, e-mail: dianova.aleksandra@mail.ru

The results of the calculation of chromatic aberrations for diffraction elements as volume holographic optical element are presented.

Key words: volume holographic optical elements, chromatic aberrations.

Известно, что в инфракрасной (ИК) области спектра из-за сильного поглощения затруднено использование традиционных стеклянных линз в задачах фокусировки излучения и формирования изображения, поэтому применяются линзы из полупроводниковых материалов, например германий [1]. Но относительно низкий коэффициент пропускания, имеющие место хроматические aberrации линз из этих материалов ограничивают создание светосильных ИК объективов. Известно, что для исправления хроматических aberrаций таких объективов могут быть применены дифракционные элементы, например, обладающие высокой дифракционной эффективностью фазовые объемные голограммные оптические элементы (ГОЭ) [2]. Но значительные хроматические aberrации дифракционных элементов ограничивают их практическое применение. Поэтому важной задачей является изучение хроматических aberrаций дифракционных элементов с целью их максимально возможной коррекции. Актуальность таких исследований вызвана также совершенствованием и развитием известных технологий изготовления дифракционных элементов и появлением

новых технологий, например технологией изготовления трехмерных дифракционных элементов с помощью 3D принтеров.

В качестве примера дифракционного элемента в работе рассмотрен объемный ГОЭ, дифракционная структура которого формируется интерференцией сферических опорной и объектной волн. Чтобы не учитывать aberrаций, возникающих в дифрагировавшей волне из-за преломления на поверхностях ГОЭ, предполагается, что показатели преломления ГОЭ и окружающей среды его среды одинаковы. Аналитические выражения коэффициентов aberrаций высших порядков, учитывающих изменение показателя преломления и размеров ГОЭ, представлены в работе [3].

Рассчитываемый ГОЭ имеет начальную толщину 1 мм, показатель преломления 2,5, фокусное расстояние (на рабочей длине волны $\lambda_c = 10$ мкм) 458 мм, относительное отверстие 1:2 и коэффициент линейного увеличения $\beta = 2,47^x$. Так же предполагается, что расстояния от источников опорной и объектной сферических волн до ГОЭ (в среде) соответственно равны 714,4 мм и 517,68 мм, а длина волны лазера 532 нм. На рисунке представлены расчетный график зависимости радиуса осевых поперечных aberrаций Δr от изменения рабочей длины волны λ_c . Сплошной линией показана зависимость радиуса осевой aberrации третьего порядка, линией с штрихами – aberrации пятого порядка, а aberrации седьмого и девятого порядков пренебрежимо малы (поэтому на рисунке не указаны). Диапазон изменений $\Delta \lambda_c$ рабочей длины волны λ_c принят равным от 8,87 мкм до 11,4 мкм. Во всем рассматриваемом диапазоне $\Delta \lambda_c$ исправление хроматической aberrации первого порядка достигается выбором расстояний от ГОЭ до предметной плоскости и плоскости изображения. Aberrация третьего порядка равна нулю при $\lambda_c = 10$ мкм. Aberrация пятого порядка не превышает величины 0,1 мм, а исправление этой aberrации происходит за пределами рассматриваемого диапазона $\Delta \lambda_c$. Aberrация седьмого порядка во всем диапазоне $\Delta \lambda_c$ существенно меньше aberrации пятого порядка и не превышает величины 0,005 мм. При отклонении рабочей длины волны λ_c на величину ± 1 мкм от заданного значения 10,0 мкм aberrации третьего, пятого и седьмого порядков не превышают 0,07 мм. Указанное уменьшение aberrаций достигается масштабированием объемного ГОЭ по толщине и диаметру. Расчетные значения коэффициентов масштабирования равны $m_x = 2,14$, $m_z = 3,6$. Полученные значения коэффициентов масштабирования, позволяют рассчитать требуемое пространственное распределение модуляции показателя преломления объемного ГОЭ, которое может быть реализовано $\Delta \lambda_c$ с помощью 3D принтера.

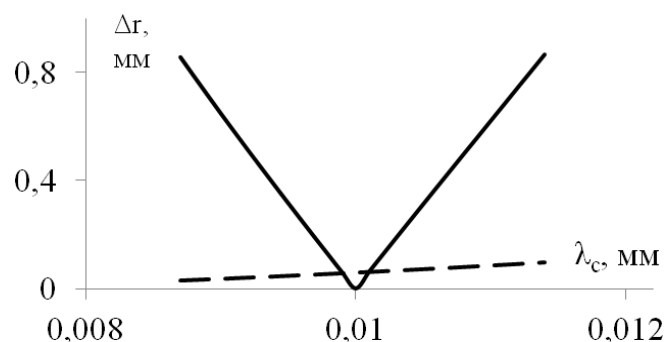


Рис. Зависимость радиуса осевой поперечной aberrации Δr от изменения рабочей длины волны λ_c

Таким образом, в работе на примере объемного ГОЭ с относительным отверстием 1:2, регистрируемого двумя сферическими волнами, выполнены численные расчеты хроматических aberrаций и показано, что выбором оптимальных расстояний от ГОЭ до предметной плоскости и плоскости изображения, выбором коэффициентов масштабирования можно существенно скорректировать aberrации высших порядков (пятого и седьмого порядков) объемного ГОЭ в инфракрасной области спектра в диапазоне ± 1 мкм относительно рабочей длины волны 10 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://www.alkor.net/alkorru/Germanium1.html>.
2. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. – Л., ГОИ. – 1984. – 140 с.
3. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Внеосевые объемные голограммные элементы для ближнего инфракрасного диапазона спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 43–47.

© Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, 2016

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЫ

Дмитрий Александрович Белоусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (961)228-82-68, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

Александр Григорьевич Поleshchuk

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

Владимир Николаевич Хомутов

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

Представлены результаты исследования оптоволоконного экрана для оперативного контроля параметров лазерного излучения рассеянного на микро рельефе синтезированных голограмм, в диапазоне углов до $\pm 80^\circ$. Показана возможность определения периодов и ориентации структур синтезированных голограмм, по анализу дифракционной картины.

Ключевые слова: дифракционная оптика, синтезированные голограммы, компьютерная оптика, обработка изображения.

THE PARAMETERS CONTROL OF THE MICRORELIEF SYNTHESIZED HOLOGRAMS BY DIFFRACTION PATTERN ANALYSIS METHOD

Dmitrij A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, software engineer, tel. (961)228-82-68, e-mail: d.a.belousov91@gmail.com

Alexander G. Poleschchuk

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, D. Sc., head of laboratory of the diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleschchuk@iae.nsc.su

Vladimir N. Khomutov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, junior research fellow, tel. (383)333-30-91, e-mail: v.n.homutov@gmail.com

The results of investigation of the fiber-optic screen for the operation control parameters of the laser radiation scattered on the synthesized holograms microrelief in the angle range up to ± 80 degrees are shown. The possibility of the periods and structure orientation determination of the synthesized holograms on the diffraction pattern analysis is presented.

Key words: diffraction optics, synthesized holograms, computer optics, image processing.

Синтезированные голограммы (СГ) широко применяются в различных отраслях науки и техники. СГ действуют как оптический преобразователь волнового фронта. Искажения преобразованного волнового фронта, которые вносят СГ, могут быть связаны с ошибками, при формировании квазипериодической структуры на оптической подложке. Многие методы контроля структуры СГ используемые в настоящее время, такие как методы атомно-силовой микроскопии, конфокальной и лазерной профилометрии, микроскопии электронным пучком, основываются на непосредственном сканировании микрорельефа и оценки его качественных параметров [1].

Альтернативным методом контроля параметров микрорельефа является метод, основанный на анализе дифракционной картины СГ. Световой поток, пройдя или отразившись от квазипериодической структуры СГ, раскладывается в угловой спектр на ряд дифракционных порядков. Нулевой порядок, имеющий интенсивность I_0 распространяется вдоль оптической оси падающего излучения, а боковые дифракционные порядки с интенсивностью I_m , распространяются под углами ϕ_m к оптической оси:

$$\sin(\phi_m) = \frac{m \cdot \lambda}{d}, \quad (1)$$

где m – номер дифракционного порядка, d – период микрорельефа СГ, λ – длина волны лазерного излучения. Соответственно, измерив угловое распределение дифракционных порядков и зная длину волны падающего излучения λ можно по формуле (1) определить период микрорельефа СГ. Помимо этого измерив интенсивности всех дифракционных порядков I_m можно определить глубину и форму микрорельефа [2].

Ряд автоматизированных методов для оперативного контроля параметров дифрагированного излучения, рассеянного на микрорельефе СГ, описаны в работах [3], [4] и [5]. Сложность автоматизации данного метода связана с тем, что необходимо направить весь дифрагированный свет, расходящийся в широком телесном угле на светочувствительную матрицу регистрирующей видеокамеры. Для этого чаще всего применяется рассеивающий экран, расположенный между исследуемой СГ и объективом видеокамеры. В работе [5], было проведено исследование применения рассеивающих экранов различной формы и отмечены их недостатки, главными из которых является изменение формы дифрагированного пучка на рассеивающем экране в зависимости от угла дифракции, а так же ухудшение разрешения измерительной системы с увеличением угла дифракции.

В настоящей работе приводятся результаты исследования оптоволоконного экрана, который представляет собой систему спечённых между собой оптических волокон. Одна из поверхностей оптоволоконного экрана выполнена в виде полости полусферической формы. Такая конфигурация позволяет направлять в сторону светочувствительной матрицы видеокамеры излучения, дифрагированное в диапазоне углов до $\pm 80^\circ$.

Также представлены результаты разработки экспериментального стенда для контроля параметров дифрагированного излучения, в котором источником излучения служит гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм. Схема экспериментального стенда указана на рис. 1. Оптическое излучение лазера падает на исследуемую СГ, которая устанавливается на X-Y координатной системе. Излучение, дифрагированное на микрорельефе исследуемой СГ, попадая на внутреннюю поверхность оптоволоконного экрана, которая выполнена в виде полости полусферической формы, проецируется на его внешней поверхности и затем фиксируется видеокамерой. Полученные данные обрабатываются управляющим компьютером.

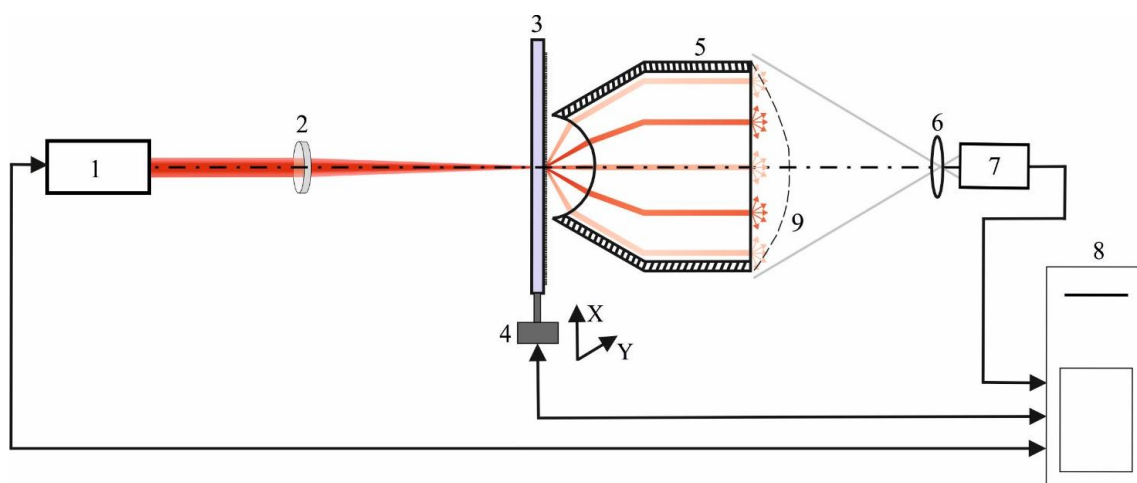


Рис. 1. Схема контроля параметров дифрагированного излучения:

- 1 – источник излучения; 2 –фокусирующая линза; 3 – исследуемая СГ;
4 – X-Y координатная система; 5 – оптоволоконный экран; 6 – объектив;
7 – видеокамера, 8 – управляющий компьютер, 9 – коллективная линза

Оптоволоконный экран устанавливается таким образом, чтобы сфокусированное излучение на поверхности СГ находилось в центре кривизны полости выполненной в нижней его части. Это позволяет избежать искажения формы дифракционных порядков в зависимости от угла дифракции. Внешняя сторона оптоволоконного экрана, на которую проецируется изображение со внутренней его части, может иметь как плоскую, так и выпуклую форму (штриховая линия на рис. 1), формируя таким образом на поверхности оптоволоконного экрана коллективную линзу, что увеличит светопередачу дифрагированного излучения на светочувствительную матрицу видеокамеры.

На описанном стенде был проведён эксперимент по контролю параметров дифракционного излучения, рассеянного на структуре эталонной СГ, период которой составляет 6 мкм. Далее, по полученным данным углового распределения дифракционных порядков, определялся период исследуемого элемента.

Для калибровки системы использовалась эталонная СГ, период которой составляет 8 мкм. Угловое распределение дифракционных порядков калибровочного элемента лежит в диапазоне $\pm 71,7^\circ$. На рис. 2, а представлена зафик-

сированная видеокамерой с помощью оптоволоконного экрана дифракционная картина от калибровочной СГ с периодом 8 мкм. На рис. 2, б показана дифракционная картина, зафиксированная при исследовании СГ с периодом 6 мкм.

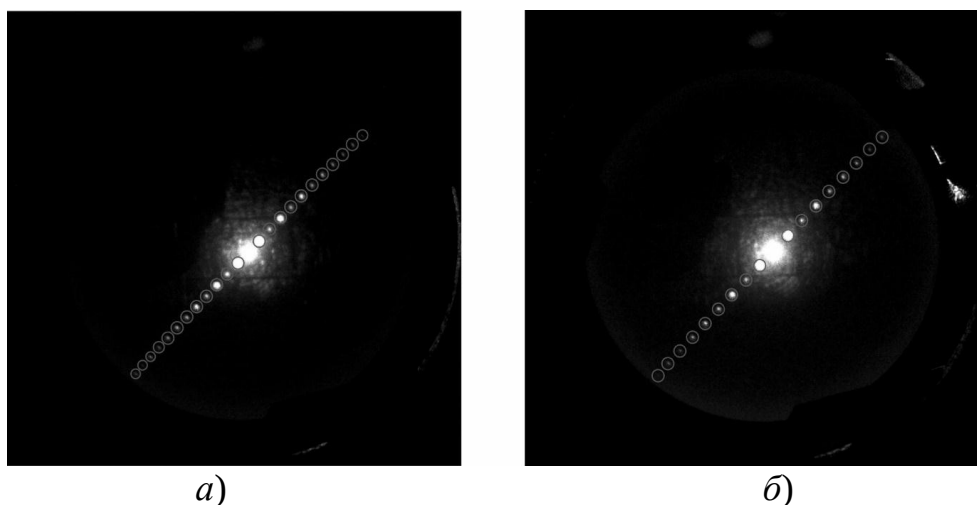


Рис. 2. Зафиксированные видеокамерой дифракционные картины:

а) калибровочная СГ с периодом 8 мкм; б) исследуемая СГ с периодом 6 мкм

Угловое распределение дифракционных порядков, полученное в результате анализа дифракционной картины, и определённый по нему период исследуемой СГ представлены в таблице.

Таблица

Полученное угловое распределение дифракционных порядков и рассчитанный по нему период исследуемой СГ

М	Измеренный угол дифракции	Рассчитанный период СГ
-9	-72,75°	5,97 мкм
-8	-58,57°	5,94 мкм
-7	-47,83°	5,98 мкм
-6	-38,74°	6,07 мкм
-5	-31,26°	6,1 мкм
-4	-24,62	6,08 мкм
-3	-18,25°	6,07 мкм
-2	-12,05°	6,06 мкм
-1	-6,13°	5,93 мкм
+1	6,13°	5,93 мкм
+2	12,13	6,03 мкм
+3	18,04	6,13 мкм
+4	24,62°	6,08 мкм
+5	31,37°	6,08 мкм
+6	38,51°	6,1 мкм
+7	46,79°	6,08 мкм
+8	56,86°	6,05 мкм
Полученный период СГ		6,04 мкм

Преимуществом использования оптоволоконного экрана над обычными рассеивающими экранами является то, что при контроле параметров дифрагированного излучения в широком диапазоне углов, форма дифракционных порядков не зависит от угла дифракции, а также то, что использование оптоволоконного экрана позволяет выполнить практически любое линейное или нелинейное преобразование угловой координаты дифрагированного излучения на матрицу регистрирующей видеокамеры.

Показано, что предложенный метод позволяет проводить оперативное измерение параметров лазерного излучения дифрагированного на микрорельефе СГ в диапазоне углов до $\pm 80^\circ$. Экспериментально продемонстрирована возможность измерения периодов и ориентации квазипериодических структур СГ, по анализу дифракционной картины.

Данная работа поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227, междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН и проектом Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН на 2016 год № П.2П/П.10-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gale M. T., Rossi M., Schütz H., Ehberts P., Herzig H. P., Pronque D. Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation // *Appl. Opt.* – 1993. – № 32. – P. 2526–2533.
2. Ekberg M., Nikolajeff F. Proximity-compensated blazed transmission grating manufacture with direct-writing, electron-beam lithography // *Appl. Opt.* – 1994. – № 33. – P. 103–107.
3. Хомутов В. Н., Полещук А. Г., Черкашин В. В. Измерение дифракционной эффективности ДОО по многим порядкам дифракции // «Компьютерная оптика». – 2011. – Т. 35. – С. 196–201.
4. Wenrui Cai, Ping Zhou, Chunyu Zhao, James H. Burge. Diffractive optics calibrator: measurement of etching variations for binary computer-generated holograms // *Appl. Opt.* – 2014. – № 53. – P. 2477–2486.
5. Белоусов Д. А., Полещук А. Г., Хомутов В. Н. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой // «Компьютерная оптика». – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 678–687.

© Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, 2016

ПОРТАТИВНАЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА ДАТЧИКА ФОРМЫ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Владимир Николаевич Хомутов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: khomutovvn@iae.sbras.ru

Рассмотрена возможность создания портативных датчиков волнового фронта основанных на схеме Шека-Гартмана. Предложен вариант портативной платформы для разработки датчиков волнового фронта различного назначения.

Ключевые слова: контроль волнового фронта, датчик Шека-Гартмана, портативные устройства.

PORTABLE SYSTEM FOR WAVEFRONT CONTROL

Vladimir N. Khomutov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptyug Prospect, junior research fellow, tel. (383)333-30-91, e-mail: khomutovvn@iae.sbras.ru

The possibility of creating a portable wavefront sensors based on Shak-Hartmann scheme. A portable version of the platform for the development of wavefront sensors for various purposes.

Key words: test of wavefront, Shak-Hartmann sensors, portable devices.

В различных отраслях оптической промышленности всё чаще встаёт проблема контроля и измерения формы оптической поверхности. Известные и хорошо изученные методы лазерной интерферометрии хорошо себя зарекомендовали для проведения прецизионных измерений формы оптической поверхности. Интерферометры обеспечивают точность измерения вплоть до $\lambda/1000$ [1] и позволяют контролировать поверхности произвольной формы (плоские, сферические, асферические). Мировая оптическая индустрия задала настолько высокую планку точности изготовления оптических деталей, что сегодня сложно представить крупное оптическое предприятие или лабораторию без современного лазерного интерферометра. Однако применение интерферометров не всегда оправдано или может быть возможно. Это особенно касается тех случаев, когда речь идёт о контроле оптики установленной на стенд или контроле непосредственно в процессе обработки, без снятия со станка. В таких случаях целесообразно использовать датчики волнового фронта, основанные на схеме Шека-Гартмана. Оптическая схема датчиков Шека-Гартмана значительно проще чем схема любого современного интерферометра, а, следовательно, и цена на такие приборы существенно ниже. Самые простые модели таких датчиков обеспечивают точность $\lambda/10$ - $\lambda/20$, но в отличие от интерферометров они компактны и могут быть установлены практически в любое труднодоступное место. Кроме

того, датчикам Шека-Гартмана не требуется много времени для измерения, и они менее чувствительны к вибрациям, чем интерферометры.

Схема Шека-Гартмана

Датчики на основе схемы Шека-Гартмана – стандартный инструмент адаптивной оптики. Классическая схема датчика Шека-Гартмана достаточно проста. Датчик состоит из двух основных компонентов – микролинзового раstra и экрана наблюдения. Световой пучок отражаясь от исследуемой оптической поверхности, а затем разбивается на световые пучки с помощью микролинзового раstra. Положение пучков на экране наблюдения соответствует наклону волнового фронта в некоторой малой области наблюдения. Их координаты могут быть рассчитаны по формуле [2]:

$$X_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n x_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}}, Y_k = \frac{\sum_j^m \sum_i^n y_i I_{i,j}}{\sum_j^m \sum_i^n I_{i,j}} \quad (2)$$

где $I_{i,j}$ – интенсивность в ячейке (пикселе) фото матрицы (x_i, y_j) k -ой локальной апертуры

Локальный наклон волнового фронта соответствует $W(x,y)$ в точках (x_k, y_k) соответствует уравнениям:

$$\frac{\partial W_k}{\partial x} = \frac{\Delta x_k}{f}, \frac{\partial W_k}{\partial y} = \frac{\Delta y_k}{f}, \quad (3)$$

где f – фокальное расстояние линзового раstra, Δx , Δy – локальное смещение центров фокальных пятен вдоль осей x , y .

Вычислив смещения на каждом участке можно непосредственно найти коэффициенты разложения для $W(x,y)$ методом наименьших квадратов. Точность метода напрямую зависит от разрешения микроклинового раstra [3].

В современных датчиках волнового фронта, построенных по схеме Шека-Гартмана в качестве экрана наблюдения как, правило используются светочувствительные ПЗС или КМОП сенсоры. Это позволяет производить измерение и расчёт с помощью компьютера, что упрощает процесс измерения и повышает точность работы датчика. Схема и принцип работы современных датчиков Шека-Гартмана показы на рис. 1.

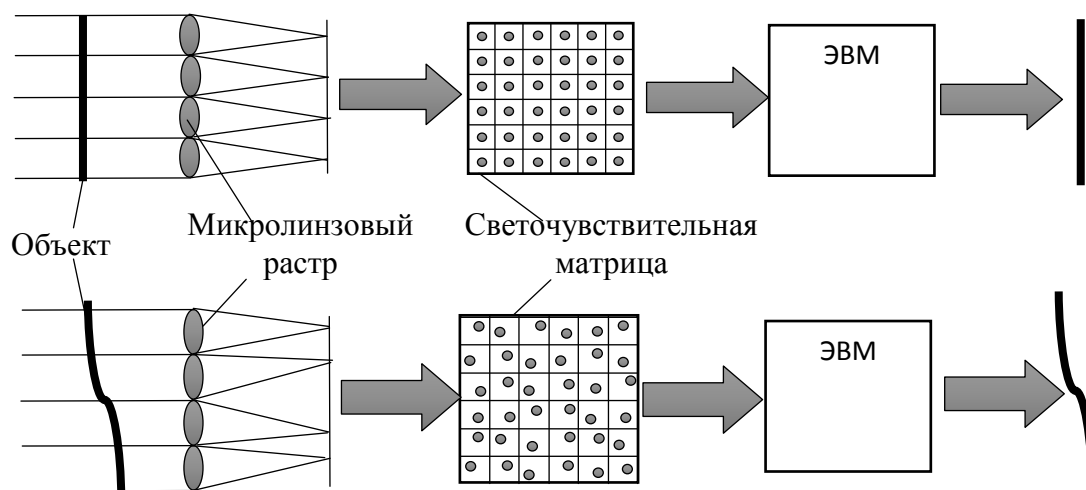


Рис. 1. Схема датчика Шека-Гартмана

Основным преимуществом датчиков, построенных по схеме Шека-Гартмана является возможность работы без использования референсной поверхности. Для работы достаточно едино разовой калибровки, после чего существует возможность осуществлять калибровку датчика по сохранённым значениям.

Портативная платформа

Все известные датчики волнового построены на основе схемы Шека-Гартмана предназначены для стационарного использования, их применение вне лабораторных стен невозможно, в том числе по причине необходимости использования мощных вычислительных машин для обработки получаемых данных.

В данной работе предложен портативный вариант датчика волнового фронта построенного по схеме Шека-Гартмана, его структурная схема приведена на рис. 2. Полупроводниковый лазерный модуль ($\lambda=635$ нм) с расходящимся пучком освещает измеряемую поверхность. Интенсивность лазерного модуля задаётся с помощью PWM сигнала. Лазерное излучение отражается от исследуемой поверхности и разбиваясь на пучки микролинзовым растром попадает КМОП сенсор OV7670 с разрешением 640x480. Управление сенсором осуществляется по протоколу I2C передача изображений от сенсора к микрокомпьютеру осуществляется по параллельному протоколу с использованием GPIO портов. Обработка изображений осуществляется микрокомпьютером. Результаты измерения выводятся на ЖК дисплей с диагональю 4 дюйма. Также возможна реализация передачи результатов измерения на внешние устройства по Wi-Fi или сохранение результатов на SD-карту. Управление прибором осуществляется трёхкнопочной клавиатурой подключений к портам GPIO микрокомпьютера.

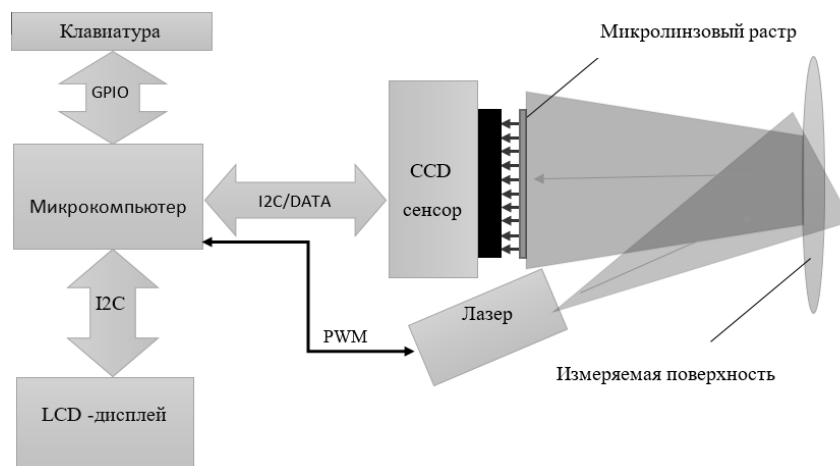


Рис. 2. Схема портативного датчика волнового фронта

Программное обеспечение датчика было разработано для микрокомпьютеров, работающих под операционной системой Linux. Вычислительный модуль датчика разработан на основе программного обеспечения Jacopo Antonello mshwfs. Интерфейс управления датчиком разработан с применением технологии QT.

Описанный датчик волнового фронта способен работать с растрами с разрешением не более 32х32 микролинзы, что соответствует точности измерения $\lambda/10$. Это ограничение вызвано низким разрешением камеры. При использовании матриц с более высоким разрешением, можно так же использовать микролинзовые растры более высокого разрешения и соответственно повысить точность измерения.

Было проведено тестирование работы программного модуля датчика с помощью демонстрационных гартмонограмм предоставленных mshwfs. Демонстрационная гартмонограмма mshwfs и фазовая карта, рассчитанная микрокомпьютером датчика волнового фронта представлены на рис. 3. Полученная фазовая карта полностью соответствует фазовой карте полученной с помощью программного обеспечения mshwfs в математическом пакете MATLAB.

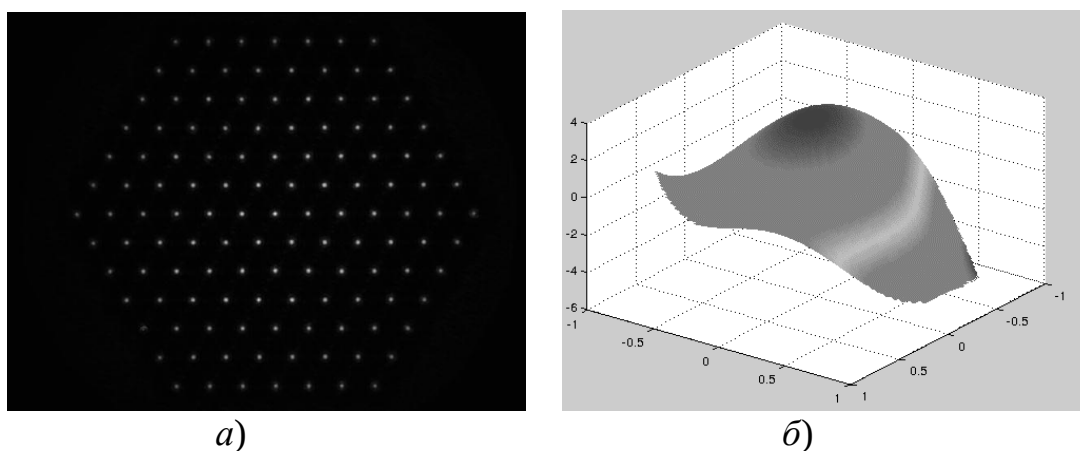


Рис. 3. Результат тестирования датчика волнового фронта:

а) гартмонограмма; б) фазовая карта

В результате данной работы показана возможность создания портативных датчиков волнового фронта. Данный подход может быть применён к датчикам любого класса и назначения, в том числе для промышленных и офтальмологических решений. При использовании гартмограмм высокого разрешения (100x100) датчик показал низкую скорость работы при обработке изображений микрокомпьютером. В дальнейшем планируется переход к использованию светочувствительных сенсоров высокого разрешения, оптимизация вычислительного ядра датчика для работы с растрами с разрешением до 128x128 микролинз, доработка и отладка программного обеспечения и пользовательского интерфейса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н. Лазерный интерферометр ФТИ-100 // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2013. №3. Т.5. – С. 25-31.
2. Jiang W., Xian H., Shen F. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor // Chin. J. Quantum Electron -1998. 15, (2) – P. 218–227.
3. Daniel R. Neal, James Copland, David Neal Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy // Proc. of SPIE – 2002. Vol. 4779. – P. 148–160.

© В. Н. Хомутов, 2016

ЗЕРКАЛЬНО-ДИФРАКЦИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО РАДИАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА В ПЯТНО ПРЕДЕЛЬНО МАЛОГО РАЗМЕРА

Андрей Георгиевич Седухин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Александр Григорьевич Поleshchuk

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

Предложен и исследован новый тип «сухого» высокоапертурного ($NA \sim 1$) зеркально-дифракционного объектива с большим рабочим отрезком (1 мм) и внутренним преобразованием формы входного излучения в пучок с кольцевой апертурной функцией. Диаметр лазерного пятна в фокальной плоскости объектива составляет около 100 нм при рабочей длине волны 266 нм и радиальной поляризации входного излучения. Профиль функции рассеяния точки данного объектива близок к бесселевой функции первого рода нулевого порядка.

Ключевые слова: дифракционная оптика, фокусировка излучения, бесселевы пучки.

MIRROR-DIFFRACTIVE OBJECTIVE LENS FOR FOCUSING RADIALLY POLARIZED LASER BEAM INTO ULTIMATELY SMALL SPOT

Andrey G. Sedukhin

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, senior research scientist, tel. (383)333-79-31, e-mail: sed@iae.nsk.su

Alexander G. Poleshchuk

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, D. Sc., head of laboratory of the diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsk.su

A new type of «dry» high aperture ($NA \sim 1$) mirror-diffractive objective lens is proposed and investigated. The objective lens has a large working distance (1 mm) and the internal transformation of the input radiation into a beam with annular aperture function. For radially polarized input radiation, the full width size of a laser spot evaluated at a half of central intensity maximum in the focal plane of the objective lens amounts to about 100 nm at the wavelength of 266 nm. The profile of the point spread function of the objective lens is close to the zero-order Bessel function of the first kind.

Key words: diffractive optics, light focusing, Bessel beams.

Численно исследована острая стигматическая фокусировка лазерного пучка при его высокоапертурном кольцевом сведении и различных формах поляризации. В данной работе предполагается использование независимых от системы

фокусировки преобразователей поляризации. Для организации кольцевого сведения пучка использована ранее предложенная система фокусировки [1] в виде (рис. 1) преобразователя поляризации лазерного пучка П, дифракционного оптического элемента (ДОЭ), преобразующего гауссово распределение интенсивности лазерного пучка в кольцевое распределение, а также кольцевого сферического зеркала (СЗ), имеющего зеркальное (металлическое) покрытие и обеспечивающего сохранение направления продольной компоненты падающего на зеркало светового пучка после его отражения (отражение лучей вперед). Указанный режим использования сферического зеркала существенно отличается от традиционного, при котором продольная компонента падающего на зеркало светового пучка и продольная компонента отраженного пучка имеют различные знаки (отражение лучей назад). Нами проанализированы функции рассеяния точки указанной системы фокусировки для таких типовых видов поляризации, как линейная, круговая, азимутальная и радиальная. Установлено, что при выбранном режиме работы сферического зеркала (отражение лучей вперед), функции рассеяния точки для линейной и круговой поляризации пучка существенно отличаются по своей форме и размерам от функций рассеяния, характерных для традиционного использования зеркала, при отражении лучей назад. Такое поведение объясняется особой трансформацией компонентов падающего линейно поляризованного пучка при отражении пучка от зеркала. А именно: в соответствии с граничными условиями электродинамики, зеркало инвертирует тангенциальную компоненту вектора напряженности электрического поля E в поперечной плоскости сечения зеркала (в плоскости, перпендикулярной оптической оси) и не изменяет радиальную компоненту указанного вектора. Соответственно, в векторной интегральной форме Дебая, описывающей распределение амплитуды поля вблизи фокальной точки, полярный угол θ замещается на $\pi - \theta$, а сомножители вида $(1 \pm \cos \theta)$ замещаются на $(1 \mp \cos \theta)$. При высокоапертурной кольцевой фокусировке, это влечет за собой существенное изменение формы функций рассеяния точки по отношению к случаю, когда зеркало используется в традиционном режиме (при отражении лучей назад).

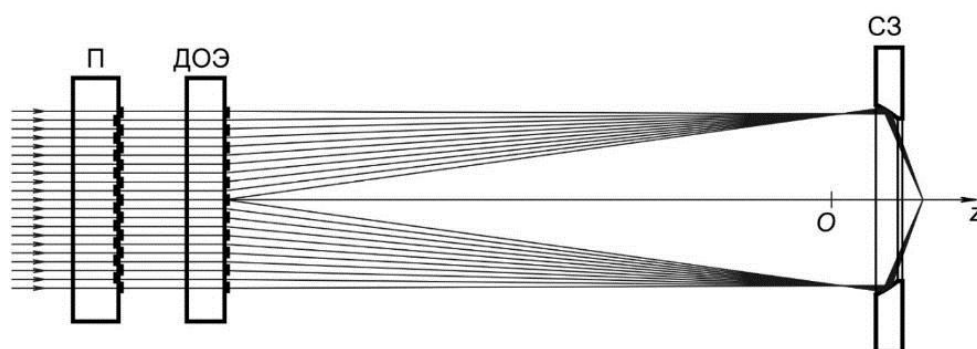


Рис. 1. Упрощенная схема зеркально-дифракционного объектива

При проведении численного моделирования, нами были приняты следующие параметры оптической системы. Лазерный пучок на входе дифракционного элемента имеет плоский волновой фронт, а его амплитудное распределение имеет гауссову форму, с распределением в перетяжке пучка вида $E_{BX} = \exp(-r^2/w_0^2)$, где r – поперечная радиальная координата, а $w_0 = 5.97$ мм – радиус шейки пучка по уровню $\exp(-2)$. Рабочая длина волны составляет $\lambda = 266$ нм. Для случая линейной поляризации, принимается, что пучок поляризован по поперечной координате X либо Y . Радиус кривизны кольцевого сферического зеркала составляет $R = 7$ мм. Расстояние между плоскостью дифракционного элемента и центром кривизны зеркала равно $Z = 40$ мм, а расстояние между центром кривизны зеркала и точкой стигматической фокусировки равно $z = 5.86$ мм. Минимальное значение полярного угла при кольцевой фокусировке пучка составляет $\theta_{\min} = 69.37^\circ$, а максимальное значение данного угла равно $\theta_{\max} = 71.81^\circ$. Из этих данных следует, что числовая апертура рассматриваемой оптической системы составляет $NA = \sin \theta_{\max} = 0.95$, а значение разности максимального и минимального полярного угла при кольцевой фокусировке равно $\theta_{\max} - \theta_{\min} = 2.45^\circ$. При этом, фактор кольцевого сжатия пучка можно оценить в виде соотношения $\varepsilon = (\theta_{\max} - \theta_{\min})/\theta_{\max} = 0.034$.

Расчет светового поля производился по формулам, учитывающим вышеприведенные параметры оптической системы и соответствующим модели высокоапертурной векторной фокусировки лазерного пучка в приближении Дебая [2]. Для случая использования рассмотренного в данной работе обращенного кольцевого сферического зеркала (ОКСЗ) и лазерного пучка, линейно поляризованного (ЛинП) в плоскости X и имеющего высокоапертурное кольцевое сведение в пределах узкой секторальной области полярного угла θ , на рис. 2, а показана форма рассчитанных численно функций рассеяния точки (кривые I_5) для двух сечений – по X координате и по Y координате. Как можно видеть, распределение по X координате (линия в виде точек) имеет выраженный провал в центре, при $X = 0$, и двугорбую форму основных максимумов. В то же время, распределение по Y координате (линия в виде точек и штрихов) характеризуется приближенно одинаковыми величинами интенсивностей центрального и двух первых побочных максимумов. Иными словами, данный вид функции рассеяния точки имеет вид двух близко расположенных и вытянутых сфокусированных пятен со сверхмалыми размерами. Такое свойство фокусирующей системы может найти свое применение на практике. В частности, это позволяет использовать данный режим фокусировки для дальнейшего совершенствования высокоразрешающей многопучковой прямой лазерной записи [3], с получением нанометрового разрешения. Для сравнения, на этом же рисунке показаны два сечения функции рассеяния точки (по X и Y координатам) для стандартного апланатического объектива (АО), имеющего ту же самую числовую апертуру и освещаемого тем же самым гауссовым пучком (кривые I_6), с линейной поляризацией и без кольцевого виньетирования. Как можно видеть, формы сечений

данной функции рассеяния близки к исходной гауссовой форме, но отличаются по ширине распределения. Поперечные размеры данных функций (по уровню интенсивности 0.5 и координатам X , Y) приближенно в два раза превышают поперечный размер максимумов вышерассмотренной двугорбой кривой I_5 .

На рис 2, б показана форма рассчитанных численно осесимметричных функций рассеяния точки для случая использования рассмотренного в данной работе обращенного кольцевого сферического зеркала и условия, когда входной пучок имеет высокоапертурное кольцевое сведение в пределах узкой секторальной области полярного угла θ , а также круговую (КрП, кривая I_3), азимутальную (АзП, кривая I_2), либо радиальную (РадП, кривая I_1) поляризацию. Как можно видеть, распределение, характерное для круговой поляризации, имеет относительно большие размеры и недостаточно глубокий провал в центре, для того, чтобы его можно было рекомендовать для практического применения. С другой стороны, распределения, характерные для азимутальной и радиальной поляризации, имеют выраженный центральный максимум, а также малые нанометровые поперечные размеры, что позволяет рассматривать их как приемлемые для различных практических применений. В частности, рассматриваемая оптическая система фокусировки может быть встроена систему прямой лазерной записи [4] для повышения разрешающей способности при записи структур, с использованием порогового механизма их записи. Для сравнения, на этом же рисунке показана функция рассеяния точки (кривая I_4) для стандартного апланатического объектива (АО), имеющего ту же самую числовую апертуру и освещаемого гауссовым пучком с указанным профилем, с круговой поляризацией (КрП) пучка без его кольцевого виньетирования. Как можно видеть, поперечный размер данной функции существенно превышает поперечные размеры, характерные для случаев использования сферического зеркала и радиальной либо азимутальной формах поляризации.

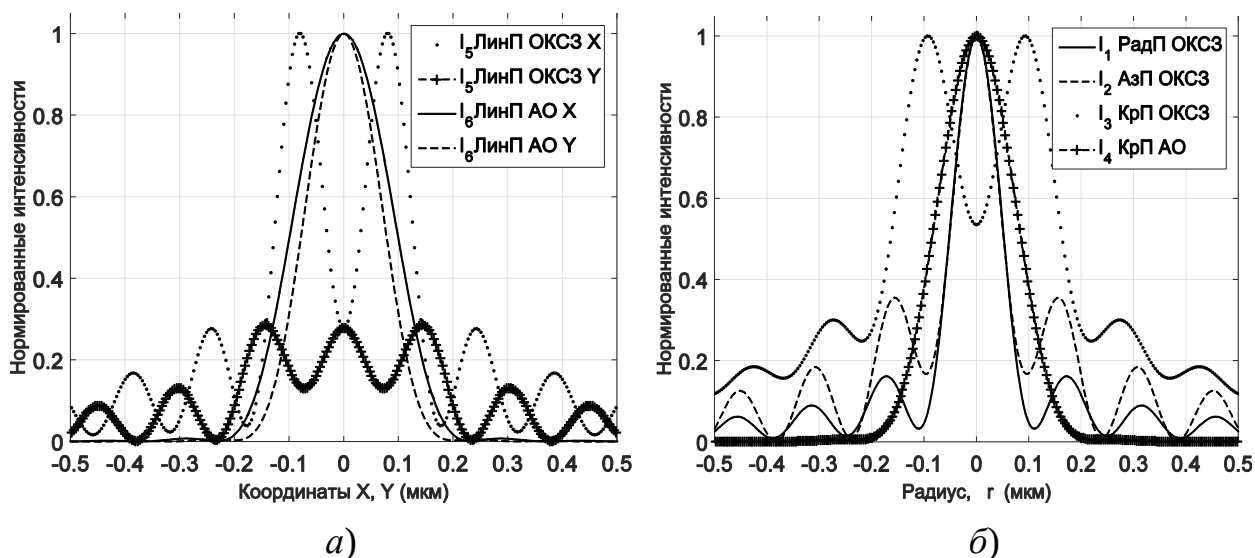


Рис. 2. Функции рассеяния точки обращенного кольцевого сферического зеркала (ОКСЗ) и апланатического объектива (АО) с равной числовой апертурой, для различных режимов поляризации входного пучка

Таким образом, исследования типовых режимов поляризации лазерного пучка для рассмотренной оптической системы кольцевой фокусировки показали, что наибольший практический интерес представляют режимы поляризации с линейной, азимутальной и радиальной поляризациями. В частности, данные режимы могут найти применение для сверхразрешающей термохимической прямой записи, с применением сканирующего лазерного нанолитографа.

Данная работа поддержана частично грантом РФФИ ОФИ-М № 4-29-07227, междисциплинарным интеграционным проектом № 112 Сибирского отделения РАН и проектом Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН на 2016 год № II.2П/II.10-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А.Г. и Седухин А.Г. Оптимизация параметров высокоапертурного дифракционно-рефлекторного объектива//Сборник трудов 12-ой Международной конференции “Голография ЭКСПО -2015” (12 - 15 октября 2015 г., г. Казань, Россия). 2015 г. С. 319-321. М.: Изд-во ООО “Голография-Сервис”.
2. B. Richards and E. Wolf, “Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system,” Proc. R. Soc. London A 253, 358–379, 1959.
3. Полещук А.Г., Саметов А.Р., Седухин А.Г. Многопучковая лазерная запись дифракционных оптических элементов //Автометрия, 2012, Т.48, №4. С. 3-11.
4. Полещук А.Г., Корольков В.П, Бессмельцев В.П., Никаноров Ю.Н., Карван А.Л., Верхогляд А.Г., Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро и нанообработки. Тезисы доклада Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2015», Казань, (2015).

© А. Г. Седухин, А. Г. Полещук, 2016

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Александр Григорьевич Полещук

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

Владимир Николаевич Хомутов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, младший научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: khomutovvn@iae.sbras.ru

Алексей Евгеньевич Маточкин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер технолог, тел. (383)336-41-08, e-mail: matochkin@iae.nsk.su

Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: nasyrovrk@iae.sbras.ru

Вадим Владимирович Черкашин

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, научный сотрудник, тел. (383)333-79-31, e-mail: vadcher@gmail.com

Проведен анализ современных лазерных интерферометров, предназначенных для контроля формы оптических поверхностей. Рассмотрены ключевые особенности и отличительные черты интерферометра типа ФТИ-100.

Ключевые слова: интерферометр, синтезированная голограмма, контроль асферических поверхностей.

MODERN LASER INTERFEROMETER TO CONTROL THE SHAPE OF THE OPTICAL SURFACE

Alexander G. Poleshchuk

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, D. Sc., head of laboratory of diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: poleshchuk@iae.nsc.su

Vladimir N. Khomutov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, junior research fellow, tel. (383)333-30-91, e-mail: v.n.homutov@gmail.com

Alexey E. Matochkin

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, leading engineer, tel. (383)333-30-91, e-mail: matochkin@iae.nsk.su

Ruslan K. Nasyrov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, D. Sc., head of laboratory of the diffraction optics, tel. (383)333-30-91, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Vadim V. Cherkashin

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, research fellow, tel. (383)333-30-91, e-mail: vadcher@gmail.com

Analysis of modern laser interferometers to control the shape of the optical surfaces is presented. Key features and distinctive features of the FTI-100 interferometer are considered.

Key words: interferometer, synthesized holograms, optical testing.

Качество изготовления оптических поверхностей определяется методами их контроля. При изготовлении современных оптических систем, требуется контролировать качество поверхностей (зеркал и линз) с точностью до единиц и даже долей нанометра. При этом площадь контролируемой поверхности может составлять несколько десятков квадратных метров. Для контроля плоских и сферических поверхностей применяются интерферометрические методы [1], а для контроля асферических поверхностей (АП) они дополняются компьютерно-синтезированными голограммами (СГ) – корректорами волнового фронта [2]. Применение СГ имеет ряд особенностей, таких как наличие паразитных дифракционных порядков, низкая дифракционная эффективность, требуемая высокая точность юстировки относительно интерферометра и контролируемой поверхности и др. [3]. Применение СГ совместно с коммерческими интерферометрами [4] не всегда позволяет учесть эти факторы, что приводит к снижению точности измерений, а иногда и к получению ошибочного результата.

В настоящей работе приведен анализ известных интерферометров Физо (ИФ) и результаты разработки и создания прибора ФТИ-100 оптимизированного для контроля АП с применением СГ.

Упрощенная оптическая схема ИФ приведена на рис.1, а. Оптическое излучение от источника S с помощью светоделителя BS и линзы O_1 направляется к эталонной пластине TF и контролируемой поверхности Ob (плоскость P_1). Излучение, отраженное от этой поверхности и от стороны A эталонной пластины (сторона B имеет клин α) фокусируется линзой O_1 в плоскости диафрагмы D и далее с помощью линзы O_2 направляется к расположенной в плоскости P_2 видеокамере C.

Одним из ключевых элементов ИФ является диафрагма D, которая служит для блокировки паразитного излучения отраженного от элементов схемы, в частности от стороны B эталонной пластины. Размер диафрагмы d определяет

пространственное разрешение прибора. Если эталонная пластина имеет клин $\alpha=15$ угл. мин., то при фокусном расстоянии $f_1=600$ мм линзы O_1 , диаметр диафрагмы может быть 10 мм. Однако, если ИФ используется для контроля АП совместно с СГ, то размер диафрагмы должен определяться углами дифракции паразитных порядков. СГ представляет собой дифракционную решетку (или зонную пластинку) и по определению, имеет множество дифракционных порядков (ДП). На рис. 1, б, в показан ход лучей света при контроле АП с помощью осевой СГ нанесенной на плоскость А эталонной пластины [3]. Для блокировки отраженных ДП, диаметр диафрагмы должен быть $D < 2f_1\lambda/T_{\max}$. При $\lambda=633$ нм и $T_{\max} \sim 0.5$ мм, $D < 1.5$ мм. Аналогично, если контроль АП осуществляется СГ совместно с эталонным объективом (ТС), паразитные ДП формируются, как при отражении от структуры СГ, так и от контролируемой поверхности (рис. 1, в). Таким образом, разумный выбор размера d диафрагмы позволяет минимизировать влияние паразитных ДП.

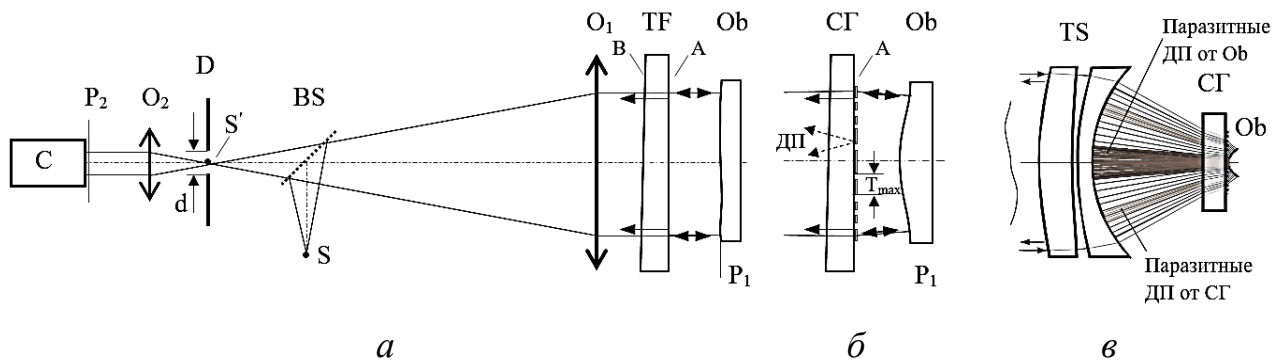


Рис. 1. Упрощенная схема ИФ (а), схемы контроля АП с использованием одной СГ (б) и с использованием эталонного объектива и СГ (в)

1. Световое поле. Диаметр светового поля с одной стороны определяет размеры контролируемых деталей, а с другой – габариты и стоимость прибора. В настоящее время выпускаются интерферометры с полем от 5 мм до 150 мм [4]. Диаметр поля в 300 мм и даже 600 мм обычно обеспечивается расширителями пучка. Наибольшее распространение получили приборы с полем 102 мм (4'').

2. Пространственное разрешение ИФ. Этот параметр, на практике, обычно определяется количеством интерференционных полос, которое регистрируется видеокамерой прибора. Ряд современных ИФ позволяет регистрировать свыше 1000 полос (Sub-Nyquist method) [5], что дает возможность проводить контроль формы АП с достаточно большим отклонением от ближайшей сферы без применения СГ. В этом случае диаметр диафрагмы (рис. 1, а) должен быть около $d \sim 8$ мм, а матрица видеокамеры иметь размерность не менее 4М, что в настоящее время не является проблемой. Однако, работа с таким большим количеством полос нарушает принцип Физо, что с одной стороны приводит к снижению точности измерения (до $\frac{1}{4} \lambda$ [6]) и требует калибровки, а с другой увеличи-

вает стоимость прибора из-за повышенных требований к качеству оптической системы. Разумным компромиссом является использование сменных диафрагм, переключаемых по команде оператора. В одном из вариантов ИФ типа ФТИ-100 реализовано переключение диафрагм с диаметрами 1.2, 2.4 и 4.8 мм, что позволяет регистрировать свыше 200 полос с приемлемой точностью. На рис. 2 приведен вид рабочего окна интерферометра ФТИ-100 при количестве полос 100. Контраст полос превышает 80% (используется камера 1.2 М), а погрешность результатов измерения при изменении количества полос с 10 до 100 не превышает $10^{-2}\lambda$ (rms). На рис. 2, б показано окно интерферограммы с увеличенной в 10 раз поверхностью детали.

Современные интерферометры работают под управлением компьютеров. Процесс контроля формы оптической поверхности с помощью интерферометра достаточно сложный и трудоёмкий, его полная автоматизация затруднительна. Однако часть процедур может быть переложена с оператора на управляющую компьютерную систему. В число этих процедур входят не только стандартные функции как калибровка, обработка интерферограмм, вычитание опорной поверхности, но и дополнительные функции как «живая» фазовая карта, метод трёх пластин, измерение радиуса кривизны сферических поверхностей.

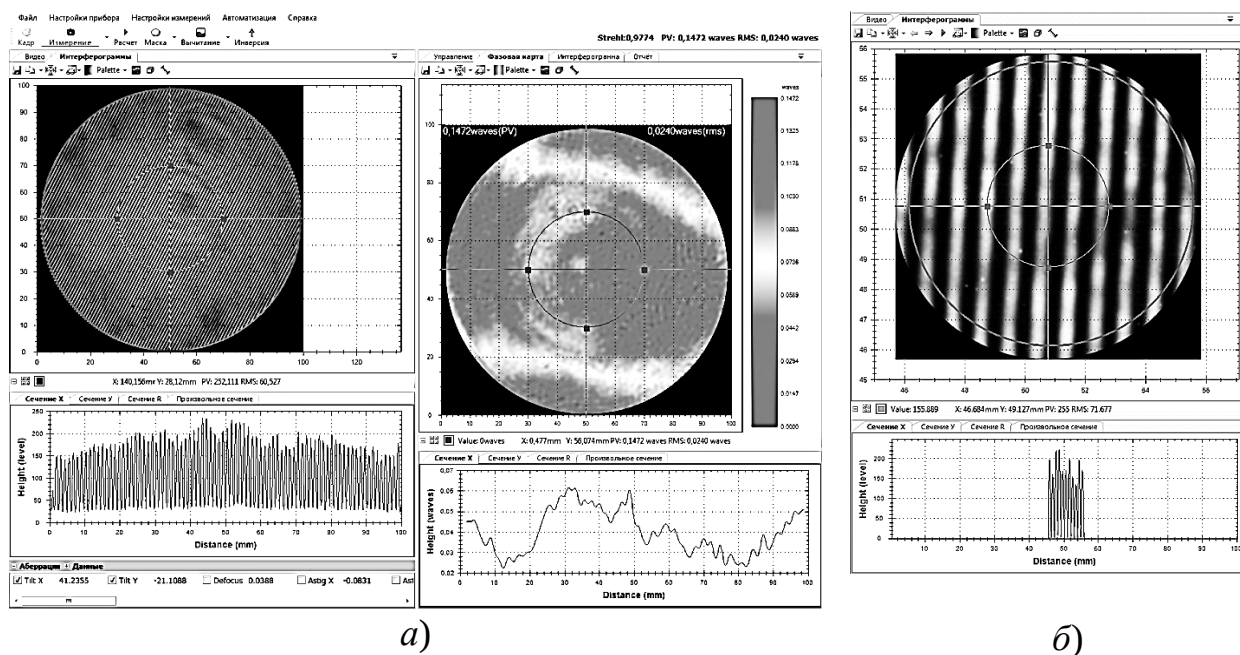


Рис. 2. Пример измерения плоскостности детали ($\varnothing 100\text{мм}$) ИФ типа ФТИ-100 (а) и интерферограмма увеличенного в 10 раз поля $\varnothing 10\text{ мм}$ (б)

В настоящее время распространены интерферометры, управляемые компьютером по интерфейсу USB. Это удобный вариант управления, если рабочее место оператора находится рядом с интерферометром. Если интерферометр не может быть рядом с оператором (например, установлен в «чистой» комнате или опасной зоне) необходимо использовать сетевые интерфейсы связи типа

Ethernet. Прибором, поддерживающим работу в распределённых корпоративных сетях стандарта 1 Gb Eth, является интерферометр ФТИ-100, что обеспечивает встраивание в уже существующую сетевую инфраструктуру без установки дополнительного оборудования. Кроме того, интерферометр ФТИ-100 поддерживает коллективный доступ к любым поддерживаемым функциям из любой точки сети, что упрощает его использование в условиях современного оптического производства.

Оптическая схема обычного ИФ (рис. 1, а) имеет много общего со схемой автоколлиматора. Реализация функции измерения угла отклонения контролируемой поверхности очень важна при использовании СГ для контроля АП. СГ весьма чувствительны к погрешности их установки на выходе ИФ. Для точной установки СГ обычно применяют дополнительные кольцевые голограммы, которые формируют автоколлимационное изображение. Однако эти голограммы занимают часть площади и уменьшают размер основной СГ. В ИФ ФТИ-100 реализована функция фотоэлектрического автоколлиматора, позволяющая с достаточно высокой точностью проводить юстировку плоскости СГ [7]. На рис. 3 приведены изображения с наводочной видеокамеры прибора при увеличении $V=1$ (а) и $V=8$ (б). Диапазон контроля углового смещения составляет $\pm 1.5^\circ$ (рис.3а), при погрешности около $10''$ (рис. 3, б).

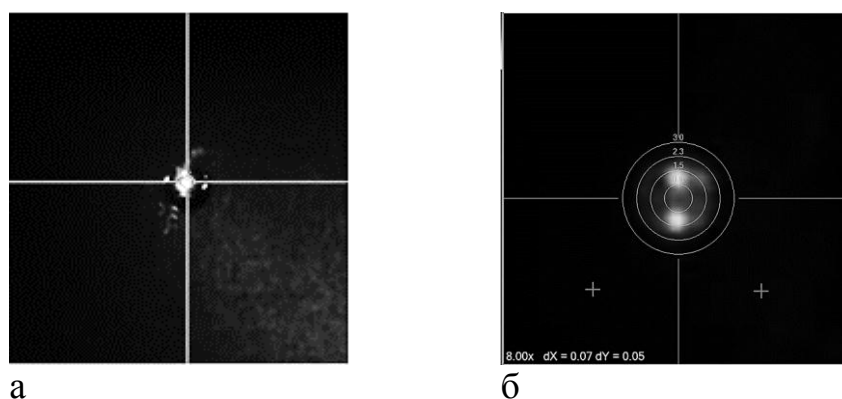


Рис. 3. Изображения с наводочной видеокамеры прибора при увеличении $V=1$ (а) и $V=8$ (б)

На этапе юстировки интерферометра, наводочная видеокамера регистрирует излучение в виде двух пятен (одно пятно от эталонной, а второе от контролируемой поверхностей) в плоскости диафрагмы (рис. 3, б). При точной настройке интерферометра они должны попасть в центр диафрагмы. Изображение этих световых пятен наблюдается оператором, а также передается в блок обработки изображения, где вычисляются координаты их центров и текущая погрешность наводки. Если блок юстировки эталонной пластины снабжен моторизованными микровинтами, возможен режим автоматической юстировки.

Представлены результаты разработки и исследования простого и компактного лазерного ИФ с фазовым сдвигом для высокоточного контроля оптиче-

ских поверхностей. Предложенный ИФ сочетает в себе функции интерферометра и фотоэлектрического автоколлиматора, что позволяет с высокой точностью проводить юстировку эталонных СГ и автоматизировать процесс настройки. Разработано оригинальное программное обеспечение для управления прибором и анализа интерферограмм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М. Машиностроение. 1985.
2. Poleshchuk A.G., Nasyrov R., Asfour J-M.. Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces//Optics Express, 2009, **17**, Issue 7, 5420-5425.
3. Полещук А.Г., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н.. Интерферометр Физо с дифракционными эталонными сферами для контроля асферической оптики//Сборник трудов 12-ой Международной конференции “Голография ЭКСПО -2015” (12 - 15 октября 2015 г., г. Казань, Россия). 2015 г. С. 172-175. М.: Изд-во ООО “Голография-Сервис.
4. http://www.rp-photonics.com/bg/buy_interferometers.html?s=vbox.
5. Groot P., Deck L.. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms//Optics Letters, 1993, **18**, Issue 17, 1462-1464.
6. http://www.esdimetrology.com/pdfs/Mahr-ESDI_MarSurf-FI-2100-AS_OV.pdf
7. Патент РФ № 147271. Интерферометр для контроля формы и углового положения оптических поверхностей. Авторы: А.Г. Полещук и В.Н. Хомутов. Оpubл. 27.10.2014.

© А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, А. Е. Маточкин, Р. К. Насыров, В. В. Черкашин, 2016

ПАССИВНЫЙ РЕТРАНСЛЯТОР ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В данной работе представлены результаты разработки пассивного ретранслятора поверхностных плазмон-поляритонных волн (ППП) на основе периодически расположенных трехмерных диэлектрических кубоидов на металлической пленке. Показано, что предложенная структура позволяет без дополнительного подвода энергии увеличить расстояние распространения PPP волн более чем в два раза.

Ключевые слова: пассивный ретранслятор, поверхностные плазмон-поляритонные волны, фотонная струя.

PASSIVE REPEATER OF SURFACE PLASMON POLARITONS

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

This paper presents the results of the development of passive repeater surface plasmon-polariton waves based on periodically spaced three-dimensional dielectric cuboids on the metal film. It has been shown that the proposed structure allows to increase the distance of propagation-of SPP waves more than twice without any additional power supply.

Key words: passive repeater, surface plasmon-polaritons, photonic jet.

Быстродействие современных вычислительных средств определяется сегодня скоростью обмена данными между ядрами. Однако электрические металлические межчиповые соединения фундаментально ограничены по пропускной способности [1]. Решение этой проблемы сегодня заключается в переходе от электроники к фотонике, а точнее – к нанофотонике [2] – замена электронов на фотоны позволит передавать большие объемы данных между ядрами процессора со скоростью света и выбирать их производительность пропорционально количеству ядер [3]. Однако фотонные компоненты из-за фундаментальных зако-

нов дифракции нельзя уменьшать слишком сильно – их размер не может быть меньше величины порядка длины волны света. Кроме того, уменьшение размеров оптических компонентов сталкивается с проблемой преодоления дифракционного предела.

Эту фундаментальную проблему можно решить переходом от объемных волн к поверхностным волнам, так называемым поверхностным плазмон-поляритонам (ППП), которые основаны на процессах взаимодействия электромагнитного излучения и электронов проводимости на металлических поверхностях, что позволяет превзойти дифракционный предел классической оптики, и работать в оптическом ближнем поле с субволновыми размерами, создавая нанометровые устройства (~ 10 нм), одновременно обладающих высоким быстродействием (~ 10 ТГц).

Так, длина волны поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося вдоль металлической поверхности, есть

$$\lambda_{SPP} = \frac{2\pi}{k_x} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_1' + \epsilon_2}{\epsilon_1' \epsilon_2}} \lambda. \quad (1)$$

При этом важной проблемой является увеличение расстояния, на которое распространяются поверхностные плазмон-поляритоны. Однако поскольку максимальное быстродействие и минимальный размер устройств в различных технологиях определяются свойствами используемых материалов, главным препятствием на этом пути является поглощение поверхностных плазмон-поляритонов в металле. Вследствие сильного поглощения ППП обладают слишком сильным затуханием. Так, расстояние, на котором поле затухание волны ППП изменяется в $1/e$ раз, может быть определено как [4]:

$$L_{SPP} = \frac{1}{k_x''} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_1' + \epsilon_2}{\epsilon_1' \epsilon_2}} \frac{4\epsilon_1'(\epsilon_1' + \epsilon_2)}{\epsilon_1'' \epsilon_2} \frac{\lambda}{4\pi}, \quad (2)$$

а интенсивность

$$L_{INT} = \frac{1}{2k_x''} \approx \frac{L_{SPP}}{2}.$$

Принципиально потери можно компенсировать, закачивая дополнительную энергию в ППП. Однако такой подход создает дополнительное тепловыделение, которое приведет к росту температуры самих плазмонных компонентов и является энергоемким.

В настоящее время создано несколько устройств, позволяющих управлять распространением ППП. Так, например, в [5] описана призма для поверхностных плазмон-поляритонов. Такое устройство позволяет отклонять ППП пучек, но не позволяет сфокусировать его в локальную область пространства при малом расстоянии транспортировки ППП, не превышающим (2). В [6] описано устройство для сфокусировки падающей на диэлектрический микродиск ППП

волны в локализованную область пространства. Длина области фокусировки (локализованной области пространства) составляет не более 1-3 длин волн, а поперечный размер области фокусировки имеет субволновое значение. Однако в подобных устройствах расстояние, на которое возможна транспортировка ППП принципиально ограничена длиной фотонной струи (ФС) ППП и не превышает нескольких длин волн.

В последнее время были предложены и экспериментально исследованы в качестве альтернативной структуры для получения ФС на суб-ТГц частотах 3D диэлектрические кубоиды [7,8]. Было показано, что 3D диэлектрические кубоиды [9] и полусферы [10] могут работать в режиме «на отражение» [9,11]. Кроме того, было сообщено, что эта структура может быть использована в качестве волновода путем создания простой периодической матрицы 3D диэлектрических прямоугольных параллелепипедов, разделенных воздушным промежутком [12].

На основе упомянутых выше работ, в [13] мы сообщили о разработке плазмонного волновода, состоящего из периодически расположенных 3D диэлектрических кубоидов на поверхности металлической пленки, возбуждаемых ППП. Такой волновод способен почти вдвое по сравнению с (2) увеличить расстояния распространения ППП волн на телекоммуникационной длине волны $\lambda_0=1550$ нм (здесь λ_0 — длина волны в свободном пространстве, $\lambda_0>\lambda_{\text{сpp}}$). Структура представляла собой периодически размещенные 6 прямоугольных параллелепипедов с воздушным промежутком между ними. Были изучены характеристики нового типа плазмонного волновода, когда высота кубоидов изменялась от $0,05\lambda_0$ до $0,16\lambda_0$ при различных расстояниях между кубоидами. Было показано, что наилучшие характеристики с точки зрения увеличения длины распространения ППП достигаются при высоте кубоидов $0,08\lambda_0$, и расстоянии между ними $2,5\lambda_0$. В этом случае, расстояние распространения ППП может быть увеличено не менее, чем вдвое (рисунок). Кроме того было показано, что в этом случае обеспечивается субволновая фокусировка вблизи теневой поверхности всех прямоугольных параллелепипедов. Фактически, каждый диэлектрический кубоид в данном случае представлял собой пассивный ретранслятор – усилитель ППП.

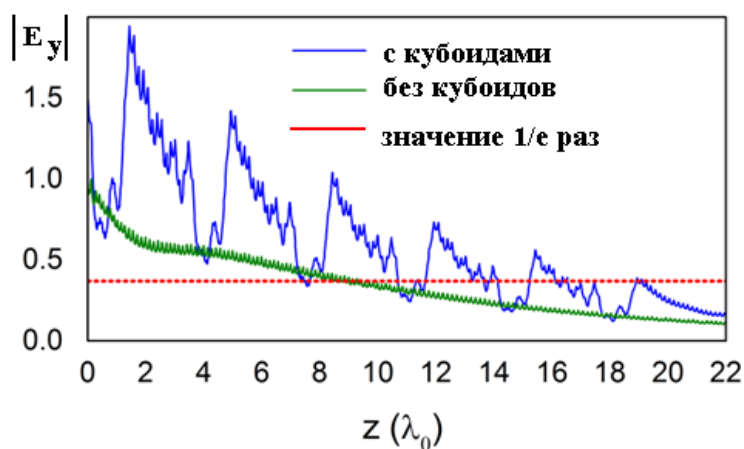


Рис. Распределение нормированной амплитуды поля вдоль направления распространения ППП

Увеличение расстояния распространения ППП вдвое пассивными средствами открывает широкие перспективы использования оптоэлектронных процессоров: от суперкомпьютеров до компактных электронных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D.A.B. Miller, H.M. Ozaktas. Limit to the Bit-Rate Capacity of Electrical Interconnects from the Aspect Ratio of the System Architecture // *Journal Parallel and Distributed Computing* 41, 4252, (1997).
2. Maier S.A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* // Springer Science + Business Media LLC, 2007. - 223 p.; В. Горохов, А.Сидоренко. Нанотехнонаука: взаимное влияние фундаментальных теорий, современного эксперимента и новейших технологий // *Высшее образование в России*, № 10, 130- 143, (2008).
3. L. Pavesi, G. Guillot, *Optical Interconnects: The Silicon Approach* (Springer, 2006)
4. Anatoly V. Zayats, Igor I. Smolyaninov, Alexei A. Maradudin. Nano-optics of surface plasmon polaritons // *Physics Reports*, v.408, p.131–314, (2005).
5. Stefan Griesing, Andreas Englisch, and Uwe Hartmann. Refractive and reflective behavior of polymer prisms used for surface plasmon guidance // *Optics Letters*, V. 33, Issue 6, pp. 575-577, (2008).
6. Ju, D.; Pei, H.; Jiang, Y.; Sun, X. Controllable and enhanced nanojet effects excited by surface plasmon polariton. // *Appl. Phys. Lett.* V.102, 171109, (2013).
7. Pacheco-Peña, V.; Beruete, M.; Minin, I. V.; Minin, O. V. Terajets produced by dielectric cuboids. // *Appl. Phys. Lett.*, 105, 084102 (2014).
8. Pacheco-Peña, V.; Beruete, M.; Minin, I. V; Minin, O. V Multifrequency focusing and wide angular scanning of terajets. // *Opt. Lett.* 40, 245–248, (2015).
9. Минин И. В., Минин О. В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.
10. Minin I.V., Minin O.V., Kharitoshin N.A. Localized high field enhancements from hemispherical 3D mesoscale dielectric particles in the reflection mode // *16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices* June 29 - July 3, 2015.
11. Minin, I. V; Minin, O. V; Pacheco-Peña, V.; Beruete, M. Localized photonic jets from flat , three-dimensional dielectric cuboids in the reflection mode. // *Opt. Lett.* 40, 2329–2332, (2015).
12. Minin, I. V; Minin, O. V; Pacheco-Peña, V.; Beruete, M. All-dielectric periodic terajet waveguide using an array of coupled cuboids. // *Appl. Phys. Lett.* 254102, 1–6, (2015).
13. Victor Pacheco-Peña, Igor V. Minin, Oleg V. Minin and Miguel Beruete. Increasing Surface Plasmons Propagation via Photonic Nanojets with periodically spaced 3D dielectric cuboids // *Photonics*, 2016 (accepted).

© О. В. Минин, И. В. Минин, 2016

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТОК НОЧНЫХ ПРИЦЕЛОВ

Алексей Анатольевич Топорков

АО «Швабе – Оборона и Защита», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2, начальник конструкторского отдела, тел. (383)236-77-52, e-mail: toporkovAA@ponpz.ru

Иван Сергеевич Бутримов

Сибирский филиал федерального казенного учреждения «Научно-производственное объединение "Специальная техника и связь"» МВД России, 630055, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 3, старший научный сотрудник, тел. (383)332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

В статье рассматриваются различные типы прицельных сеток оптических и ночных прицелов, пути повышения точности стрельбы из стрелкового оружия за счет применения оптимальных параметров сеток. Приведены результаты практических исследований различных типов прицельных сеток в ночных прицелах.

Ключевые слова: оптический прицел, сетка прицела, стрелковое оружие.

ANALYSIS OF NIGHT SCOPE RETICLES

Alexei A. Toporkov

JSC «Shvabe – Defense and Protection», 630049, Novosibirsk, D. Kovalchuk St., 179/2, tel. (383)236-77-52, Head of Design Department, e-mail: toporkovAA@ponpz.ru

Ivan S. Butrimov

Siberian Branch of the federal government institutions «Scientific and Production Association "Special equipment and communication"», the Russian Interior Ministry, 630055, Russia, Novosibirsk, Kutateladze St., 3, Senior Research Fellow, tel. (383)332-07-55, e-mail: butrimov@ngs.ru

This paper discusses various types of telescopic sight and night scope reticles, ways to increase small arms shooting accuracy by means of optimum reticle using. Test results for various types of night scope reticles are presented.

Key words: telescopic sight, reticle, small arms.

Современное стрелковое оружие оснащается различными типами оптических прицелов. Одним из основных отличий прицелов друг от друга является вид их поля зрения и прицельной сетки. Прицельная сетка в стрелковых прицелах предназначена для наведения оружия в цель и в общем случае состоит из следующих элементов: прицельных знаков, шкал, вспомогательных линий и дополнительных изображений. Прицельный знак – основной элемент сетки прицела. Он имеет характерную точку, которая при прицеливании совмещается с целью, например: центр перекрестия, вершина угольника, конец вертикального штриха, центр окружности и др. [1]. Именно форма и размеры прицельного знака вызывает наибольшее количество вопросов среди пользователей прицельной техники.

Выбор углового размера прицельного знака не так очевиден как, например, выбор параметров дальномерной шкалы. На размер прицельного знака в первую очередь влияет угловой размер ожидаемой цели. Если видимый размер прицельного знака много больше цели, имеется вероятность того, что цель потеряется под прицельным знаком. И наоборот, если цель слишком велика по сравнению с прицельным знаком, то прицельный знак сам может теряться на ее фоне. При определении угловых размеров прицельного знака и сетки в целом, необходимо учитывать видимое увеличение прицела и размер его поля зрения. При достаточно большом увеличении, например $25\times$, поле зрения прицела будет иметь угловой размер около одного градуса. Соответственно ростовая фигура, имеющая на дальности 200 метров угловой размер $9'\times 30'$, перекроет центральную часть поля зрения. При этом темная прицельная марка на таком фоне не имеет достаточного контраста, что будет затруднять её поиск и прицеливание. Для обеспечения быстрого прицеливания прицельную марку необходимо делать крупнее, например 15 угловых минут. Однако такая увеличенная прицельная марка полностью закроет изображение ростовой фигуры расположенной на дальности 500 м, угловые размеры которой составят $3,6'\times 12'$. Чем шире диапазон дальностей, на которых ведется стрельба, тем глубже противоречие в размерах прицельного знака. Один из путей решения данного противоречия состоит в использовании сеток с тонкими линиями, которые накладываются на изображение цели, не перекрывают её. Минимальная толщина линий образующих прицельный знак рассчитывается исходя из разрешающей способности глаза стрелка. Глаз человека с нормальным зрением в идеальных условиях разрешает контрастную линию размером одна угловая минута. В реальных условиях разрешающая способность глаза может достигать трёх угловых минут. Как правило, трём угловым минутам равна минимальная ширина линий образующих рисунок сетки прицела.

В современных прицелах применяются сотни различных прицельных сеток. Например, в каталоге фирмы U.S.OPTICS представлено 76 типов сеток [2]. Они объединены в 9 групп, по увеличению прицелов в которых установлены. Рисунок сеток усложняется с увеличением кратности прицелов. Весьма лаконичны сетки коллиматорных прицелов: точка, крест, окружность. В поле зрения прицелов с увеличением $4\times$ или $6\times$ появляются вертикальные шкалы углов прицеливания с минимальной ценой деления 2 – 2,5 угловых минуты. В прицелах с увеличением $10\times$ – $25\times$ наиболее широкий выбор сеток, в которых присутствуют, практически, все рассмотренные элементы в самых различных сочетаниях. В прицелах данной группы имеет широкое распространение универсальная сетка Mil-Dot. Прицелы с увеличением $40\times$, $42\times$ имеют крайне узкое поле зрения. Их сетки напоминают сетки прецизионных геодезических приборов – тонкие штрихи, линейные шкалы, минимум цифр и букв.

Важное значение имеет положение прицельного знака относительно границ поля зрения прицела. В центре поля зрения классических оптических систем находится зона наилучшего качества изображения, следовательно, размещение прицельного знака в данной области наиболее предпочтительно. Часть

современных прицелов, в которых ввод углов прицеливания осуществляется путем разворота всей визирной системы прицела, либо его объектива, в полной мере удовлетворяют данному требованию. Классические прицелы, в которых ввод углов прицеливания осуществляется перемещением сетки, либо прицелы с неподвижной сеткой, в которых ввод углов прицеливания обеспечивается нанесением на одной сетке нескольких прицельных знаков, используют не только центральную часть поля зрения, но и его периферию. Такая сетка обеспечивает прицельную стрельбу во всем диапазоне углов прицеливания и боковых поправок за счет нанесения большого количества прицельных знаков, которые несколько затемяют поле зрения прицела, затрудняют наблюдение цели, а также позволяют прицелиться неверно выбранной точкой. В то же время такой способ прицеливания позволяет выбрать угол прицеливания, не отрывая глаз от окуляра, что дает возможность корректировать угол прицеливания по результату стрельбы, не изменяя прикладку. Данные преимущества сетки позволяют увеличить темп стрельбы, что, в некоторых ситуациях, имеет определяющее значение.

Для сравнительной оценки различных типов прицельных сеток было выбрано две пары прицелов. Первая пара – это ночной прицел ПН23-5 с прицельным знаком в виде угольника и аналогичный прицел с сеткой типа Mil-Dot, имеющей прицельный знак в виде перекрестия. Вторая пара – ночной прицел ПН23 с сеткой, имеющей прицельный знак в виде угольника и второй прицел с прицельным знаком в виде точки. Принципиальным отличием по оптическим характеристикам прицелов ПН23-5 и ПН23 является видимое увеличение: 5 и 3 крата, соответственно. Во всех прицелах установлены одинаковые типы электронно-оптических преобразователей (ЭОП), что исключает неоднозначность оценок, связанных с конструктивными особенностями применяемых ЭОП. Внешний вид прицелов показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид прицелов: ПН23-5 (слева) и ПН23 (справа)

Вид поля зрения прицелов показан на рис. 2. На данном рисунке сетки ночных прицелов показаны на фоне мишени «грудная фигура», расположенной на дистанции 100 м.

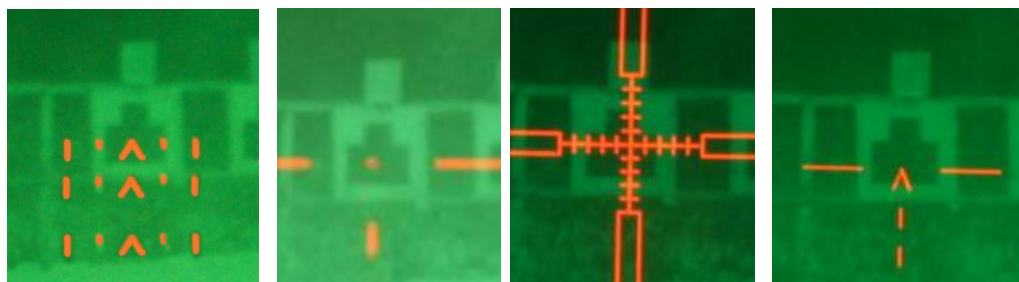


Рис. 2. Вид поля зрения прицелов, слева направо: угольник (ПН23), точка (ПН23), Mil-Dot (ПН23-5), угольник (ПН23-5)

На рис. 2 показано поле зрения ночного прицела ПН23-5 с сеткой Mil-Dot. Деление сетки выполнено тонкими штрихами, а не эллиптическими точками, как в большинстве импортных прицелов. Данное решение позволило использовать сетку типа Mil-Dot в прицеле с небольшим увеличением $5\times$. Такая сетка получила рабочее название – мил-штрих.

В ходе практических исследований была поставлена задача: оценить влияние типа сетки в ночных прицелах на точность их наведения и характеристики стрельбы из стрелкового оружия типа автомата АК-74.

Первый этап исследований выбранных прицелов заключался в определении погрешности их визирования в лабораторных условиях с использованием оптико-электронного стенда «Насадка» [3–5].

Эксперимент проводился в следующем порядке. Оружие, оснащенное исследуемым прицелом, закреплялось на опорах оптико-электронного стенда. В первой фокальной плоскости коллимационно-измерительного блока стенда, установленного перед оружием с прицелом, располагался визирный знак в виде квадрата с угловыми размерами сторон $4'$. На оружии жестко закреплялся лазер, формирующий световой луч однозначно связанный с линией визирования контролируемого прицела. Лазерный луч ориентировался таким образом, чтобы он гарантированно попадал в объектив коллимационно-измерительного блока при незначительных смещениях, вызванных погрешностью наведения прицела. Во второй фокальной плоскости коллиматора, образованной светоделительной призмой, устанавливался позиционно-чувствительный фотоприёмник на основе ПЗС-матрицы, служащий для фиксации координат лазерного пятна. Наведение прицельного знака в центр визирного знака осуществлялось путём изменения углового положения оружия с прицелом и лазером при помощи соответствующих механизмов наведения из состава оптико-электронного стенда. Таким образом, при отклонении прицельного знака относительно центра визирного зна-

ка коллиматора будут пропорционально изменяться координаты лазерного пятна в плоскости позиционно-чувствительного фотоприёмника.

Измерения проводились сериями по 15 наведений для каждого наименования прицела и типа прицельной сетки. Затем осуществлялась статистическая обработка результатов измерений и определение среднеквадратического отклонения по каждой координате. Результаты измерений и обработки их результатов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки погрешности визирования для прицельных знаков различного типа в лабораторных условиях

Среднее квадратическое отклонение	ПН23 (угольник)	ПН23 (точка)	ПН23-5 (мил-штрих)	ПН23-5 (угольник)
По горизонту	19,7"	19,3"	9,3"	8,0"
По вертикали	21,9"	20,5"	9,6"	9,6"
Среднее по двум направлениям	20,8"	19,9"	9,5"	8,8"

Из табл. 1 следует, что погрешность визирования, определённая в лабораторных условиях, мало зависит от типа прицельного знака (среднее по двум координатам – 20,8" и 19,9", 9,5" и 8,8"), а зависит преимущественно от видимого увеличения исследуемого прицела – более, чем в два раза.

Второй этап исследований заключался в практическом определении влияния конфигурации сетки на результаты кучности стрельбы из стрелкового оружия. Стрельба велась из автомата АК-74 сериями по 15 одиночных выстрелов, каждая, по мишеням в виде контрастного квадрата с размерами сторон 12×12 см, расположенным на дистанции 100 м. Угловой размер мишени равнялся угловому размеру визирного знака опико-электронного стенда «Насадка» и соответствовал угловому размеру мишени в виде грудной фигуры, удалённой на расстояние 400 м. В качестве стрелка-испытателя привлекался подготовленный стрелок, с устойчивыми навыками прицельной стрельбы.

Результаты кучности стрельбы из автомата АК-74 с прицелами показаны на рис. 3 и приведены в табл. 2.

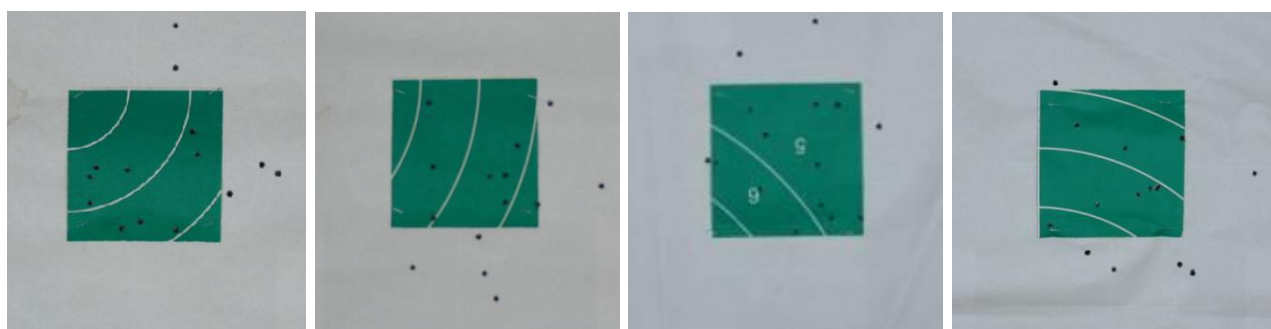


Рис. 3. Результаты кучности стрельбы из АК-74, слева направо: угольник (ПН23), точка (ПН23), мил-штрих (ПН23-5), угольник (ПН23-5)

**Результаты оценки кучности стрельбы используя прицелы
с различными типами прицельного знака**

Среднее квадратическое отклонение	ПН23 (угольник)	ПН23 (точка)	ПН23-5 (мил-штрих)	ПН23-5 (угольник)
По горизонту	96,9"	101,7"	104,8"	99,6"
По вертикали	101,9"	94,1"	87,9"	100,0"
Среднее по двум направлениям	99,4"	97,9"	96,4"	99,8"

Из табл. 2 следует, что значения среднего квадратического отклонения рассеивания пуль, полученные для различных вариантов прицелов и прицельных сеток, отличаются друг от друга незначительно в пределах погрешности измерений и обработки экспериментальных данных.

Сравнивая соответствующие значения среднеквадратических отклонений результатов лабораторных (таблица 1) и стрельбовых (таблица 2) исследований видно, что погрешность визирования в 5 – 10 раз меньше суммарного рассеивания пробоин при стрельбе. Принимая во внимание, что суммарное рассеивание состоит из погрешности визирования и естественного рассеивания пуль, можно заключить, что погрешность визирования практически многократно перекрывается естественным рассеиванием пуль при стрельбе из АК-74 [6].

Таким образом, анализ результатов проведенных лабораторных и полигонных экспериментов показал, что тип прицельной сетки (угольник точка, перекрестие) не оказывает существенного влияния на показатели кучности стрельбы из АК-74 с ночными прицелами по типовым целям, т.к. естественное рассеивание пуль значительно превышает погрешность визирования всеми рассмотренными выше типами прицельного знака. При выборе прицельной сетки на практике должны приниматься во внимание в первую очередь следующие факторы:

- предполагаемая дальность эффективной стрельбы;
- угловые размеры и тип вероятной цели;
- уровень подготовки стрелка;
- характеристики кучности стрелкового оружия;
- ожидаемая тактическая обстановка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Топорков А. А., Бутримов И. С. Совершенствование прицельных сеток перспективных оптических и ночных прицелов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015». Т. 2. – С. 121–126.

2 U.S. OPTICS Reticle Handbook [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.usoptics.com.

3 Бутримов, И. С., Айрапетян В. С. Оптико-электронное устройство для контроля параметров прицельной техники // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. :

сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т.2. – С. 139–144.

4 Устройство для контроля положения линии визирования прицелов: пат. 2536570 Рос. Федерация : МПК F41G 1/54, G02B 23/00 // Бутримов И. С., Аксенов В. А., Топорков А. А.; заявитель и патентообладатель ФКУ НПО «СТиС» МВД России. – 2013128789/12, заявл. 24.06.2013 ; опубл. 27.12. 2014, Бюл. № 36.

5 Бутримов И. С., Шлишевский В. Б. Определение положения линии визирования прицельных устройств с исключением ошибки оператора // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 6. – С. 478–484.

6 Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибра 5,45 и 7,62 мм: М., Воен. изд-во м-ва обороны СССР, 1977. – 262 с.

© А. А. Топорков, И. С. Бутримов, 2016

АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТ

Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sssc.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, зав. лабораторией, тел. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, научный сотрудник, тел. (383)306-28-20, e-mail: jeero@mail.ru

Галина Федоровна Седухина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sssc.ru

Приводятся краткое обоснование и характеристика созданной авторами акустооптической информационной системы инфранизких частот. Приводятся результаты натурных экспериментов по сравнительной регистрации акустических колебаний акустическими и лазерными приемниками.

Ключевые слова: акустические колебания, акустооптическая система, инфранизкие частоты, сейсмический вибратор, лазерная измерительная линия, натурные эксперименты.

ACOUSTO-OPTICAL INFRA-LOW FREQUENCY INFORMATION SYSTEM

Marat S. Hayretdinov

Institute of calculus mathematics and mathematical geophysics of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Akademik Lavrentiev Prospect, chief researcher, tel. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sssc.ru; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks pr., 20, D. Sc.

Boris V. Poehler

Institute of laser physics of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 15b Akademik Lavrentiev Prospect, head of the laboratory, tel. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, K. Marks pr., 20, D. Sc.

Alexander V. Britvin

Institute of laser physics of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 15b Akademik Lavrentiev Prospect, research associate, tel. (383)306-28-20, e-mail: jeepo@mail.ru

Galina F. Sedukhina

Institute of calculus mathematics and mathematical geophysics of the Siberian office of the Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Akademik Lavrentiev Prospect, research associate, tel. (383)330-87-43, e-mail: galya@opg.sccc.ru

The short characteristic created by authors of ultralow frequencies acousto-optic systems is resulted. Results of natural experiments on comparative registration of acoustic oscillations by acoustic and laser s of receivers are resulted.

Key words: acoustic oscillations, acousto-optic system, ultralow frequencies, seismic vibrator, laser measuring line, experimental works.

Вопросы акустооптического взаимодействия имеют давнюю историю и связаны они в основном с изучением дифракции света в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах [1-3]. При этом практически неисследованными остаются вопросы акустооптического взаимодействия в области инфранизких частот. Это обусловлено отсутствием специальных акустических излучателей в этом диапазоне частот. В тоже время сегодня существуют сейсмические вибраторы, которые способны наряду с сейсмическими волнами в земле излучать инфранизкочастотные акустические колебания в атмосфере. К ним, в частности, относятся центробежные вибраторы ЦВ-100 и ЦВ-40 [4]. Акустические колебания от них регистрируются на удалениях в несколько десятков километров. Несомненно, это открывает возможности проведения экспериментальных исследований по акустооптическим взаимодействиям в рассматриваемых диапазонах частот. Этим определяется интерес авторов данной работы к проведению исследований по акустооптическим взаимодействиям в инфранизком диапазоне частот.

В основе регистрации акустических колебаний в атмосфере с помощью лазерного луча лежат процессы, связанные с волновым возмущением лазерного излучения внешним акустическим полем. Возмущенная атмосфера в локальных точках пространства обуславливает изменение параметров распространения лазерного излучения, включая характеристики поглощения и рассеяния. Следствием этого могут быть вариации скорости распространения световых волн, их фазо-частотных характеристик, определяющих возможности «лучевого приема» акустических колебаний. Условия осуществимости такого приема, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных колебаний, определяются следующими соотношениями:

$$\nu/\omega \gg c_0/\nu, \quad L/rl \gg 1, \quad \lambda/d > 0,82$$

$$L/\lambda << \begin{cases} c_0^2/c_m v & \text{при } c_0/v \gg 1 \\ c_0^2/c_m v, \quad c_0/(v-c_0) & \text{при } c_0/v < 1 \end{cases},$$

где v, c_0, c_m – угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического измерения скорости распространения колебаний в измерительном луче;

L, d – длина и диаметр измерительного луча;

ω, λ, v – угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний;

rl – радиус пространственной корреляции неоднородностей среды.

Пусть внешнее поле задается в виде плоской синусоидальной волны: $x(t) = A \sin(\omega t - \bar{k} \bar{r})$, где $\bar{r}$ – радиус-вектор, $\bar{k}$ – волновой вектор и $|\bar{k}| = \kappa = \omega/v$. При выполнении условия $\lambda \gg \lambda_0$, где λ_0 – длина волны в измерительном луче, имеет место модуляция скорости распространения измерительной волны: $c(t) = c_0 \pm c_m \sin(\omega t - \bar{k} \bar{r})$. Здесь c_0 – скорость распространения колебаний в измерительном луче при отсутствии возмущений.

Амплитуда волновых возмущений связана с амплитудой A_m изменения параметра, влияющего на скорость распространения в канальных участках луча, соотношением $c_m' = \frac{\partial c(t)}{\partial A} \cdot A_m$.

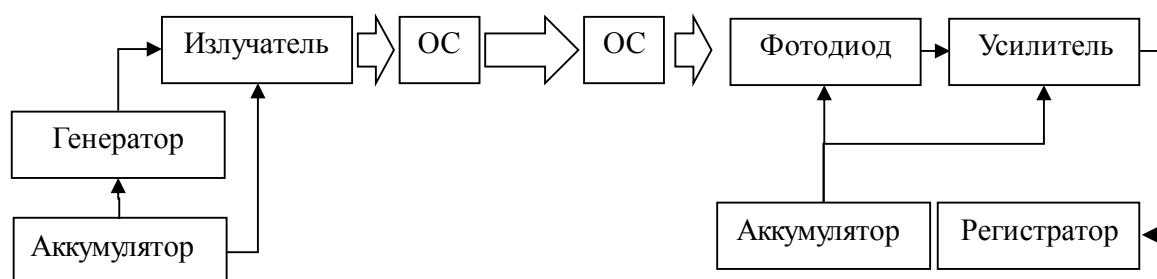
Приведенные соотношения определяют требования к оптимальным условиям регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. Исследование отмеченных характеристик усугубляется влиянием состояния атмосферы, характеризующейся атмосферным давлением, температурой, концентрацией частиц и др. В этих условиях важное значение приобретают экспериментальные исследования.

Для проведения исследований авторами создан макет акусто-оптической информационной системы (рис. 1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя), оптического стенда, включающего в себя лазерного излучателя и приемника лазерного излучения.

Дополнительно включены комплекс многоканальной цифровой регистрации сейсмических и акустических сигналов с помощью сейсмо- и акустических датчиков, научная метеостанция «Oregon» модели LW301. Основные предпосылки к созданию подобной системы обусловлены методикой проведения экспериментальных работ, предусматривающей выполнение строго повторяющихся во времени актов излучения и регистрации акустических колебаний с учетом влияния метеопараметров в окружающей атмосфере. Структура оптического стенда регистрации сигналов представлена на рис. 2.



Рис. 1. Компоненты акустооптической системы



ОС – оптическая схема

Рис. 2. Структурная схема оптического стенда

Генератор формирует последовательность управляющих электрических импульсов с заданными частотой, длительностью и током. Сигналы подаются на излучатель для формирования оптических импульсов (рис. 3).

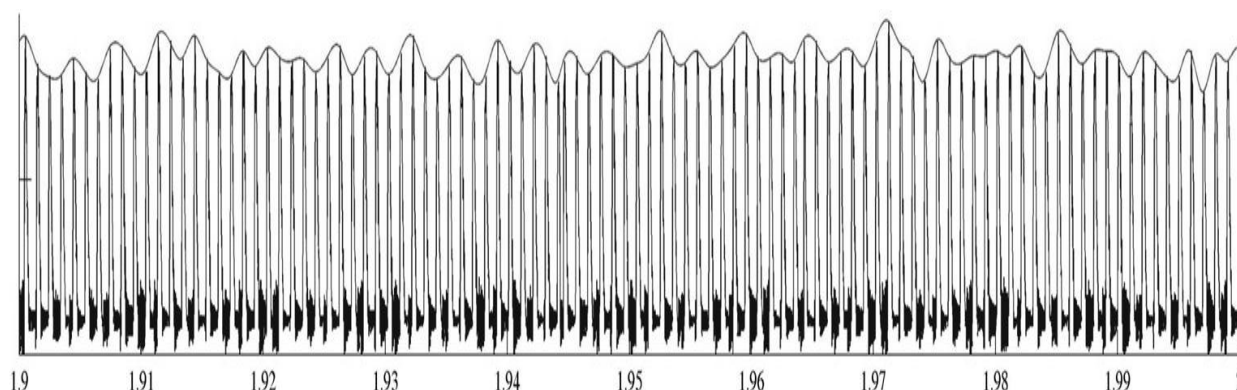


Рис. 3. Запись оптического сигнала с несущей 1 кГц, модулированного по амплитуде акустическим сигналом и внешним шумом

В экспериментах в качестве лазерного излучателя использовался лазерный диод ИЛПИ-107 с длиной волны 850-930 нм, мощностью излучения до 6 Вт, частотой повторения импульсов 1 кГц, расходимостью излучения по углу 5° . Приемник излучения собран на основе фотодиода КФД-113А2, имеющего спектральный диапазон от 400 до 1100 нм, чувствительность в рабочем диапазоне 0,5 А/Вт, эффективная фоточувствительная площадь фотодиода $2,75 \text{ мм}^2$, коэффициент усиления операционного усилителя 10 000, собирающая излучение линза диаметром 38 мм и фокусным расстоянием 28 мм. Регистрация сигнала осуществлялась USB осциллографом-приставкой АСК-3116 (Фирмы Актакон) с записью файлов на компьютер. С помощью акустосейсмического комплекса оцениваются уровни акустического давления, вносимого акустическими излучателями вдоль трассы прокладки лазерной измерительной линии, а также скорости сейсмических колебаний. Для учета влияния метеопараметров на распространение акустических и световых волн осуществляется регулярный контроль направления и скорости ветра, температуры и влажности окружающего воздуха, а также атмосферного давления.

С помощью созданной акустооптической системы были выполнены полевые эксперименты по регистрации, обработке и анализу результатов акустооптических взаимодействий. Частный пример регистрации монохроматических акустических колебаний от вибратора ЦВ-40 на частотах 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5 Гц с использованием высокоразрешающей спектральной обработки представлен на рис.4; в верхней части рисунка представлены спектры с выходов трех акустических датчиков, последовательно расположенных с шагом 50 м; в нижней части – спектры на выходе лазерной измерительной линии. Результаты соответствуют расстоянию «излучатель-приемник» 920 м, базе лазерного луча

302 м, скорости ветра 7 м/с (ветер навстречу фронту распространения волны от источника).

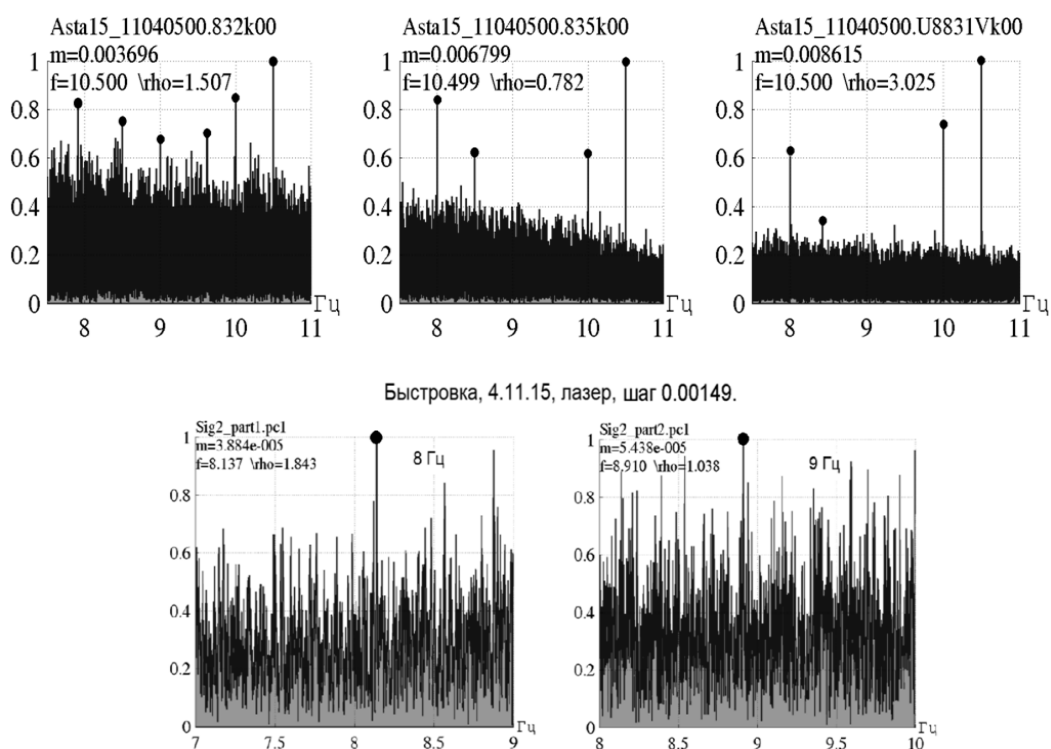


Рис. 4. Быстровский полигон: спектры акустических и оптических сигналов

Предварительные эксперименты с лазерной линией позволили уточнить статистические характеристики фоновых помех в атмосфере и собственных шумов фотоприемника для подготовки последующих измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корпел А. Акустооптика- Acousto-optics – М.: Мир, 1993.
2. Дамон Р., Мэлон В., Мак-Магон Д. Взаимодействие света с ультразвуком: явление и применение // Физическая акустика. – М.: Мир, 1974. – Т.7.
3. Такер Дж., Рэмpton В. Гиперзвук в физике твердого тела. – М.: Мир, 1975.
4. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004. – 387с.

© М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Г. Ф. Седухина, 2016

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫМИ СТРУКТУРАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ НА ПОДЛОЖКАХ

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Евгений Владимирович Лаптев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: genius-1188@yandex.ru

На принципах Z-сканирования разработаны методика и экспериментальный стенд для исследования эффектов ограничения импульсного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона в тонкопленочных дифракционных структурах из диоксида ванадия различного стехиометрического состава на кварцевых подложках.

Ключевые слова: оптические затворы, нелинейный оптический эффект, ограничители излучения, диоксид ванадия.

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE FOR INVESTIGATIONS OF THE EFFECTS OF LIMITING POWERFUL PULSE OF LASER RADIATION DIFFRACTION STRUCTURES FORMED IN THIN FILMS OF VANADIUM DIOXIDE ON SUBSTRATES

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associated Professor, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associated Professor of Physics department, tel. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Evgeniy V. Laptev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., engineer of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

The method and experimental equipment for study of the effects of the limitations of pulsed laser radiation in the near-infrared range by using diffractive structures in thin films of vanadium

dioxide with different stoichiometric composition on a quartz substrate based on the principles of Z-scan developed.

Key words: optical limiters, nonlinear optical effect, limiting radiation, vanadium dioxide.

Работы в области создания средств защиты наблюдательных устройств и глаз наблюдателей от поражающего воздействия мощного лазерного излучения ведутся уже длительное время [1-3], но известные устройства, например, ограничители излучений на основе фуллерен-содержащих сред, имеют ряд недостатков, среди которых можно отметить проблемы в создании средств защиты в ИК-диапазоне спектра и защиты от лазерных импульсов с большой частотой следования. Актуальными являются исследования ограничителей лазерного излучения на основе использования фазовых переходов в плёнках диоксида ванадия [4-7], и других подобных материалов, возникающих под действием нагревания лазерным импульсом.

Исследуемый в настоящей работе тонкоплёночный ограничитель выполняется в виде периодической решетки на прозрачной для лазерного излучения подложке, решетка, выполненная из диоксида ванадия, в момент фазового перехода плёнки становится металлоподобным сеточным фильтром, отражающим длинноволновое излучение с длиной волны, большей периода сетки.

В настоящее время практическое использование уже получили электронные и оптические компоненты на основе диоксида ванадия, в числе которых можно указать терморезисторы, оптические переключатели, модуляторы, управляемые лазерные зеркала, а также энергосберегающие оптические покрытия для оконных стекол [4–7]. Изменения оптических характеристик в кристаллическом VO_2 обусловлены фазовым переходом полупроводник–металл, происходящим при температуре 69 °С. Амплитуда указанных изменений в аналогичных пленках VO_2 в значительной мере определяется физико-химическими характеристиками получаемых слоев [8]. Быстрый фазовый переход (порядка 100 фс) в диоксиде ванадия под воздействием лазерного излучения указывают на его электронный механизм. Фазовый переход в диоксиде ванадия сопровождается возникновением заметных упругих напряжений, обусловленных скачкообразным изменением кристаллической структуры материала при фазовом переходе, которые из-за малой пластичности VO_2 приводят к разрушению монокристаллических образцов при термоциклировании. По этой причине значительная доля исследований и большинство практических применений диоксида ванадия связаны с тонкими пленками, которые не разрушаются при неограниченном числе термоциклов вблизи температуры фазового равновесия [9]. Поэтому, наибольшие перспективы практического использования (в качестве оптических лимитеров) имеют почти исключительно тонкие пленки VO_2 , которые такого разрушения не испытывают даже при многократных циклических превращениях. Для температурных зависимостей электропроводности и отражательной способности тонких пленок диоксида ванадия в окрестности фазового перехода характерен гистерезис. Форма и температурное положение петли ги-

стерезиса определяются многими факторами, такими как наличие примесей, отклонение стехиометрического состава, относительно большая толщина [10].

Исследование является частью проекта, в рамках которого разрабатывается устройство ограничения мощного излучения, в том числе, в ИК-диапазоне спектра, на принципах нелинейно-оптического увеличения отражающей способности дифракционного тонкоплёночного элемента диоксида ванадия.

Для исследования функциональных характеристик тонкопленочных образцов ограничителей на основе диоксида ванадия нами разработаны методика и оптический стенд для исследования характеристик ограничения излучения, основанный на принципах Z-сканирования [11], заключающихся в том, что исследуемая структура механически перемещается вдоль оптической оси софокусных объективов вблизи их общего фокуса; при перемещении изменяется интенсивность падающего излучения на поверхности структуры без изменения общей мощности падающего излучения. На рис. 1 приведена оптическая схема узла Z-сканирования стенда. С помощью оптического стенда измеряются параметры нелинейности фотоотклика оптических ограничителей. Сборочный чертёж блока приставки Z-сканирования показан на рис. 2.

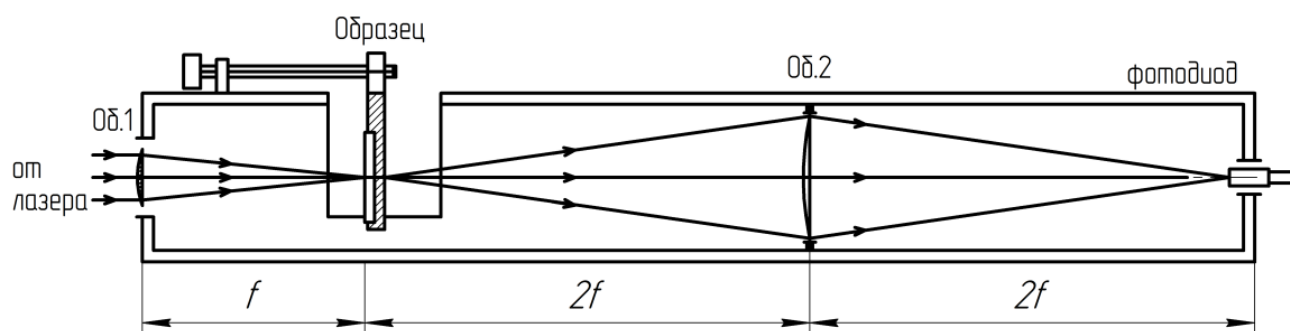


Рис. 1. Оптическая схема блока приставки Z-сканирования

В основе оптической схемы лежит использование двух софокусных объективов *Об.1* и *Об.2* с одинаковыми фокусными расстояниями, равными 35 мм; в области их общего фокуса расположен исследуемый образец, который с помощью регулировочного винта может перемещаться вдоль оптической оси объективов – оси Z. Когда исследуемый образец находится в области общего фокуса объективов, фокальное пятно на его поверхности имеет наименьшие размеры, интенсивность падающего на образец излучения наивысшая. Интенсивность I_x излучения освещённого пятна на поверхности подложки изменяется при удалении образца от области фокуса, на расстояние x от фокуса определяется приближительной формулой:

$$I_x \approx \frac{4P_0}{\pi} \frac{1}{(Dx / f + d)^2}, \quad (1)$$

где d – диаметр фокального пятна, P_0 – мощность падающего на образец излучения, D – диаметр коллимированного лазерного пучка, входящего в объектив Об.1, f – фокусное расстояние объектива.

Прошедшее образец излучение измеряется фотодиодом, помещённым на двойном фокусном от объектива Об.2 расстоянии. Исследуется зависимость интенсивности прошедшего излучения от интенсивности падающего на поверхность образца. Фотография приставки показана на рис. 3.

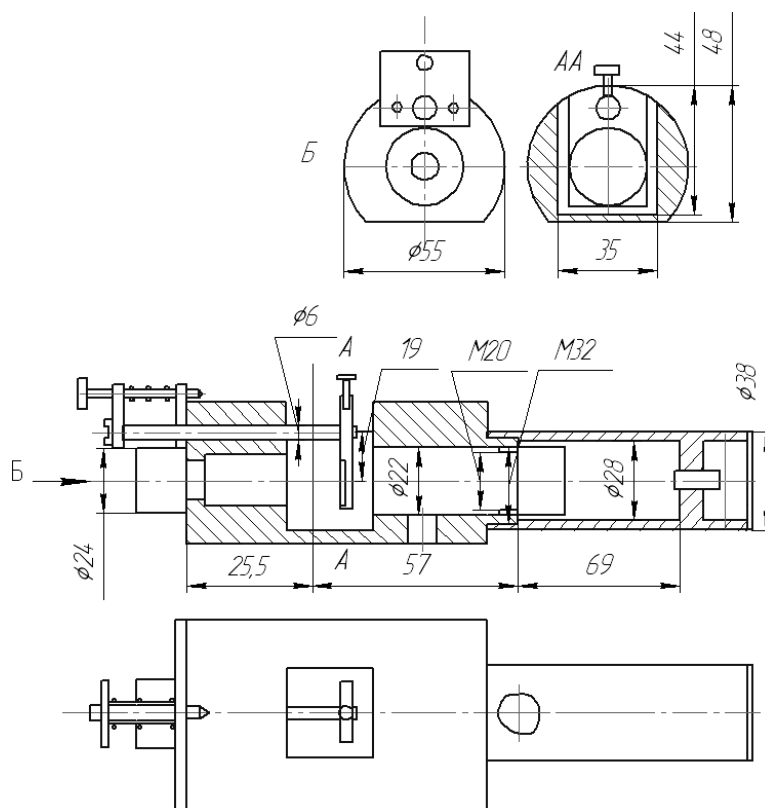


Рис. 2. Сборочный чертёж блока приставки Z-сканирования для исследования ограничителей мощных лазерных излучений



Рис. 3. Фотография оптической приставки Z – сканирования

Изготовленная приставка Z-сканирования характеризуется следующими параметрами: поперечник лазерного пучка (3-5) мм; фокусное расстояние объективов 35 мм; размер облучаемого пятна на поверхности исследуемого образца варьируется от 50 мкм до 2 мм; максимальная расчетная плотность мощности излучения в предположении гауссовского распределения интенсивности в пятне, падающего на образец, в центре пятна составляет $5 \cdot 10^8$ Вт/см²; диапазон изменения плотности мощности при сканировании от $1,6 \cdot 10^5$ Вт/см² до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²; скорость нарастания интенсивности излучения на образце – примерно 10^{20} Вт/(м²·с).

В качестве источника мощного лазерного излучения используется лазер с параметрами: твердотельный лазерный излучатель на иттрий-алюминиевом гранате кристалле ИАГ; длительность импульса около 20 нс, мощность в импульсе порядка 5 кВт на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм, частота следования импульсов равна (1-100) Гц.

Методика исследования заключается в следующем. Прошедшее исследуемый ограничитель излучение фокусируется объективом Об.2 в плоскости фотодиода, где регистрируется; измеряется зависимость интенсивности прошедшего излучения от интенсивности падающего. Полученная зависимость позволяет установить порог срабатывания ограничителя, уровень ограничения интенсивности прошедшего к фотоприёмнику излучения, оценить постоянную времени срабатывания ограничителя. Стенд также может позволить измерять критическую для ограничителя интенсивность падающего излучения, приводящего к разрушению ограничителя.

По оценкам, метод способен выявить отклонения от стехиометрии пленок диоксида ванадия, путем пересчета температуры фазового перехода, через зарегистрированную плотность мощности падающего излучения, в момент срабатывания ограничителя.

Работы проведены в рамках выполнения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых ГК № МК-3705.2015.10.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Шлишевский В. Б. Пленочные пассивные оптические затворы для защиты приемников изображения от ослепления // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 6. – С. 39–46.
2. Применение термоиндуцированных наноразмерных поверхностных деформаций для ослабления импульсных световых потоков / Н. В. Прудников, В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, С. Л. Шергин, В. Б. Шлишевский // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 2. – С. 36–41.
3. Шергин, С. Л. Разработка принципов создания термооптических затворов с тонкопленочными металлическими структурами: дисс. канд. техн. наук : 01.04.05 / С. Л. Шергин. – Новосибирск, 2009. – 131 с.
4. Токоуправляемые пространственные модуляторы света на основе VO₂ для среднего ИК диапазона / О. Б. Данилов, О. П. Коновалова, А. И. Сидоров, И. И. Шагано // ПТЭ. – 1995. – № 4. – С. 121–125.

5. Коновалова О. П., Сидоров А. И., Шаганов И. И. Интерференционные системы управляемых зеркал на основе VO_2 для спектрального диапазона 0,6–10,6 мкм // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66, № 5. – С. 13–21.
6. Особенности работы болометра на основе пленки диоксида ванадия в интервале температур, включающем фазовый переход / В. Ю. Зеров, Ю. В. Куликов, В. Г. Маляров, И. А. Хребтов, И. И. Шаганов // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66, № 5. – С. 8–12.
7. Jerominek H., Picard F., Vincent D. Vanadium oxide films for optical switching and detection // Opt. Engin. – 1993. – V. 32, № 9. – P. 2092–2098.
8. Синтез пленкообразующих материалов из оксидов ванадия и исследование возможностей получения на их основе оптических покрытий / В. В. Кириленко, Б. М. Жигарновский, А. Г. Бейрахов, И. П. Малкерова, А. В. Михайлов, И. И. Шаганов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 9. – С. 75–87.
9. Электрические и оптические явления в диоксиде ванадия вблизи фазового перехода полупроводник – металл / А. В. Ильинский, В. А. Климов, С. Д. Ханин, Е. Б. Шадрин // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2006. – Т. 6, № 15. – С. 100–120.
10. Андреев В. Н., Климов В. А. Влияние деформации на фазовый переход металл-полупроводник в тонких пленках диоксида ванадия // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 3. – С. 538–543.
11. Исследование нелинейно-оптических характеристик различных сред методами z-сканирования и генерации третьей гармоники лазерного излучения / Р. А. Ганеев, Н. В. Каманина, И. А. Кулагин, А. И. Ряснянский, Р. И. Тугушев, Т. Б. Усманов // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 9. – С. 781–788.

© Д. В. Чесноков, С. Л. Шергин, Е. В. Лаптев, 2016

НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ СТЕКЛА

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Екатерина Васильевна Шапран

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, инженер кафедры наносистем и оплотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: katerina.darkness@ya.ru

Рассмотрены научные и технические аспекты развития методов лазерной полировки стекла и проведён сравнительный анализ современных методов лазерной полировки.

Ключевые слова: лазерная полировка, размягчение стекла, шероховатость поверхности, оптические элементы, абляция.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF LASER GLASS POLISHING TECHNIQUES

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associated Professor, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Ekaterina V. Shapran

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., aspirant, engineer of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-91-11, e-mail: katerina.darkness@ya.ru

The scientific and technical aspects of the development of laser glass polishing techniques handled and a comparative analysis of modern laser polishing methods provided.

Key words: laser polishing, glass softening, surface roughness, optical elements, ablation.

Шероховатость поверхности изделия сильно влияет на его свойства и функции – устойчивость к коррозии и истиранию, трибологические свойства, оптические свойства, тактильную чувствительность, а также визуальное впечатление. В промышленном производстве методики шлифовки и полировки широко используются для снижения шероховатости поверхностей.

Современный уровень промышленного производства оптических компонент, основанный на получении гладких поверхностей с использованием полирующих порошков, паст и суспензий, обеспечивает шероховатость оптической поверхности порядка 0,1...0,2 длины волны; в лабораторных условиях с ис-

пользованием уникальных и трудоёмких методов на единичных образцах получают до 0,01 длины волны.

Поиск воспроизводимых методик полирования оптических поверхностей до уровня шероховатости порядка единиц нанометров ведётся. Так, в работе [1] представлены результаты исследования метода ионно-лучевого полирования подложек, особенности которого заключаются в преимущественном осаждении во впадины исходного рельефа поверхности слоя наноразмерной толщины посредством распыления ионами кислорода мишени из одинаковым с образцом материала и ионного ассистирования процессу осаждения; циклы «осаждение – распыление» должны повторяться. На подложках на участках поверхности площадью $2,5 \times 2,5$ мкм максимальная высота выступов не превышала 0,8 нм. Длительность полирования составляла десятки минут.

Предлагается для реализации ионной полировки подложек использовать пучки кластерных ионов, которые получают в специальных ионных ускорителях и которые потенциально способны реализовывать в режиме ионного ассистирования ионную полировку поверхностей подложек до шероховатости порядка 0,2...0,5 нм при исходной шероховатости поверхности порядка 1...2 нм. [2]. Методы ионной полировки, как можно судить по известным публикациям, не обеспечивают необходимой для масштабного производства оптических изделий производительности.

В сравнении с традиционными методами полировки стекла, лазерный луч – это гибкий и быстрый полирующий инструмент. С помощью лазерного излучения можно обработать поверхность стекла в очень короткое время. При начальной величине параметра шероховатости 600 нм можно всего за один цикл (этап) добиться уменьшения шероховатости до величины менее чем 10 нм. Кроме того, появляется возможность преодолеть ограничения, имеющиеся у традиционных методов механической полировки.

Лазерные методы, разработка которых ведется в мире весьма интенсивно [3–37], обеспечивают прецизионное дозирование воздействия на поверхность без механического соприкосновения с ней, обрабатывающим инструментом является поток излучения, что существенно упрощает проблемы обеспечения виброустойчивости при обработках сверхплоских поверхностей. Также лазерная обработка пригодна для обработки изделий из хрупких материалов. Технологии лазерной полировки позволяют производить полировку поверхностей разнообразной геометрической формы, в том числе и асферических поверхностей; предоставляют возможность селективной полировки на выбранном участке поверхности; исключают использование каких-либо полирующих растворов и паст.

Существуют три основных варианта процесса лазерной полировки:

- абляция больших областей поверхности;
- абляция локальных участков поверхности;
- полировка методом переплавки поверхностного слоя материала.

При полировке методом абляции больших областей поверхности материал испаряется по всей поверхности. Таким образом, сглаживание достигается за счет повышенной абляции пиков поверхности и снижения абляции в долинах. Для того чтобы обеспечить наиболее активное удаление материала, лазерная полировка осуществляется с углом падения до 85° с нормалью к поверхности. Дальнейшее уменьшение шероховатости может достигаться путем вращения образца во время обработки.

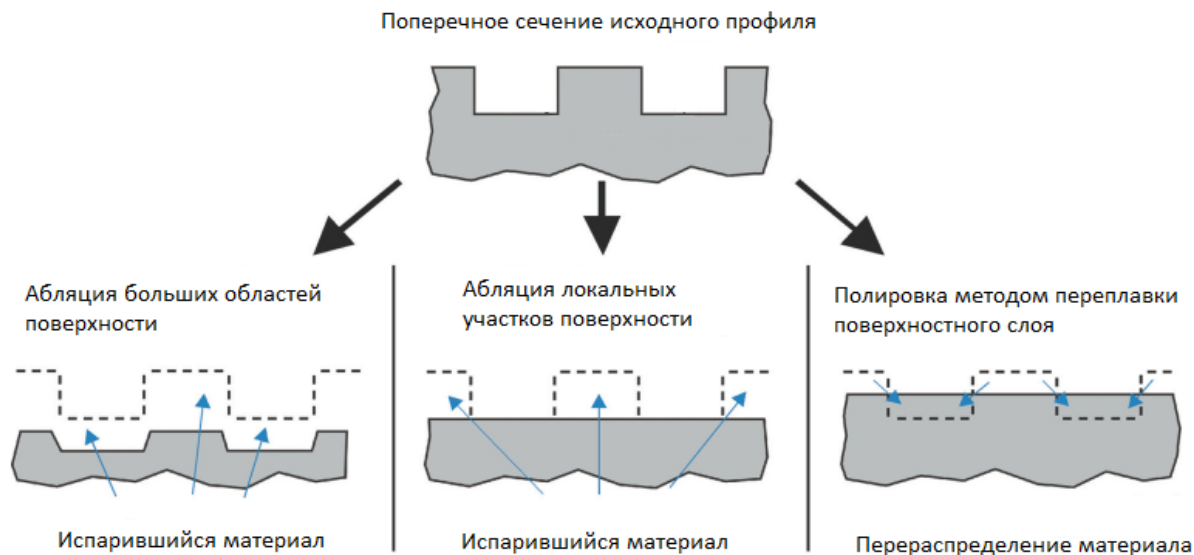


Рис. 1. Схематическое представление различных вариантов процесса лазерной полировки

Абляция локальных участков поверхности основана на контролируемой абляции пиков поверхности при помощи импульсного лазерного излучения. Для того чтобы найти положение пиков профиля поверхности, требуется сложная и дорогостоящая измерительная система.

При полировке с помощью переплавки расплавляется тонкий поверхностный слой и поверхностное натяжение приводит к выравниванию материала. Испарения следует избегать, так как в противном случае материал будет удалён и образуется вмятина. Но температура должна быть достаточно высокой для того, что обеспечить эффективный отток материала от вершин до долин. Таким образом, поверхность должна быть нагрета немного ниже температуры испарения.

В процессе лазерной полировки температура является главным фактором. Вязкость, испарение и натяжение материала зависят от этой величины. Поэтому измерение и контроль температуры являются критичными.

Для того, чтобы избежать трещин может быть необходим предварительный нагрев образца, особенно для стекла с высоким коэффициентом теплового расширения. Для получения хороших результатов полировки, однородное предварительное нагревание является обязательным условием.

Чтобы свести к минимуму возникновение высоких поперечных температурных градиентов на стеклянной поверхности необходимо равномерное распределение интенсивности лазерного луча. Такое распределение обычно получают с помощью подходящей системы интеграции.

Как правило, лазерная обработка поверхности требует приложения большого количества энергии к поверхности и контролируемого и настраиваемого распределения интенсивности пучка на образце поверхности.

На рис. 2, а показан типичный экспериментальный стенд [8] для проведения исследований процессов лазерной полировки. Это портальная система, в которой лазерный луч управляется сочетанием различных зеркал и сканирующих систем. Сканаторы позволяют перемещать луч с максимальной скоростью 3 м/с. В комбинации со специальной системой управления лучом это позволяет вести обработку так называемой «полирующей линией» (далее – ПЛ, рис. 1, с). Для получения равномерной поверхности всего элемента площадью 25х25 мм производится сканирование ПЛ с помощью перемещения по 2-й координате.

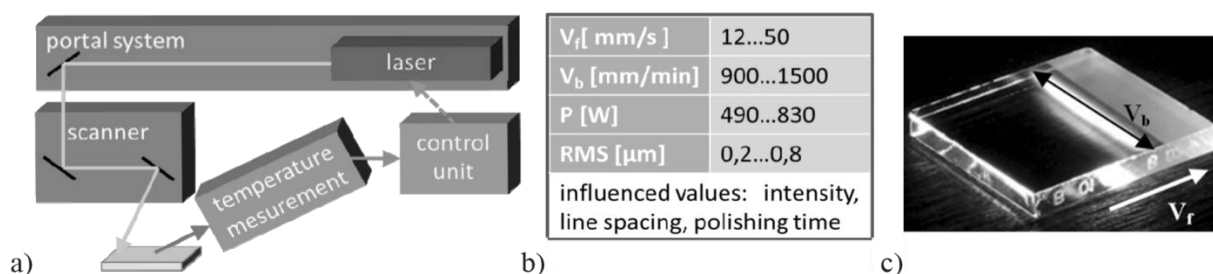


Рис. 2. (а) Схема экспериментального стенда; (б) Диапазон параметров полировки; (с) образец кварцевого стекла в процессе полировки

В работе [10] приведены значения шероховатости поверхности до и после лазерной обработки.

Таблица

Результаты лазерной полировки для различных типов стекла

Тип стекла	Шероховатость до лазерной обработки	Шероховатость после лазерной обработки
Свинцовое стекло	13,3 μm	2,5 μm
Кварцевое стекло	2 μm	50 nm
	150 nm	10 nm
TRC-33	500 nm	1 nm

Из данных таблицы следует, что методы лазерной полировки стекла являются достаточно эффективными, и не уступают в эффективности механическим методам полировки. При этом методы лазерной полировки лишены многих недостатков, присутствующих у механических методов. Следовательно, разработка методов лазерной полировки является актуальной задачей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стогний Ф. И., Новицкий Н. Н., Стукалов О. М. Ионно-лучевое полирование наноразмерного рельефа поверхности оптических материалов. Письма в ЖТФ, 2002, том 28, вып. 1.
2. Черныш В. С., Ермаков Ю. А., Иешкин А. Е. Пучки кластерных ионов – новый инструментарий современной физики. Совместная лаборатория «Ионно-пучковые нанотехнологии» Физический факультет МГУ, НИИЯФ МГУ и ОАО «ТЕНЗОР», Москва, 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opf.nsu.ru/ru/content/сектор-ионно-кластерных-технологий>.
3. Laguarda F., Lupon N., Armengol J. Optical glass polishing by controlled laser surface-heat treatment // Appl. Optics. – 1994. – Vol. 33, No. 27. – P.6508–6513.
4. Vega F., Lupon N., Armengol J., Laguarda F. Laser application for optical glass polishing // Opt. Eng. – 1998. – Vol. 37, No. 1. – P. 272–279.
5. Wang H. et al Laser Polishing of Silica Rods // Proceedings of the Ninth Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium. – 1998. – P. 37–45.
6. Vega F., Armengol J., Lupon N., Laguarda F. Study of Surface Dynamics during Laser Polishing of Glass // Proceedings of the EUROPTO Conference on Computer-Controlled Microshaping. – 1999. – P. 92–102.
7. Richman A., Willenborg E., Wissenbach K. Laser polishing of fused silica // Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. – 2009. – P. 699–702.
8. Hildebrand J. et al. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 452–461.
9. Temmler A., Willenborg E., Wissenbach K. Design Surfaces by Laser Remelting // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 419–430.
10. Wissenbach K. Tailored Light 2. Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen, Germany, 2011.
11. Chow M., Bordatchev E.V., Knopf G.K. Impact of initial surface parameters on the final quality of laser micropolished surfaces // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8248.
12. Fraunhofer ILT - Laser Polishing of Glass and Plastics (2012) [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: <http://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/brochure-Polishing-with-Laser-Radiation.html>
13. Martínez S., Lamikiz A., Tabernero I., Ukar E. Laser Hardening Process with 2D Scanning Optics // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 309–317.
14. Chow M., Bordatchev E.V., Knopf G.K. Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – Vol. 67. – P. 2607–2617.
15. Hafiz, A.M.K. Applicability of a Picosecond Laser for Micro-Polishing of Metallic Surfaces: Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (in Mechanical and Materials Engineering) / Supervisor Dr. O. Remus Tutunea-Fatan, Dr. Evgueni Bordatchev; The University of Western Ontario. – Ontario, 2013. – 191 p.
16. Ukara E., Lamikiza A., Martínez S., Estalayob F., Tabernero I. Laser polishing of GGG70L cast iron with 2D scan-head // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 53–59.
17. Bordatchev E.V., Hafiz A.M.K., Tutunea-Fatan O.R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2014. – Vol. 73. – P. 35–52.
18. Chow M., Bordatchev E.V., Knopf G.K. Impact of Overlapping Trajectories in Laser Micro-Polishing // Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies. – 2014. – P. 174–178.
19. Fraunhofer ILT - Prospects of Laser Polishing for Small and Complexly Shaped Parts (2014) [Electronic resource] – Англ. – Режим доступа: http://www.swissphotonics.net/libraries.files/epmt_2014_Ross.pdf

20. Matthews M.J. et al. Micro-shaping, polishing and damage repair of glass surfaces using focused infrared laser beams // *Advanced Engineering Materials*. – 2014. – P. 1–6.
21. Струсович А.В. и др. Лазерная очистка поверхности стекла от граффити // *Изв. ВУ-Зов. Приборостроение*. – 2014. – Т. 57, № 6. – С. 65–68.
22. Bliedtner J., Barz A., Hecht K., Schwager A.-M. Investigations on Laser Forming of Flat Glasses // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 314–320.
23. Hecht K., Bliedtner J., Rost M., Muller H., Schmidt T. Carbon-Dioxide Laser Beam Polishing of Fused Silica Surfaces – Process Development and Optimization // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 17, № 3. – P. 240–246.
24. Nusser C., Kumstel J., Kiedrowski T., Diatlov A., Willenborg E. Process- and Material-Induced Surface Structures During Laser Polishing // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 17, № 3. – P. 268–277.
25. Patschger A., Hopf A., Gupner M., Bliedtner J. Laser Material Processing of Medical Titanium // *Laser Technik Journal*. – 2016. – Vol. 1. – P. 24–27.
26. Patent EP 2323138 Method for smoothing optical member for EUVL. Date of filing: 19.08.2009. Date of publication: 23.10.2013. Bulletin 2013/43.
27. Patent US 4510005 Method and apparatus for reshaping and polishing an end face of an optical fiber. John P. Nijman. Date of filing: 28.09.1982. Date of publication: 09.04.1985.
28. Patent US 4731516 Laser polishing semiconductor wafer. Noguchi at al. Date of filing: 09.10.1986. Date of publication: 15.03.1988.
29. Patent US 5068514 Laser polishing of lens surface. James G. Lunney. Date of filing: 23.10.1989. Date of publication: 26.11.1991.
30. Patent US 5742026 Processes for polishing glass and glass-ceramic surfaces using excimer laser radiation. James E. Dickinson at al. Date of filing: 26.06.1995. Date of publication: 21.04.1998.
31. Patent US 6043452 Method and device for processing arbitrary 3D shaped surfaces by means of a laser, in particular for polishing and texturing workpieces, and for producing sealing surfaces on dies. Alexander Bestenlehrer. Date of filing: 09.04.1996. Date of publication: 28.03.2000.
32. Patent US 6492615 Laser polishing of medical devices. Aiden Flanagan. Date of filing: 12.10.2000. Date of publication: 10.12.2002.
33. Patent US 6521862 Apparatus and method for improving chamfer quality of disk edge surfaces with laser treatment. James Hammond Brannon. Date of filing: 09.10.2001. Date of publication: 18.02.2003.
34. Patent US 7592563 Method for smoothing and polishing surfaces by treating them with energetic radiation. Konrad Wissenbach, Edgar Willenborg, Norbert Pirch. Date of filing: 24.06.2003. Date of publication: 22.09.2009.
35. Patent US 8536054 Laser polishing of a solar cell substrate. Dallas W. Meyer at al. Date of filing: 22.06.2010. Date of publication: 17.09.2013.
36. Patent US 8546172 Laser polishing of a back contact of a solar cell. Dallas W. Meyer at al. Date of filing: 22.06.2010. Date of publication: 01.10.2013.
37. Patent WO 2013010876 Process and apparatus for smoothing and polishing... Date of filing: 11.07.2012. Date of publication: 24.01.2013.

© Д. В. Чесноков, Е. В. Шапран, 2016

РОЛЬ ПОПУЛЯРИЗАТОРОВ АСТРОНОМИИ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ

Ирина Владимировна Парко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, и. о. директора в УНЦ «Планетарий», тел. (913)959-17-30, e-mail: iparko@yandex.ru

Виктория Геннадьевна Дамм

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, менеджер в УНЦ «Планетарий», тел. (983)120-12-47, e-mail: dammvg@mail.ru

Анастасия Владимировна Симкина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, специалист по учебно-методической работе в УНЦ «Планетарий», тел. (961)846-05-20, e-mail: savantamuserussia@mail.ru

Камила Мейрамовна Шаржанова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, техник в УНЦ «Планетарий», тел. (913)770-52-75, e-mail: dsdkamila@mail.ru

Людмила Игоревна Горохова

Лаборатория ГНСС-технологий и навигации. Институт прикладных исследований Технического университета Карлсруэ, 76133, Германия, г. Карлсруэ, Moltestrasse, 30, научный помощник, тел. (+49)160-70-69-563, e-mail: lyudmila.gorokhova@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы о важности астрономии в жизни человека и откуда берутся околону научные знания. Опасным следствием пренебрежения астрономических знаний, объясняющих природу повседневно наблюдаемых небесных явлений, космических объектов и процессов, их воздействие на Землю и Вселенной в целом, стало неправильное (ложное) формирование научного мировоззрения учащихся, что привело к повальному увлечению молодежи оккультизмом и астрологией. В статье объясняется, кто такой популяризатор и как осуществляется популяризация астрономии в Новосибирске.

Ключевые слова: научное мировоззрение, популяризация астрономии, планетарий, обсерватория, астрономический отряд, оптические приборы, мобильный планетарий, школы, студенты, профориентация.

THE ROLE OF ASTRONOMY POPULARIZERS IN SOCIETY

Irina V. Parko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Acting director of the UC «Planetarium», tel. (913)959-17-30, e-mail: iparko@yandex.ru

Victoria G. Damm

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., manager of the UC «Planetarium», tel. (983)120-12-47, e-mail: dammvg@mail.ru

Anastasia V. Simkina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a specialist in educational and methodical work in the UC «Planetarium», tel. (961)846-05-20, e-mail: savantamuserussia@mail.ru

Camila M. Sharzhanova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., a technician in the UC «Planetarium», tel. (913)770-52-75, e-mail: dsdkamila@mail.ru

Lyudmila I. Gorokhova

Laboratory of GNSS technology and navigation. Institute for Applied Research of the Technical University of Karlsruhe, 76133, Germany, Karlsruhe, Moltestrasse, 30, a research assistant, tel. (+49)160-70-69-563, e-mail: lyudmila.gorokhova@gmail.com

The article discusses the questions about importance of astronomy in human life and how to get the pseudo-scientific knowledge. Dangerous consequences of neglecting astronomical knowledge, explaining the nature of everyday observable celestial phenomena, space objects and processes, their impact on the Earth and the Universe, it was wrong (false) the formation of pupils' scientific outlook. This has led to an epidemic of occultism and astrology amongst young people. The article explains, who is a popularizer and how realized the astronomy promotion in Novosibirsk.

Key words: scientific outlook, astronomy promotion, planetarium, observatory, astronomical group, telescopes, mobile planetarium, pupils, students, career guidance.

Скажи мне – и я забуду.
Покажи мне – и я запомню.
Вовлеки меня – и я научусь.
Конфуций

Откуда берутся околонаучные знания?

Астрономия, как никакая другая наука, связана с мечтами и фантазиями людей. Именно в этой области часто появляются необъяснимые с научной точки зрения факты. Это и таинственная планета Нибиру, и очередной конец света, и невероятное противостояние Марса с Землей. Каждый год воображение людей подбрасывает новые идеи. Кроме того, домыслами и тайнами обрастает то, что мы не можем пока объяснить.

За последнее столетие человечество продвинулось далеко вперед в познании Вселенной. Почему же в начале XXI века в странах с высоким уровнем образования так развита вера не в науку, а в предрассудки? С чем связано сегодня массовое увлечение людей псевдонауками?

Ответ, в общем-то, прост: эти околонаучные «знания» легко и просто «объясняют» какие-то явления и процессы, интересно рассказывая о них, оставляя при этом налет таинственности. Недостаток или полное отсутствие фактов, поверхностность в рассуждениях не настораживают, а наоборот только привлекают людей. Что касается науки, то язык ее изложения сухой, пестрит формулами и сложными терминами, научная литература доступна узкому кругу

людей. Вот и получается, что научная информация отсутствует, и в целом общество довольствуется весьма сомнительными данными.

На сегодняшний день ситуацию с астрономией в нашей стране можно назвать напряженной. Согласно собранной нами статистике, на 2016 год на территории России насчитывается порядка 127 обсерваторий, 49 планетариев и 55 астрономических клубов и кружков, из общего числа городов – 1100. Данные по странам сведены в таблицу.

Таблица

Астрономия по странам

Страна	Численность населения на 2016г., чел	Планетарии	Обсерватории	Учебный план СОШ, изучающих астрономию	Изучение астрономии в ВУЗах	Астрономические сообщества
Российская Федерация	144 192 450	49	127	Спецкурсы в лицеях и гимназиях, в центрах доп. образования, факультатив	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества
Республика Казахстан	17 700 000	8	7	Спецклассы, факультатив, центр дополнительного образования	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества
Республика Беларусь	9 498 700	1	3	Спецклассы, факультатив	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества
Федеративная Республика Германия	81 459 000	100	40	Факультатив, центр дополнительного образования	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества
Соединенные Штаты Америки	325 000 000	3190	60 крупных	Science(в этот школьный предмет входит астрономия)	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества
Япония	126 919 659	Более 400	Более 120	Центры дополнительного образования	Специализированные ВУЗы	Любительские астрономические сообщества

Исходя из этой информации, можно сделать вывод, что на нашу страну учреждений, где бы преподавали или популяризировали астрономию – катастрофически мало.

Критическим является и положение астрономического образования в современных учебных заведениях. Но это следствие глубокого кризиса всей российской системы образования, порожденного социально-политическим и экономическим состоянием страны, произошедшем в начале 90х годов.

Распад Советского Союза привел к разрушению единого образовательного пространства. Роль ученых и педагогов в жизни общества сознательно принижалась. Упало бюджетное финансирование работы вузов и средних учебных заведений, что привело к оттоку детей из старших классов.

В 1993 году в Базисном учебном плане общеобразовательных учреждений Российской Федерации астрономия уже отсутствовала как учебный предмет. Изучение астрономии, как базовой дисциплины в школе, было признано необязательным (ненужным).

Опасным следствием пренебрежения астрономических знаний, объясняющих природу повседневно наблюдаемых небесных явлений, космических объектов и процессов, их воздействие на Землю и Вселенной в целом, стало неправильное (ложное) формирование научного мировоззрения учащихся, что привело к повальному увлечению молодежи оккультизмом и астрологией. В результате исключения курса астрономии из учебных планов школ и других средних учебных заведений России, "за ненадобностью" была ликвидирована и специальность "учитель физики и астрономии".

Все чаще люди путают астрономию и астрологию. Мы спросили в книжном магазине в центре Новосибирска: «Где посмотреть школьный астрономический календарь». В ответ услышали от продавца: «Астрология у нас вот на этих полках».

Кто такой популяризатор?

Популяризатор - это человек, который делает возможным простой и понятный диалог между наукой и человеком, далёким от сложных расчётов. Популяризатор – это тот, кто доступно и легко говорит о сложных и порой невероятных вещах.

Это дружественный для людей гид, который пропуская через себя огромный объем знаний, становится «ярко горящим маяком» для каждого, кого влечёт звёздное небо. Очень важная роль и большая ответственность за каждое произносимое слово! Мы совершенно уверены, что люди, решившие посвятить себя популяризации астрономии должны ежедневно повышать свой уровень, развиваться в астрономии наравне с профессионалами, чтобы чувствовать себя свободно и легко ориентироваться в огромном океане знаний, ведя за собой других, зажигая умы интересом и увлеченностью.

В нашей стране не иссякает источник энтузиастов, стремящихся вернуть астрономию в один ряд с другими науками, тех, кто борется за будущее астрономии в России и не оставляет попыток изменить существующее положение вещей.

Популяризация астрономии в г. Новосибирске.

С 2006 г. Сибирский государственный университет геосистем и технологий совместно с АО «Швабе – Оборона и Защита», Новосибирским Астрономи-

ческим Обществом, Детско-юношеским центром «Планетарий» проводит астрономический форум «СибАстро». Ежегодно форум проходит в загородном лагере «Чкаловец» в Искитимском районе. Юбилейный, десятый, «СибАстро» прошел в 2015 году и число участников форума превысило 600 человек. Данное мероприятие проводится при непосредственном участии сотрудников УНЦ «Планетарий» и студентов астрономического отряда.

Помимо этого, УНЦ «Планетарий» принимает активное участие во многих мероприятиях, среди которых День космонавтики, День астрономии, Международная выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», праздничные представления на астрономическую тему для самых маленьких, а также выездные мероприятия с «мобильным планетарием» по новосибирской области.

Важность астрономии в жизни человека.

В астрономии все открытия, «лежащие на поверхности», уже сделаны. Удивлять и поражать человеческое воображение становится сложнее, потому что заглядывать приходится всё дальше и дальше. И чем глубже мы погружаемся в суть окружающего нас мира, тем сложнее становится объяснить свои открытия окружающим. Парадокс? Определённо! За многовековую историю своего существования, человек привык к звёздному небу, привык к неизменному числу планет в солнечной системе, привык ко всему, что он может увидеть на небе своими глазами или с помощью любительского телескопа. Чтобы понять и в полной мере оценить открытия современности, человеку необходимо потратить больше времени на то, чтобы вникнуть в их суть. Чем дальше мы проникаем вглубь Вселенной, тем незначительней, кажутся эти открытия для нашей повседневной жизни. Рассуждать об этом можно очень долго, но, пожалуй, самое главное во всём этом то, что ещё сохранились люди, понимающие важность астрономии для жизни человека. Таких людей достаточно много, они просто не организованы все вместе. Но каждый из этих людей ежедневно делает что-то для того, чтобы астрономия стала ближе, доступней, интересней, привлекательней, понятней, так как эта наука должна быть частью жизни обычных людей.

Мировоззренческая направленность астрономии, как дисциплины, была определена еще в 40-х годах на уровне стандарта образования СССР. Поэтому главной целью популяризации астрономии в массы является формирование научного мировоззрения, понимания окружающего нас мира и своего места во Вселенной.

Формы работы для популяризации астрономии различны и мероприятия, проводимые УНЦ «Планетарий», при участии астрономического отряда показаны на рисунке.

Это могут быть наблюдения в оптические приборы на городских площадках, лекции в «мобильном планетарии», викторины по астрономии для школьников, конкурсы рисунков и поделок на астрономические темы.



Рис. Работа астроотряда

Научно-технический прогресс нельзя игнорировать – окружающий мир меняется, и мы часть этого мира. Общество должно иметь представление об основных научных понятиях, и сами научные знания не должны быть прерогативой только специалистов.

Голос фундаментальной науки сегодня должен быть громче, а позиция ученых – непременно активной.

© И. В. Парко, В. Г. Дамм, А. В. Симкина, К. М. Шаржанова, Л. И. Горохова, 2016

ЭКОНОМИЧНЫЙ ВЫСОКОТОЧНЫЙ ДАТЧИК АБСОЛЮТНОГО УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Владимир Алексеевич Тарков

Филиал АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э. С. Яламова» «Урал-СибНИИОС», 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 179/2, начальник отдела, тел. (383)226-34-78, e-mail: vladnsk@bk.ru

Приведены результаты работ по разработке экономичного позиционного датчика угла высокой точности для геодезических приборов. Использование CMOS фотодиодных линеек (Hamamatsu), позволило существенно повысить экономичность датчика и обеспечить точность измерения относительных углов не хуже 3" при его использовании в составе новой модели тахеометра 6Та3.

Ключевые слова: измерение абсолютного углового положения, оптический позиционный датчик угла, оптический позиционный энкодер.

EN EFFECTIVE HIGH PRECISION ABSOLUTE ANGLE SENSOR

Vladimir A. Tarkov

Branch of OAO PO E. S. Yalamov Ural Optomechanical Factory, Ural-SibNIOS, 630049, Russia, Novosibirsk, D. Kovalchuk St., 179/2, Head of Department, tel. (383)226-34-78, e-mail: vladnsk@bk.ru

The article presents the results of the development cost of the angle position sensor for high-precision surveying instruments. Using CMOS linear sensors (Hamamatsu), has significantly increased the efficiency of the sensor to be used in geodetic instruments and to ensure the accuracy of the angle measurement is not worse than 3 seconds when using the composition of the new model of the 6Ta3 tachymeter.

Key words: measurement of absolute angle position, the optical angle position sensor, an optical position encoder.

Введение

Оптико-электронные датчики абсолютного положения (позиционные датчики) все больше вытесняют инкрементные. В России серийно выпускается достаточно широкий спектр оптико-электронных датчиков угла, в частности фирма «СКБИС» (г. Санкт-Петербург) предлагает большое количество инкрементных и абсолютных датчиков с использованием кода Грэя [1].

В настоящее время в геодезических приборах используются позиционные датчики угла с использованием псевдослучайной неповторяющейся бинарной последовательности (pseudo-random binary sequence - PRBS), которые просты в реализации, а алгоритм обработки сигналов не требует значительных вычислительных ресурсов.

Позиционный датчик угла на основе ПЗС линейки тахеометра 5Та5

В [2] приведены результаты разработки позиционного датчика углов с PRBS для геодезических приборов, производимых АО «ПО «УОМЗ» с исполь-

зованием фотоприемных ПЗС линеек. На рис. 1 приведена используемая при этом блок-схема двухканального датчика тахеометра 5Та5. Вертикальный и горизонтальный каналы содержат по одной ячейке считывания информации с помощью фотоприемных ПЗС линеек фирмы NEC с шагом элементов 11 мкм.

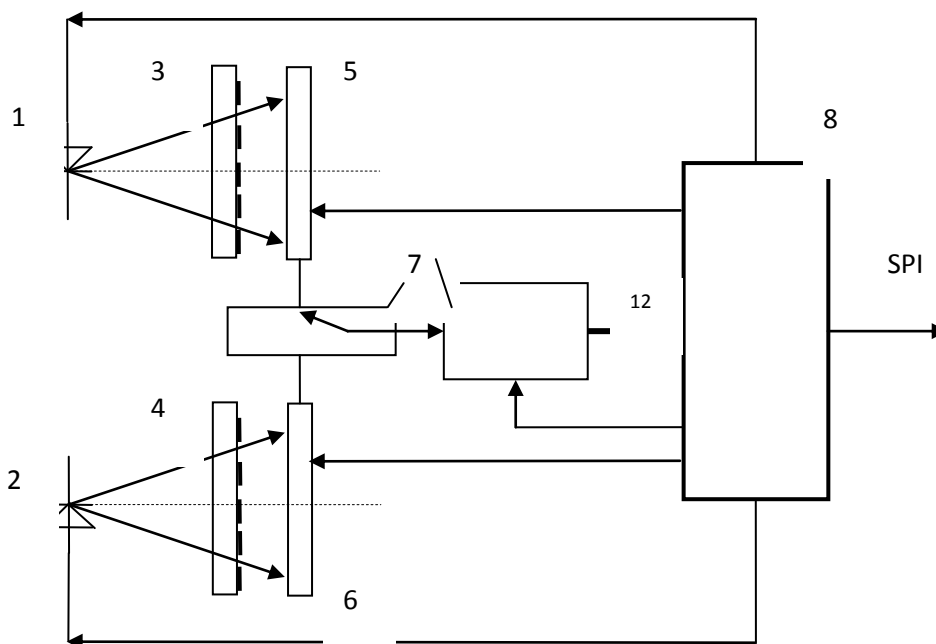


Рис. 1. Блок-схема двухканального датчика углов на основе ПЗС линеек:

- 1, 2 – точечный источник света (светодиод); 3, 4 – оптический кодовый лимб, 3600 штрихов; 5, 6 – ПЗС фотоприемная линейка фирмы NEC, шаг 11 мкм; 7 – CCD процессор (АЦП 12 разрядн.) с мультиплексором; 8 – микроконтроллер

Представленная на рис.1 оптическая схема не содержит объективов, при этом осуществляется считывание непосредственно теневой картины кодового лимба. Сигнал, соответствующий световому распределению, в цифровой форме обрабатывается микроконтроллером MSP430. Экспозиция (фиксация) текущего положения лимба осуществляется импульсом светового излучения от точечного светодиода с длиной волны 0,65 мкм в начале интервала накопления. Датчик имеет автономный запуск, поэтому в любой момент времени в выходном регистре контроллера имеется текущее значение углового положения, которое по запросу может быть считано любым внешним устройством по шине SPI (Serial Peripheral Interface) процессора. Изменение амплитуды сигнала осуществляется изменением длительности светового импульса. Ввиду достаточно большой мощности потребляемой ПЗС линейками, двухканальный датчик на основе ПЗС линеек имеет значительный ток потребления, достигающий 135мА при величине питающего напряжения 3,6 В. Коррекция эксцентриситета лимба при этом осуществляется программно, параметры эксцентриситета определяются по серии тестовых измерений.

Для считывания информации об угловом положении использован 12-разрядный код, нанесенный по окружности с диаметром рабочей зоны штрихов 84 мм. Всего по окружности лимба расположено 3600 штрихов, таким образом, смена кода происходит при каждом повороте лимба на 0,1 градуса. С учетом произвольной фазы сигнала для анализа и определения однозначного положения лимба необходимо считывание фрагмента кодовой дорожки, которая по размеру соответствует зоне в 13 бит. Для считывания одного информационного бита используется 8 фотоприемных элементов, т. е. пространственная частота фотоприемных элементов в 8 раз выше несущей частоты информационных бит. Таким образом, для определения текущего кода использован сигнал с $8 \times 13 = 104$ фотоприемных элементов. Обработка сигнала с целью определения текущего кода и дискретной фазы осуществляется микроконтроллером. В [3] описан вид кодирования информационных бит неповторяющейся бинарной кодовой последовательности, а также алгоритм декодирования и определения дискретной фазы сигнала. Данный датчик обеспечивает погрешность измерения углов не хуже 5'' при серийном производстве.

Эффективный позиционный датчик угла на основе CMOS фотодиодных линеек

Дальнейшее развитие работ по разработке датчиков углового положения с использованием PRBS последовательности осуществлялось с целью повышения экономичности и точности определения углового положения для использования в более совершенной модели тахеометра 6Та3.

Структурная схема разработанного датчика приведена на рис. 2. Каждый из датчиков имеет две измерительные ячейки, расположенные под углом около 180° для осуществления автоматической коррекции эксцентриситета лимба. Для улучшения характеристик датчика по сравнению с описанным выше вариантом [2] несколько изменен также принцип (вид) кодирования логических «0» и «1» и использованы CMOS фотодиодные линейки фирмы Hamamatsu S9226 с размером фотоприемного элемента 7,8x125 мкм.

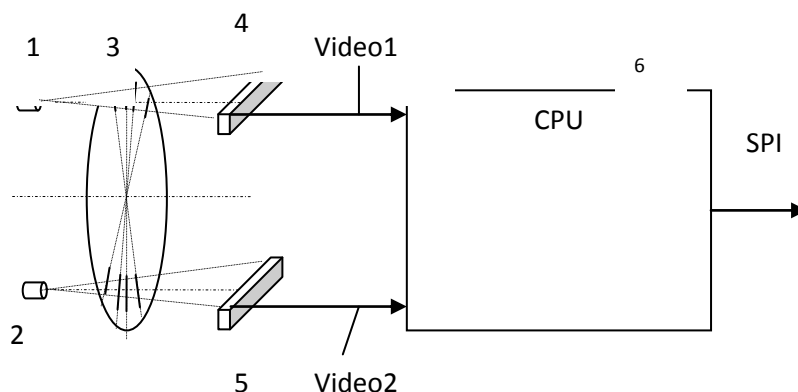


Рис. 2. Блок-схема датчика угла с двумя измерительными ячейками:

- 1, 2 – точечный источник света (светодиод); 3 – оптический кодовый лимб;
- 4, 5 – фотоприемная линейка; 6 – микроконтроллер STM32

Оптический лимб имеет кодовую дорожку из 1600 штрихов (бит), нанесенных по окружности диаметром 77 мм, для декодирования абсолютного углового положения использован 11-разрядный код, т. е. меньшей разрядности, чем в [2], но частота пространственной дискретизации при считывании кода значительно (в 3 раза).

Таким образом, размер бита на лимбе согласован с областью считывания фотодиодной линейки, содержащей 24 фотоприемных элемента, что обеспечивается согласованием масштаба теневого изображения лимба на фотоприемной линейке путем смещения источника излучения по оптической оси. С учетом произвольного фазового сдвига сигнала для декодирования 11-разрядного кода в каждой измерительной ячейке датчика осуществляется считывание изображения фрагмента кодовой дорожки, соответствующее 12 информационным битам, таким образом, для обработки сигнала необходимо 288 отсчетов. В отличие от датчика [2], где имеются штрихи, как одинарной, так и двойной ширины, в новом датчике используется иное кодирование логических «1» и «0» на лимбе, биты которых содержат штрихи одинаковой ширины, их расположение симметрично относительно центра бита и имеет ширину в 10 фотоприемных элементов с учетом увеличения масштаба в плоскости фотоприемника.

Для определения углового положения лимба используется три ступени обработки сигнала. Первая предусматривает прямое декодирование текущего кода и определение угла по таблице соответствия угол-код, вторая ступень с использованием корреляционной обработки сигнала определяет дискретный фазовый сдвиг, кратный сдвигу сигнала на шаг фотоприемных элементов. На третьей ступени обработки предусматривается вычисление уточняющей аналоговой фазы сигнала, соответствующей сдвигу сигнала на величину значительно ниже, чем размер одного фотоприемного элемента, для этой цели разработан специальный алгоритм. При этом фактически алгоритм фактически определяет среднее значение фазы смещения центров тяжести штрихов 11 штрихов текущего кода.

Точность определения абсолютного углового положения определяется алгоритмом вычисления аналоговой фазы. Предельная точность определяется точностью изготовления топологии лимба. Так угловое смещение топологии штрихов на 0,2 мкм приводит к погрешности определения угла в 1".

На рис. 3 приведены результаты определения погрешности измерения малых углов при последовательно изменяемом угле с шагом 10 угловых секунд. Задание углов осуществлялось с помощью автоколлиматора АК-0,2У, имеющего погрешность измерений 0,2". Результаты приведены для горизонтального датчика тахеометра. Для вертикального канала погрешность измерений несколько больше, что связано с люфтами осей вращения тахеометра и реально не превышала 1,25".

Использование экономичных CMOS фотоприемных линеек и встроенного в микроконтроллер АЦП позволило разработать экономичный датчик с двумя измерительными ячейками для обеспечения автоматической коррекции эксцентриситета кодового лимба. Ток потребления в этом случае не превышает 20 мА. При

серийном производстве тахеометра с описанным датчиком прибор позиционируется, как прибор со среднеквадратичной погрешностью измерения вертикального и горизонтального углов не более 3" при температуре от -20 до 50 °С.



Рис. 3. Погрешность измерения малых углов датчиком при пошаговом изменении угла на 10"

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайт фирмы СКБ ИС www.skbis.ru
2. Тарков В.А. Особенности построения позиционных датчиков угла современных геодезических приборов. // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 5. С. 70-76.

© В. А. Тарков, 2016

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Ольга Викторовна Карпикова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистр кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)344-29-29, e-mail: oljakarpikva@rambler.ru

Виктория Александровна Погудина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистр кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)344-29-29, e-mail: viktor.pog@yandex.ru

Рассматривается информационное обеспечение разработанной имитационной компьютерной модели оптико-электронной системы визуализации, имеющей в своем составе матричный фотоприемник.

Ключевые слова: система визуализации, объектно-фоновая ситуация, оптико-электронный тракт, имитационная модель, спектральные характеристики.

INFORMATION SUPPORT OF PHOTODETECTORS COMPUTER SIMULATION

Evgenij V. Grickevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)344-29-29, e-mail: gricew@mail.ru

Olja V. Karpikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: oljakarpikva@rambler.ru

Viktor A. Pogudina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of nanosystems and optical engineering, tel. (383)344-29-29, e-mail: viktor.pog@yandex.ru

Considered the information support of developed computer simulation model of electro-optical imaging system being composed of a matrix photodetector.

Key words: imaging system, the object-background situation, optoelectronic channel, simulation model, spectral characteristics.

В работе [1] была рассмотрена имитационная компьютерная модель для проведения виртуальных испытаний оптико-электронных систем визуализации, имеющих в своем составе матричные фотоприемники. При разработке модели большое внимание уделялась созданию информационной базы, предназначенной для обеспечения процесса моделирования.

Под информационной базой понимается совокупность параметров и характеристик типовых звеньев приборов, требующихся при проведении энергетических расчетов. Это, прежде всего, относится к спектральным характеристикам естественной освещенности, атмосферного канала, объектов и фонов, фотоприемников. Все эти характеристики представлены в виде специализированных программных модулей, содержащих таблицы относительных значений по длине волны. Обращение к этим модулям происходит автоматически по запросам основных моделирующих программ. Информационные модули могут использоваться автономно в качестве автоматизированного справочника, обеспечивающего предоставление характеристик в виде числовых данных и графиков по запросам пользователя.

В настоящее время разработаны информационные модули, обеспечивающие моделирование оптико-электронных систем в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне от 0,31 до 1,3 мкм. Проводится работа по расширению ИК - диапазона до значения 1,8 мкм, поскольку этот спектральный участок представляется весьма перспективным с точки зрения повышения информационной эффективности ПНВ [2].

Кроме того, в информационную базу данных включены типовые эталонные изображения различных объектов, с помощью которых возможно анализировать работу системы визуализации с точки зрения качества выходной картины, создаваемой на экране видеоконтрольного устройства. У исследователя появляется возможность визуализировать на экране компьютерного монитора виртуальные выходные изображения, которые будет создавать реальный прибор на заданной дистанции наблюдения. Для этого применяется методика, включающая в себя следующие этапы.

1. Из архива типовых объектов наблюдения выбирается требуемый (в соответствии с целевым назначением прибора).

2. С помощью модели определяются геометрические, модуляционные (контрастные) и шумовые параметры, характеризующие оптические сигналы от объекта и фона на входе системы визуализации для заданной дистанции наблюдения.

3. Путем прямого преобразования Фурье с использованием интегральной функции передачи модуляции системы визуализации рассчитывается пространственно-частотный спектр выходного сигнала.

4. С помощью обратного преобразования Фурье на экране компьютерного монитора генерируется выходное изображение системы визуализации, к которому добавляются шумы. Учитывая, что размеры экранов реальных приборов наблюдения, как правило, меньше размеров экранов компьютерных мониторов, выходное изображение выводится в масштабе, соответствующем

задаваемому размеру экрана видеоконтрольного устройства системы визуализации.

Воспроизведение виртуального выходного изображения системы визуализации позволяет субъективно оценить качество этого изображения. Кроме того, появляется возможность анализировать эффективность применения методов цифровой обработки изображений, выполняемых специализированным процессором, интегрированным в оптико-электронный тракт.

Ниже приведена последовательность экранных копий, поясняющих вышесказанное. На рис. 1 показан вид идеального изображения для типового объекта (рис. 1, *а*) и соответствующей ему эквивалентной мира Джонсона (рис. 1, *б*).

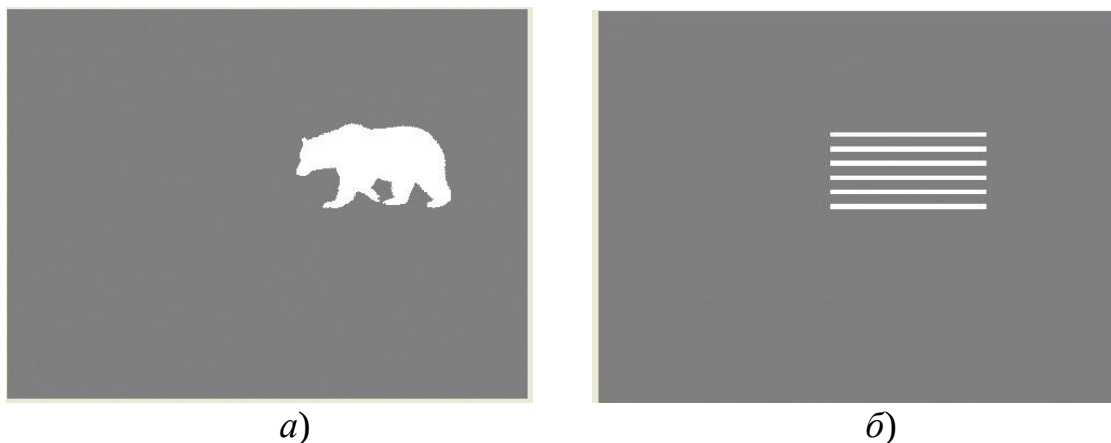


Рис. 1. Идеальный входной сигнал:
а) типовой объект; *б*) эквивалентная мира

Рис. 2 демонстрирует получаемые виртуальные выходные изображения без обработки.

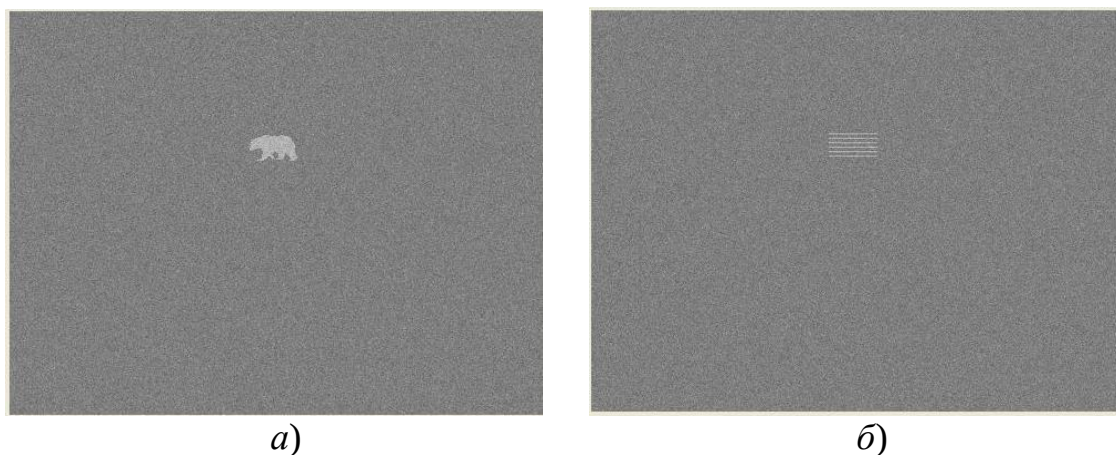


Рис. 2. Выходное изображение без обработки:
а) типовой объект; *б*) эквивалентная мира

В последнем случае размеры объекта, его контраст по отношению к фону и уровень шумов соответствуют тем, которые были рассчитаны для выходного изображения с помощью процедуры сквозного анализа на заданной дистанции наблюдения. Необходимо заметить, что в приведенном примере не учитывался эффект размытия контуров (при построении данного иллюстрирующего изображения не использовался аппарат Фурье-анализа).

На рис. 3 показан вид выходного изображения после цифровой обработки. Эта обработка включала в себя: низкочастотную фильтрацию, оконтуривание, усиление контраста и увеличение масштаба.

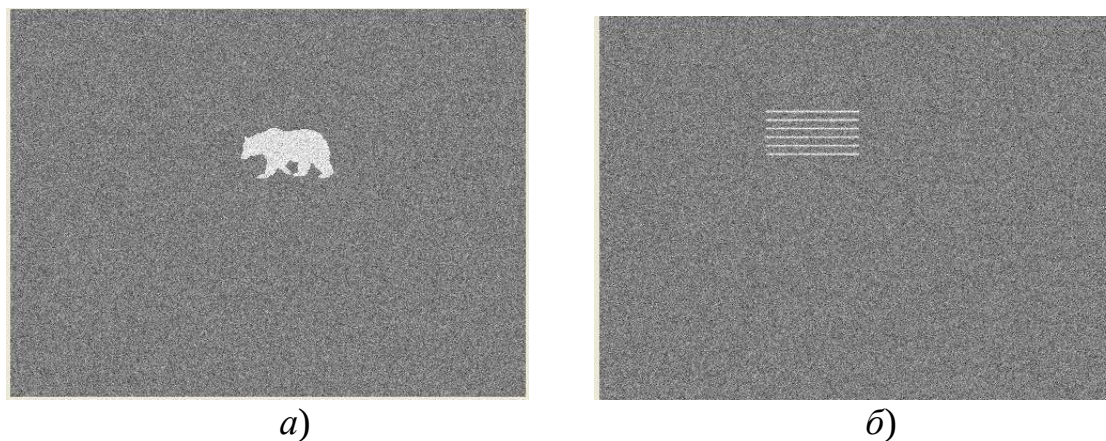


Рис. 3. Выходное изображение после обработки:

а) типовой объект; б) эквивалентная мира

Виртуальное представление выходных изображений является эффективным инструментом при анализе многоканальных оптико-электронных систем, поскольку позволяет одновременно наблюдать действие каждого канала по отношению к типовому входному сигналу, а также моделировать процесс совмещения разномасштабных изображений, если это предусмотрено в приборе.

Весьма часто при работе реальных наблюдательных приборов параллельно с процессом наблюдения определяется пространственное положение объекта относительно наблюдателя (производится измерение пространственных координат). Канал визуализации совмещается с измерительным каналом, к которому предъявляются специфические требования. Имитационное компьютерное моделирование позволяет анализировать процесс измерения координат и решать задачи оптимального согласования параметров звеньев оптико-электронного тракта по критерию минимизации погрешности измерения [3]. Очевидно, что объединение в одной имитационной модели двух разнородных процессов, – наблюдения и измерения, – существенно расширит возможности предлагаемых методов виртуализации испытаний оптико-электронных систем различного назначения, что в итоге приведет к повышению качества проекти-

руемых приборов, сокращению сроков их разработки, уменьшению затрат на этапе функционального проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грицкевич Е. В., Беляева А.Г. Виртуальные испытания оптико-электронных систем ночного видения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 5. – С. 23–27.
2. Кощавцев Н. Ф., Кощавцев А. Н., Федотова С. Ф. Анализ перспектив развития приборов ночного видения // Прикладная физика. – 1999. – № 3. – С. 66–69.
3. Грицкевич Е. В. Минимизация погрешности измерений оптико-электронного координатного датчика // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 18–20.

© Е. В. Грицкевич, О. В. Картикова, В. А. Погудина, 2016

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ЛАТЕРАЛЬНО ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Евгений Владимирович Сысоев

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

Игнат Александрович Выхристюк

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

Родион Владимирович Куликов

ФГБУН 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

Василий Владимирович Широков

ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, аспирант, младший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

Предложен высокопроизводительный способ измерения рельефа поверхности латерально движущихся объектов с использованием методов низкокогерентной интерферометрии. Метод основан на одновременном вертикальном и латеральном сканировании. Показано что при измерении рельефа протяженных движущихся поверхностей можно достичь погрешности менее 1 мкм.

Ключевые слова: движущийся объект, низкокогерентная интерферометрия, дифференциальная интерферограмма, рельеф поверхности.

INTERFERENCE MEASUREMENT OF LATERALLY MOVING SURFACE MICRORELIEF

Evgeny V. Sysoev

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

Ignat A. Vykhristyuk

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

Rodion V. Kulikov

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

High-performance method of laterally moving objects surface measurement using the low-coherence interferometry was proposed. The method is based on the synchronous vertical and lateral scanning. It has been shown that measurement error of extended moving surface can be less than 1 μm .

Key words: moving object, low coherence interferometry, differential interferogram, surface relief.

Одной из актуальных задач контроля состояния промышленных изделий является измерение рельефа поверхности в движении. Такие задачи возникают, например, при производстве твэл (тепловыделяющих элементов для атомных реакторов) и контроле внешнего вида их оболочки.

Применение высокоточных интерференционных систем измерения для решения таких задач затруднительно [1-3]. И связано это с тем, что часто нет возможности зафиксировать объект измерения и выполнить сканирование по глубине. Так, при использовании метода дифференциальных интерферограмм [4, 5] на каждом шаге сканирования используется две интерферограммы, а в методе, описанном в работе [6] – три. При этом для правильного расчета изолинии рельефа поверхности объект измерения должен находиться в покое.

При интерференционном контроле движущейся поверхности необходимо решить две задачи. Первая связана с тем, что необходимо выполнять вертикальное сканирование и на каждом шаге сканирования рассчитывать изолинию рельефа поверхности. Решение второй задачи заключается в том, чтобы связать параметры измерительной системы и характеристики движения объекта контроля с целью получения требуемого результата измерения.

В настоящей работе предложен способ измерения рельефа поверхности движущихся объектов на основе метода дифференциальных интерферограмм.

Такой выбор основан на том, что использование двухканального дифференциального интерферометра [7, 8] позволяет получать одновременно две противофазные интерферограммы, по которым рассчитываются дифференциальная интерферограмма и изолиния рельефа поверхности. Одновременность регистрации интерферограмм исключает влияние латерального (перпендикулярно оптической оси) движения измеряемого объекта на результат измерений.

В процессе измерения на каждом шаге сканирования по высоте Δz мы получаем изолинию рельефа поверхности, сдвинутую латерально (в горизонтальном направлении) на величину Δx . Если требуемый диапазон сканирования по высоте равен величине Z , то за время сканирования объект переместится латерально на величину:

$$X = \frac{\Delta x \cdot Z}{\Delta z}. \quad (1)$$

Изолиния рельефа рассчитывается по площади, размеры которой определяются размерами проекции матрицы ПЗС камеры в зону измерения. При этом размер матрицы d_{mat} , ориентированный вдоль направления движения, рассчитывается как:

$$d_{mat} = D/|\beta|, \quad (2)$$

где D – физический размер матрицы, β – оптическое увеличение.

Очевидно, что при завершении вертикального сканирования рельеф поверхности, рассчитываемый по набору изолиний, можно восстановить только для той площади объекта измерения, для которой были рассчитаны изолинии рельефа, т.е. для области пересечения проекций ПЗС матриц. На следующем этапе измерения производится вертикальное сканирование в обратном направлении. Для того, чтобы область измерения была непрерывной, объект измерения (за время вертикального сканирования) должен перемещаться латерально на величину, не большую чем половина проекции ПЗС матрицы (рис. 1).

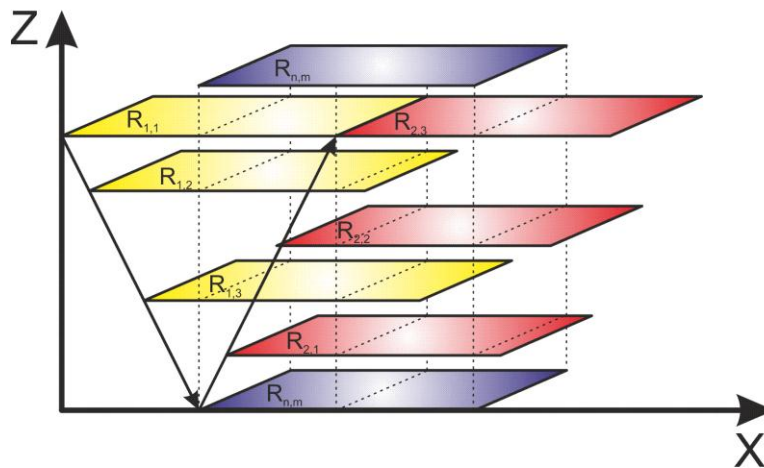


Рис. 1. Процесс измерения рельефа поверхности

При заданной скорости V латерального движения объекта измерения (рис. 1, ось X) рассчитывается требуемая производительность ПЗС камеры:

$$v = \frac{Z \cdot V}{\Delta z \cdot d_{mat}} \quad (3)$$

Так, например, при $V = 200$ мм/с (скорость перемещения твэл в производственной линии), $Z = 0,05$ мм, $\Delta z = 0,002$ мм, $d_{mat} = 6,6$ мм производительность ПЗС камеры должна быть не менее чем 758 кадров/сек.

Эксперименты с двухканальным дифференциальным интерферометром были рассмотрены в нашей работе [8]. В настоящей работе двухканальный интерферометр моделировался одноканальным интерферометром в старт-стопном

режиме. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В основе системы измерения лежит оптическая схема микроинтерферометра Линника.

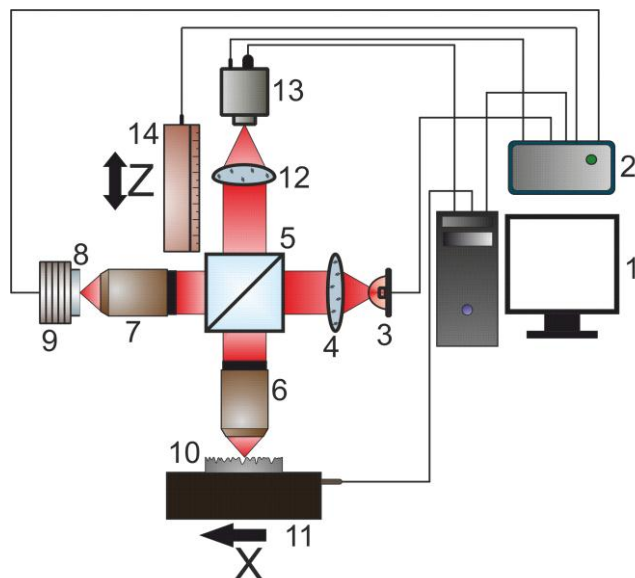


Рис. 2. Система измерения рельефа динамических объектов:

1 – компьютер; 2 – контроллер управления; 3 – источник частично когерентного света; 4 – объектив; 5 – светоделительный куб; 6, 7 – два идентичных объектива; 8 – опорное зеркало; 9 – пьезокерамика; 10 – объект измерения; 11 – микрометрический столик; 12 – тубусная линза; 13 – ПЗС камера; 14 – микрометрический столик с датчиком линейных перемещений

В качестве источника частично когерентного света используется красный светодиод с длиной когерентности $l_c = 20$ мкм. Увеличение оптической системы $|\beta| = 5$. Размер пикселя камеры составляет 7,4 мкм x 7,4 мкм. Размер зоны измерения интерферометра составляет 1,5 мм x 3,0 мм. Измерение рельефа поверхности проведено в двух режимах: статическом и динамическом. Диапазон перемещения и шаг сканирования по вертикали (рис. 2, ось Z) составляют 100 мкм и 3 мкм, соответственно. Диапазон латерального перемещения и шаг сканирования (рис. 2, ось X) составляют 4 мм и 5 мкм, соответственно.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты. В качестве объекта измерения была выбрана кремниевая пластина со структурами в виде квадратных и круглых столбиков. Высота столбиков составляет ≈ 25 мкм, горизонтальный размер равен ≈ 50 мкм x 50 мкм. Результаты измерения статическим и динамическим способами, которые сравнивались для области пресечения отличаются менее чем на 1 мкм.

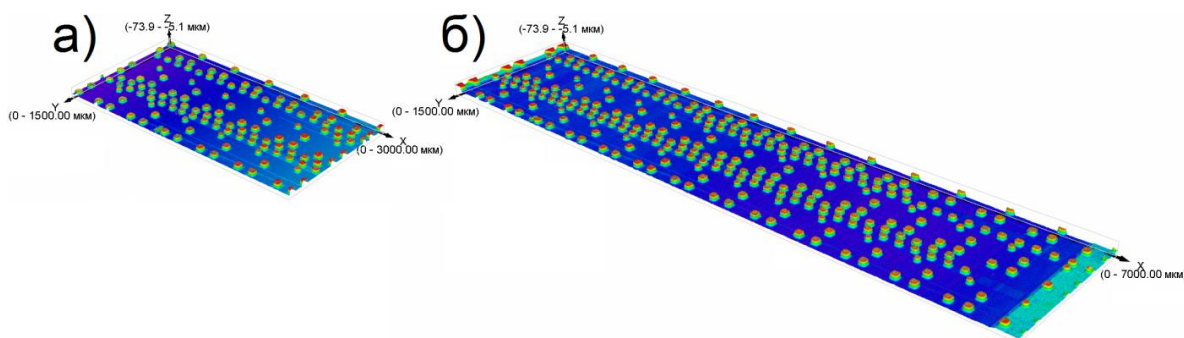


Рис. 3. Измеренный рельеф поверхности:

а) в статике; б) в динамике

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен высокопроизводительный способ измерения рельефа латерально движущейся поверхности с использованием методов низкокогерентной интерферометрии.

Экспериментально показано, что данный способ позволяет измерять рельеф протяженных движущихся поверхностей с погрешностью менее 1 мкм.

Результаты работы могут использоваться при проектировании высокоточных, высокопроизводительных систем для бесконтактного контроля объектов промышленного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Albertazzi A. and Pont A. Preliminary measurement performance evaluation of a new white light interferometer for cylindrical surfaces // *Journal of Physics*. – 2005. – V. 13. – P. 28–31.
2. Höink A., Meiners-Hagen K., Jusko O., Abou-zeid A. Application of diode lasers in interferometrical length measurements // *Proceedings of ISMTII*. – 2009. – P. 006–010.
3. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Широков В. В. Высокопроизводительный оптический интерференционный микропрофилометр // *Датчики и Системы*. – 2015. – № 9–10. – С. 52–57.
4. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // *Автоматрия*. – 2004. – Т. 40. – №4. – С. 4–13.
5. Сысоев Е. В., Голубев И. В. Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.
6. Dresel Th., Häusler G., and Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // *Applied. Optics*. – 1992. – V. 31. – P. 919–925.
7. Andretzky P., Lindner M. W., Bohn G., Neumann J., Schmidt M., Ammon G., and Häusler G. Modifications of the coherence radar for in vivo profilometry in dermatology // *Proc. SPIE*. – 1998. – V. 3567. – P. 88–96.
8. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Широков В. В. Двухканальный интерферометр белого света для получения дифференциальных интерферограмм // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – Т. 2. – С.34–38.

© Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков, 2016

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ЖИДКОСТНАЯ АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Виктор Сергеевич Ефремов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

Рассмотрен вариант расчета двухкомпонентной жидкостной адаптивной оптической системы видекамеры технического зрения для медицинского направления и изменение коррекционных свойств адаптивной системы при аккомодации.

Ключевые слова: жидкостная, адаптивная, оптическая система.

TWO-COMPONENTAL LIQUID ADAPTIVE OPTICAL SYSTEM

Victor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Associate Professor of Nanosystems and Optical Devices Department, tel. (383)344-29-29, e-mail: ews49@mail.ru

The variant of calculation of two-componental liquid adaptive optical system of a videocamera of technical sight for a medical direction and change of correctional properties of adaptive system at accommodation is considered.

Key words: liquid, adaptive, optical system.

В последние годы возрос интерес к оптическим системам с жидкими (жидкостными) линзами (ЖЛ), основанными на различных физических принципах [1–4]. Применение ЖЛ может оказаться эффективным в измерительной и медицинской технике, дистанционно управляемых устройствах систем безопасности и др., когда в процессе работы необходим режим аккомодации (оперативно перенастраиваться на разнотелные удаленные объекты). Оптика видеоканер медицинского направления, «мобильников» и устройств считывания штрих-кодов, как правило, не требует рекордных оптических характеристик.

Наиболее распространенный прием фокусировки на заданное расстояние, особенно широко используемый в живой природе, аккомодация хрусталика глаза. В технических устройствах роль хрусталика может заменить ЖЛ на эффекте электросмачивания. Оптическую систему рационально выполнить в виде единой ЖЛ, радиусы кривизны, которой регулируются, например, за счет эффекта электросмачивания («electrowetting») [5]. Так как ЖЛ для изменения фокусного расстояния не нуждаются в продольных подвижках, то конструктивно вся система может быть выполнена в виде сборки типа «моноблок» с элементами, ориентированными относительно друг друга с необходимой степенью точности [6].

В докладе проиллюстрирована возможность применения состыкованных ЖЛ для аккомодации на разные расстояния до объекта.

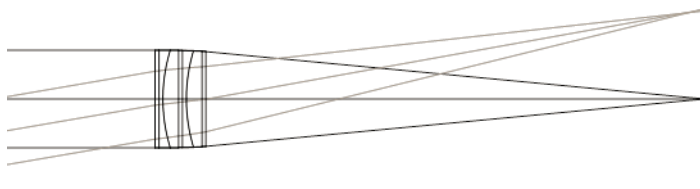


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема двухкомпонентной жидкостной адаптивной оптической системы

Определяя параметры двухкомпонентной жидкостной адаптивной системы, для последующего моделирования ее по программе расчета оптических систем «Zemax» воспользуемся оптическими характеристиками глаза человека.

Как известно, при аккомодации с бесконечности до расстояния наилучшего видения (250мм) главное (суммарное) фокусное расстояние глаза изменяется от 16 до 13 мм. Диаметр входного зрачка примем равным 3 мм, что соответствует нормальной освещенности объекта. Поле зрения примем равным 10° (зона четкого видения глаза, примерно 6° - 7°).

Показатели преломления веществ составляющих глаз: роговицы $n_D=1,376$; передней глазной камеры $n_D=1,336$; центра хрусталика $n_D=1,403$; задней глазной камеры $n_D=1,336$. На основании этого выберем комбинацию показатели преломления электропроводящей и электро непроводящей жидкостей из [7] (состав №20).

Результаты расчетного моделирования подобной системы для расстояний до объекта 0,25, 0,5 и 1000 мм, 5, 10, 1000 м и ∞ приведены в таблице для единой плоскости изображения равной $S'=16,72$ мм.

Таблица

Оптические характеристики и коэффициенты Зейделя двухкомпонентной жидкостной адаптивной системы

Расстояние до объекта, м	Радиус поверхности, мм	Фокусное расстояние линзы, мм			Аберрационные коэффициенты Зейделя				
		f'_Σ	$f'_{непр}$	$f'_{пр}$	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
0,25	5,16	16,69	-13,43	9,55	0,0113	0,0027	0,0042	0,0021	-0,0009
0,50	5,32	17,19	-13,83	9,84	0,0101	0,0024	0,0042	0,0021	-0,0001
1,00	5,43	17,53	-14,11	10,04	0,0095	0,0022	0,0041	0,0020	-0,0001
5,00	5,50	17,78	-14,31	10,18	0,0090	0,0021	0,0040	0,0020	-0,0001
10,0	5,50	17,78	-14,31	10,18	0,0090	0,0021	0,0040	0,0020	-0,0001
1000,0	5,51	17,81	-14,34	10,20	0,0089	0,0020	0,0040	0,0020	-0,0001
∞	5,52	17,84	-14,37	10,22	0,0089	0,0020	0,0040	0,0020	-0,0001
f'_Σ – суммарное жидкой линзы; $f'_{непр}$ – электро непроводящей линзы; $f'_{пр}$ – электропроводящей линзы									

К достоинствам данной системы следует отнести быстрое (в пределах мс) изменение фокусного расстояния, постоянство относительного отверстия, малый диапазон (менее 1 мм) изменения радиуса кривизны преломляющей поверхности ЖЛ.

Коэффициенты Зейделя для монохроматических aberrаций практически не изменяются для всех положений аккомодации, кроме S_1 - определяющую сферическую aberrацию (изменение для крайних положений не более 30%).

В качестве примера aberrационной коррекции на рис. 2 представлены графики концентрации энергии в пределах пиксела 30×30 мкм системы при разных расстояниях до объекта.

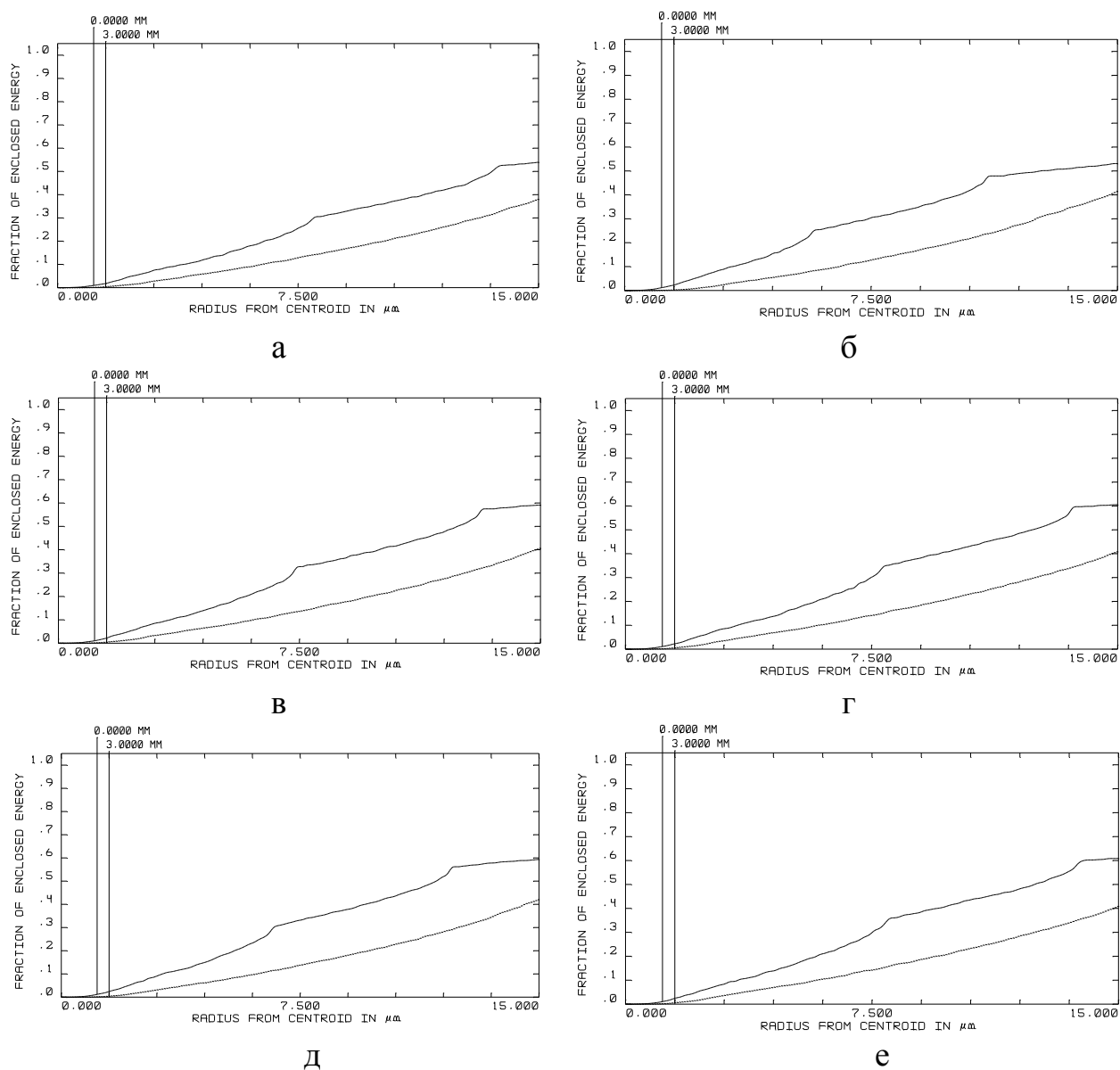


Рис. 2. Графики концентрации энергии в пределах пиксела 30×30 мкм при расстояниях до объекта:

а) 0,25м; б) 0,5м; в) 1м; г) 5м; д) 10м; е) 1 000 м

На основании рис. 2 можно сделать некоторые выводы:

- результаты предварительного расчета показали, что значения концентрация энергии в пикселе не достаточна для получения высококачественного изображения;
- концентрация энергии в пикселе близка по значению для всех положений аккомодации;
- повышение концентрации энергии в пикселе возможно при сферизации плоских поверхностей системы или дополнительным компонентом с постоянной оптической силой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pat. 1999018456 WO. Lens With Variable Focus / B. Berge, J. Peseux. Publication Date: 04.15.1999.
2. Pat. 7126903 US. Variable Focus Lens / B. J. Feenstra, S. Kuiper, S. Stallinga, B. H. W. Hendriks, R. M. Snoeren. Publication Date: 10.24.2006.
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. Голицын А. В., Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Некоторые варианты оптических систем на основе жидкостных элементов // Сборник трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика–2014». СПб. : Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2014. – Т. 3. – С. 55.
5. 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. – Vol. 104 (3). – P. 222–228.
6. Голицын А. В., Михайлов И. О., Шлишевский В. Б. Конструкция миниатюрного комбинированного объектива-моноблока с жидкими линзами // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 76–80.
7. 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. Publication Date: 02.11.2011.

© В. С. Ефремов, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1. С. Г. Баев, В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев, Н. В. Голошевский, Е. П. Горяев, В. В. Кастеров, М. В. Максимов, К. К. Смирнов. Особенности технологии прецизионной фемтосекундной микрообработки оптических материалов.....	3
2. Е. В. Строганова, В. В. Галуцкий, Н. Н. Налбантов, А. С. Козин. Спектрально-люминесцентные характеристики градиентно-активированных кристаллов ниобата лития с концентрационными профилями ионов Yb^{3+} и Er^{3+}	9
3. Н. Г. Миронников, В. П. Корольков, Д. И. Деревянко, В. В. Шелковников. Оптические методы формирования многоуровневого микрорельефа в тонких пленках гибридного фотополимерного материала «Гибример-ТАТС».....	15
4. А. В. Сосунов, Р. С. Пономарев. Механические свойства приповерхностного слоя монокристалла ниобата лития.....	20
5. С. О. Алебастров, Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова, Н. Н. Достовалов, П. С. Орлов. Исследование акустической монохроматической волны, дифрагировавшей на цилиндрических трубках	24
6. Ю. Ц. Батомункуев. Расчет глубины резкости объемного голограммного оптического элемента.....	27
7. Ю. Ц. Батомункуев, А. А. Дианова. Хроматические aberrации дифракционных элементов.....	29
8. Д. А. Белоусов, А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов. Контроль параметров микрорельефа синтезированных голограмм методом анализа дифракционной картины	32
9. В. Н. Хомутов. Портативная программно-аппаратная платформа датчика формы волнового фронта.....	37
10. А. Г. Седухин, А. Г. Полещук. Зеркально-дифракционный объектив для фокусировки лазерного радиально поляризованного пучка в пятно предельно малого размера	42
11. А. Г. Полещук, В. Н. Хомутов, А. Е. Маточкин, Р. К. Насыров, В. В. Черкашин. Современные лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей	47
12. О. В. Минин, И. В. Минин. Пассивный ретранслятор поверхностных плазмон-поляритонов	53
13. А. А. Топорков, И. С. Бутримов. Сравнительный анализ сеточных прицелов	57
14. М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Г. Ф. Седухина. Акустооптическая информационная система инфранизких частот	64

15. <i>Д. В. Чесноков, С. Л. Шергин, Е. В. Лаптев.</i> Разработка методики исследования эффектов ограничения мощного импульсного лазерного излучения дифракционными структурами, сформированными в тонких пленках диоксида ванадия на подложках.....	70
16. <i>Д. В. Чесноков, Е. В. Шапран.</i> Научные и технические аспекты развития методов лазерной полировки стекла.....	76
17. <i>И. В. Парко, В. Г. Дамм, А. В. Симкина, К. М. Шаржанова, Л. И. Горохова.</i> Роль популяризаторов астрономии в современном обществе	82
18. <i>В. А. Тарков.</i> Экономичный высокоточный датчик абсолютного углового положения	88
19. <i>Е. В. Грицкевич, О. В. Карпикова, В. А. Погудина.</i> Информационное обеспечение компьютерного моделирования фотоприемных устройств	93
20. <i>Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков.</i> Интерференционное измерение микрорельефа латерально движущейся поверхности	98
21. <i>В. С. Ефремов.</i> Двухкомпонентная жидкостная адаптивная оптическая система	103

CONTENTS

1. S. G. Baev, V. P. Bessmeltsev, E. D. Bulushev, N. V. Goloshevsky, E. P. Goryaev, V. V. Kasterov, M. V. Maksimov, K. K. Smirnov. Technology features of femtosecond laser micro-machining optical materials.....	3
2. E. V. Stroganova, V. V. Galucci, N. N. Nalbantov, A. S. Kozin. Spectral and luminescent characteristics of the gradient activated lithium niobate crystals with concentration profiles of ions Yb^{3+} and Er^{3+}	9
3. N. G. Mironnikov, V. P. Korolkov, D. I. Derevyanko, V. V. Shelkovnikov. Optical fabrication methods of multilevel relief in thin films of hybrid photopolymeric material «Hybrimer-TATC».....	15
4. A. V. Sosunov, R. S. Ponomarev. Mechanical properties of the sub-surface layer of lithium niobate single crystal	20
5. S. O. Alebastrov, Yu. Ts. Batomunkuev, A. A. Dianova, N. N. Dostovalov, P. S. Orlov. Research of acoustic monochromatic wave diffracted by the cylindrical tubes	24
6. Yu. Ts. Batomunkuev. Calculation of the depth of field for volume holographic optical element	27
7. Yu. Ts. Batomunkuev, A. A. Dianova. Chromatic aberrations of diffractive elements.....	29
8. D. A. Belousov, A. G. Poleshchuk, V. N. Khomutov. The parameters control of the microrelief synthesized holograms by diffraction pattern analysis method	32
9. V. N. Khomutov. Portable system for wavefront control	37
10. A. G. Sedukhin, A. G. Poleshchuk. Mirror-diffractive objective lens for focusing radially polarized laser beam into ultimately small spot.....	42
11. A. G. Poleshchuk, V. N. Khomutov, A. E. Matochkin, R. K. Nasyrov, V. V. Cherkashin. Modern laser interferometer to control the shape of the optical surface	47
12. O. V. Minin, I. V. Minin. Passive repeater of surface plasmon polaritons.....	53
13. A. A. Toporkov, I. S. Butrimov. Analysis of night scope reticles.....	57
14. M. S. Hayretdinov, B. V. Poehler, A. V. Britvin, G. F. Sedukhina. Acousto-optical infra-low frequency information system	64
15. D. V. Chesnokov, S. L. Shergin, E. V. Laptev. Development of technique for investigations of the effects of limiting powerful pulse of laser radiation diffraction structures formed in thin films of vanadium dioxide on substrates	70
16. D. V. Chesnokov, E. V. Shapran. Scientific and technical aspects of the development of laser glass polishing techniques	76

17. I. V. Parko, V. G. Damm, A. V. Simkina, C. M. Sharzhanova, L. I. Gorokhova. The role of astronomy popularizers in society	82
18. V. A. Tarkov. En effective high precision absolute angle sensor.....	88
19. E. V. Grickevich, O. V. Karpikova, V. A. Pogudina. Information support of photodetectors computer simulation	93
20. E. V. Sysoev, I. A. Vykhristyuk, R. V. Kulikov, V. V. Shirokov. Interference measurement of laterally moving surface microrelief	98
21. V. S. Efremov. Two-componental liquid adaptive optical system	103

Научное издание

ХII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016

Международная научная конференция

СибОптика-2016

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *К. В. Ионко*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.05.2016. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 6,45. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, 108, ул. Плеханова, 8.