

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

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

СибОптика-2017

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГУГиТ
2017

УДК 535
С26

Ответственные за выпуск:

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

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

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

Кандидат технических наук, директор СНИИМ, Новосибирск
Г. В. Шувалов

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2017» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 158 с.

ISBN 978-5-906948-38-0 (т. 2)

ISBN 978-5-906948-36-6

ISBN 978-5-906948-11-3

В сборнике опубликованы материалы XIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017», представленные на Международной научной конференции «СибОптика-2017» (секции «Оптическое приборостроение» и «Приборные и метрологические аспекты измерительной техники»).

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-906948-38-0 (т. 2)

ISBN 978-5-906948-36-6

ISBN 978-5-906948-11-3

© СГУГиТ, 2017

Сборник включен в систему РИИЦ.

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СПОРТИВНЫХ ОБУЧАЮЩИХ ПРОГРАММ

Андрей Александрович Зубов

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., 4, аспирант кафедры информационно-измерительных систем, старший преподаватель кафедры физического воспитания, тел. (499)261-41-44, e-mail: azpower@yandex.ru

Евгений Александрович Елкин

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., 4, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем, тел. (499)262-32-11, e-mail: elkin@miigaik.ru

Андрей Александрович Майоров

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., 4, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой информационно-измерительных систем, тел. (499)262-32-11, e-mail: maiorov@miigaik.ru

В статье рассматриваются следующие оптико-электронные системы с целью их применения для создания спортивных обучающих программ. Проводится сравнение различных подходов в этой области, анализируются достоинства и недостатки.

Ключевые слова: измерение параметров движения, оптический диапазон, измерение рельефа поверхности, следящая оптико-электронная система, захват движения.

PROBLEMS IN USING OF ELECTRONIC OPTICAL SYSTEMS TO MEASURE MOTION PARAMETERS FOR CREATING SPORTS TRAINING PROGRAMMS

Andrey A. Zubov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Russia, Moscow, 4 Gorokhovsky Per., graduate student of the Department at the Information-Measuring System, senior lecturer of the Department PE, tel. (499)261-41-44, e-mail: azpower@yandex.ru

Evgeny A. Yolkin

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Russia, Moscow, 4 Gorokhovsky Per., Ph. D., associate Professor of the Department at the Information-Measuring System, tel. (499)262-32-11, e-mail: elkin@miigaik.ru

Andrey A. Mayorov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Russia, Moscow, 4 Gorokhovsky Per., D. Sc., Professor, Head of the Department of Information-Measuring System, tel. (499)262-32-11, e-mail: maiorov@miigaik.ru

The article discusses tracking electronic optical systems with a view to their application in the establishment of sports training programs. Authors made a comparison of different approaches in this area, analyzed the advantages and disadvantages.

Key words: measurement of motion parameters, optical range, object surface scanning, tracking electronic optical system, motion capture.

В последнее время развитию физической культуры и спорта придается все большее значение. Достижения спортсменов, кроме прочего, являются безусловными показателями успешности развития той или иной страны в целом. В спортивной сфере развернулось острое соперничество между странами с привлечением как медикаментозных, так и инновационных технических средств и методов. Очевидно, что так называемые «допинговые» скандалы и пристальное внимание мировой общественности к этому вопросу требует внедрения новых легитимных технологий, призванных повысить результативность тренировок и – как результат – суммарные спортивные достижения на соревнованиях. Базовым и отвечающим за будущий успех практически в любом виде спорта является «постановка» движений, выработка оптимальной моторики.

При написании статьи ставилась задача выбора технических средств, отвечающих поставленным задачам

Безусловно, это комплексная задача, которая в значительной степени может быть решена путем создания систем измерения параметров движения (или систем захвата движения) и, затем, обучающих программ, использующих данные полученные с помощью таких систем.

Авторами статьи был проведен анализ существующих систем измерения параметров движения биологических объектов, на основе которого был сделан вывод относительно целесообразности разработки таких систем с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона. В результате было выдвинуто предположение, что оптико-электронные системы измерения параметров объектов имеют преимущества в случае их применения для создания обучающих программ: при их использовании становится возможным распознавание и отслеживание движений спортсменов в неприспособленной специальным образом спортивной форме, что расширяет диапазон применения подобных систем. Кроме того, существенно упрощается решение задачи создания 3D анимации – ускоряется подготовка к съемкам и появляется возможность так называемого «захвата движений» (motion capture), что актуально для отработки специальной моторики (борьба, падения, прыжки и т. п.) без повреждения оборудования. Кроме всего прочего, стоимость таких систем невысока.

Существующие технологии измерения параметров движения разделяются на маркерные и безмаркерные. При использовании маркерных систем на объект измерения помещаются датчики (излучающие или отражающие) [1]. Камеры фиксируют излучение от датчиков, после чего информация поступает в компьютер, где на ее основании формируется единая трехмерная модель, воспроизводящая движения

На основе этой модели в режиме реального времени или позднее создается анимация движений объекта.

Существующие маркерные системы измерения параметров движения различаются по принципам отслеживания движений. Кроме оптико-электронных систем (активных или пассивных), существуют магнитные, механические и гироскопические системы.

Безмаркерные технологии [2] основаны на использовании оптического диапазона электромагнитного излучения. Они не требуют специальных датчиков или специального костюма. Допустимо использование естественного освещения (пассивные системы, основанные на использовании цветных камер) или подсветка объекта определенным образом (активные системы). В активных системах могут использоваться времяпролетные камеры или структурированное излучение.

Времяпролетная камера [3] определяет дальность через скорость света, измеряя время пролета светового сигнала подсветки, и отраженного каждой точкой получаемого изображения.

Структурированное излучение представляют собой проекцию светового рисунка непосредственно на движущийся объект. Рисунок проецируется с помощью проектора или другого постоянного источника света [4]. Камера, расположенная чуть в стороне от проектора, фиксирует форму рисунка и вычисляет расстояние до каждой точки в поле зрения.

Измерение параметров движения в пассивных системах происходит при помощи обычных оптических камер, разнесенных на некоторое расстояние. Идея метода [5] заключается в следующем: для каждой точки на одном изображении выполняется поиск парной ей точки на втором изображении. Когда обе точки установлены, выполняется триангуляция, позволяющая определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Зная трехмерные координаты прообраза, можно вычислить глубину как расстояние до плоскости камеры.

Каждая из систем имеет свои достоинства и недостатки, оказывающие влияние на поставленную задачу увеличения уровня технической подготовки спортсменов.

1. Недостатки маркерных оптических пассивных систем.

Размещение на человеке отражающих маркеров занимает длительное время. Спортсмены вынуждены носить непривычные приспособления. Кроме того, система может путать маркеры при быстром движении или близком расположении их друг к другу (технологией не предусмотрена идентификация каждого маркера по отдельности)[6].

2. Недостатки маркерных оптических активных систем.

В таких системах [7] вместо отражающих маркеров используются светодиоды, которые нужно закрепить на теле спортсмена. Это вызывает дополнительное сковывание движений.

3. Недостатки маркерных магнитных систем.

В данном случае для захвата используются маркеры-магниты, а в качестве камер используются ресиверы [8]. Положение маркеров вычисляется по искажениям магнитного потока. Основные проблемы метода связаны с использованием магнитов, которые подвержены магнитным и электрическим помехам от металлических предметов и окружения. Кроме того, реализация данного метода имеет более высокую стоимость и меньший радиус действия, по сравнению с оптическими системами. Очевидно, что размещение маркеров магнитов на теле спортсмена также связано с дополнительными неудобствами.

4. Недостатки маркерных механических систем.

Для сбора информации о движениях на теле актера или спортсмена размещается специальное устройство – механический скелет, который повторяет все его движения. Одновременно с этим компьютеру отправляется информация о моторике и углах сгибов человеческих суставов [9]. При интенсивном использовании повышается вероятность выхода из строя механических частей. В дополнение к этому само наличие механических частей на теле спортсмена делает невозможным захват движений при плотном взаимодействии нескольких спортсменов одновременно, что характерно для некоторых видов спорта.

5. Недостатки маркерных гироскопических систем.

Для сбора информации о моторике в данных системах используются миниатюрные гироскопы и инерциальные сенсоры, расположенные на теле спортсмена так же, как маркеры или магниты в других системах захвата движений [9]. Компьютер принимает, обрабатывает и сохраняет информацию с инерциальных сенсоров, при помощи которой можно восстановить положение датчика в пространстве и его относительную ориентацию. Информация передается по проводам, что сильно ограничивает применение системы. Кроме этого гироскопические сенсоры имеют высокую цену.

6. Недостатки безмаркерных систем.

Ниже приводится таблица, в которой сравниваются достоинства и недостатки безмаркерных технологий, что может быть важно для конкретных видов спорта.

Таблица

Сравнение параметров и характеристик безмаркерных технологий захвата движения

3D технология Характеристики и параметры	Времяпролетные камеры	Цветные камеры	Структурированное излучение
Точность	средняя	низкая	высокая
Сложность программно- го обеспечения	низкая	высокая	средняя
Возможность работы в реальном времени	высокая	низкая	средняя
Стоимость материалов	средняя	низкая	высокая
Возможность работы в условиях недостаточ- ного освещения	высокая	низкая	высокая
Разрешение на плоско- сти	высокое	зависит от сцены	среднее
Возможность работы в условиях повышенной освещенности(на улице)	средняя	высокая	низкая

Авторы полагают, что применение безмаркерных технологий, связанных с использованием структурированного излучения оптимально для выполнения поставленных задач в спортивной сфере.

Главной задачей при разработке оптико-электронных систем для измерения параметров движения является уменьшение их зависимости от внешних условий и увеличение радиуса действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. An autonomous dance scoring system using marker-based motion capture / H. Chen, Q. Gang, J. James // *Multimedia Signal Processing*, 2005 IEEE 7th Workshop on, 2005, P. 1–4.
2. A markerless motion capture system with automatic subject-specific body model acquisition and robust pose tracking from 3D data / Z. Zhang, H. Seah, C. Quah, J. Sun // *Image Processing (ICIP)*, 2011 18th IEEE International conference on, 2011, P. 525–528.
3. Mutto C., Zanuttigh P., Cortelazzo G. *Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect* // Springer, P. 116, 2013.
4. Lanman D., Crispell D., Taubin G. Surround structured lighting for full object scanning // *In Proceedings of the International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2007. – P. 107–116.
5. Форсайт Д. *Компьютерное зрение: современный подход*. – М. : Вильямс, 2004. – С. 926.
6. Generating optimized marker-based rigid bodies for optical tracking systems / F. Steinicke, C. Jansen, K. Hinrichs, J. Vahrenhold, B. Schwald // *In 2nd international conference on computer vision theory and applications (VISAPP)*, 2007, P. 387–395.
7. Motion tracking: no silver bullet, but a respectable arsenal / G. Welch, E. Foxlin // *IEEE Computer graphics and applications*, vol. 22, № 6, 2002, P. 24–38.
8. Automatic joint parameter estimation from magnetic motion capture data / J. O'Brien, R. Bodenheimer, G. Brostow, J. Hodgins // *In Proceedings of graphics interface 2000*, 2000, P. 53–60.
9. Все о МОСАР [Электронный ресурс] / В. Епишин // Режим доступа: http://www.render.ru/books/show_book.php?book_id=531 (дата обращения: 23.03.2017).

© А. А. Зубов, Е. А. Елкин, А. А. Майоров, 2017

ЭКСПРЕССНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ДИСПЕРСИИ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Анатолий Иванович Пеньковский

АО «Швабе – Технологическая лаборатория», 420075, Россия, г. Казань, ул. Липатова, 37, начальник НПО-430, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Маргарита Васильевна Фаттахова

АО «Швабе – Технологическая лаборатория», 420075, Россия, г. Казань, ул. Липатова, 37, инженер-конструктор, аспирант КНИТУ КАИ им. А. Н. Туполева, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Анализируются особенности измерений показателя преломления и дисперсии моторных топлив, показана конструкция портативного спектрорефрактометра и приведены расчеты компенсатора дисперсии.

Ключевые слова: показатель преломления, дисперсия, угловая дисперсия, предельный угол.

EXPRESS METHODS OF MEASURING INDEX OF REFRACTION AND DISPERSION OF MOTOR FUELS

Anatoly I. Penkovsky

JSC «Shvabe – Technological laboratory», 420075, Russia, Kazan, 37 Lipatov St., Chief of CPD-430, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Margarita V. Fattakhova

JSC «Shvabe – Technological laboratory», 420075, Russia, Kazan, 37 Lipatov St., graduate student of the KNRTU KAI named after A. N. Tupolev, e-mail: mail@shvabe-techlab.ru

Analyzed are specific features of measuring index of refraction and dispersion of motor fuels. Shown is the design of a portable spectral refractometer and given calculations of dispersion compensator.

Key words: index of refraction, dispersion, angular dispersion, limit of angle, parafinonaphthenic and aromatic components of fuels.

Целью работы является создание удобных экспрессных методов и средств контроля моторных топлив.

Стандартные прямые методы контроля основных эксплуатационных характеристик моторных топлив требуют существенных затрат средств и времени для проведения одного анализа.

Косвенные экспрессные методы затруднены тем, что моторные топлива состоят из множества индивидуальных углеводородов, каждый из которых вносит вклад в общие характеристики топлив. Эти углеводороды обычно делят на три основные группы: парафиновые, нафтеновые и ароматические [1]. Существует ряд методов определения характеристик моторных топлив по соотношению этих групп. Среди методов определения группового состава моторных

топлив наиболее информативным и удобным является рефрактометрический метод с использованием дисперсии показателя преломления [2–4].

Суть рефрактометрического метода состоит в том, что моторное топливо рассматривают как смесь парафино-нафтеновых и ароматических фракций и находят в нем долю ароматических углеводородов $P_{AP\%}$. Для этого сначала измеряют показатель преломления топлива в желтом свете n_D (для длины волны $\lambda_D = 589,3$ нм) и разность показателей преломления $n_F - n_C = \Delta_{FC}$, называемую средней дисперсией (для длин волн водорода $\lambda_F = 486,1$ нм и $\lambda_C = 656,3$ нм), относительно стеклянной измерительной призмы рефрактометра. Затем находят относительную дисперсию топлива:

$$\omega = (n_F - n_C) \cdot 10^3 / (n_D - 1), \quad (1)$$

и сравнивают ее с априори известной усредненной величиной относительной дисперсии парафино-нафтеновых составляющих топлива $\omega_{пн} = 17,55$. По разнице этих величин дисперсий находят долю ароматических углеводородов $P_{AP\%}$ с помощью линейного уравнения

$$P_{AP\%} = K(\omega - 17,55), \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности; ω – относительная дисперсия топлива.

Найденные значения n_D , ω и $P_{AP\%}$ являются главными при определении других характеристик топлив. Так, октановое число бензинов Ω , цетановое число z дизельного топлива, высота некопящего пламени h , нагарный фактор H_ϕ керосинов связаны с n_D и $P_{AP\%}$ следующими формулами, полученными экспериментально:

$$\Omega = 76 + 0,652(P_{AP\%} - 10\%), \quad (3)$$

$$z = 350(1,475 - n_{D_x}) + 46, \quad (4)$$

$$h = 340(1,475 - n_{D_x}) + 19,5 - 0,04P_{AP\%}, \quad (5)$$

$$H_\phi = 150 - 4000(1,453 - n_{D_x}) - 0,15P_{AP\%}, \quad (6)$$

где n_{D_x} – показатель преломления топлива при 20 °С.

Формулы (3)–(6) получены в результате обработки большого массива экспериментальных данных, полученных при исследовании аттестованных образцов топлив (бензинов, дизельных и реактивных топлив) различными методами (рефрактометрическим, дисперсионметрическим, диэлькометрическим, поляризационным). Проведенные исследования показали, что показатель преломления n_D всех видов топлива находится в пределах от 1,3750 до 1,4805, диапазон измерения средней дисперсии Δ_{FC} топлив – от 0,0060 до 0,0120, а предел допустимой погрешности измерений n_D и Δ_{FC} не должен превышать $2 \cdot 10^{-4}$.

Для измерения n_D и Δ_{FC} моторных топлив в лабораториях обычно используют рефрактометры Пульфриха [1], укомплектованные спектральными лампами с громоздкими источниками высокого напряжения, что неудобно для проведения экспрессных анализов топлив.

На рис. 1 показана схема нового портативного спектрорефрактометра ИРФ-479А для контроля качества моторных топлив.

Отличительными особенностями спектрорефрактометра (рис.1) являются измерительная призма 4, выполненная из стекла BK10 ($n_D = 1,5688$, $\Delta_{FC} = 0,01015$, угол призмы $\theta = 66,5^\circ$), наличие компенсатора дисперсии, выполненного в виде одной призмы прямого зрения 5, а также равномерная шкала 10, содержащая 110 делений.

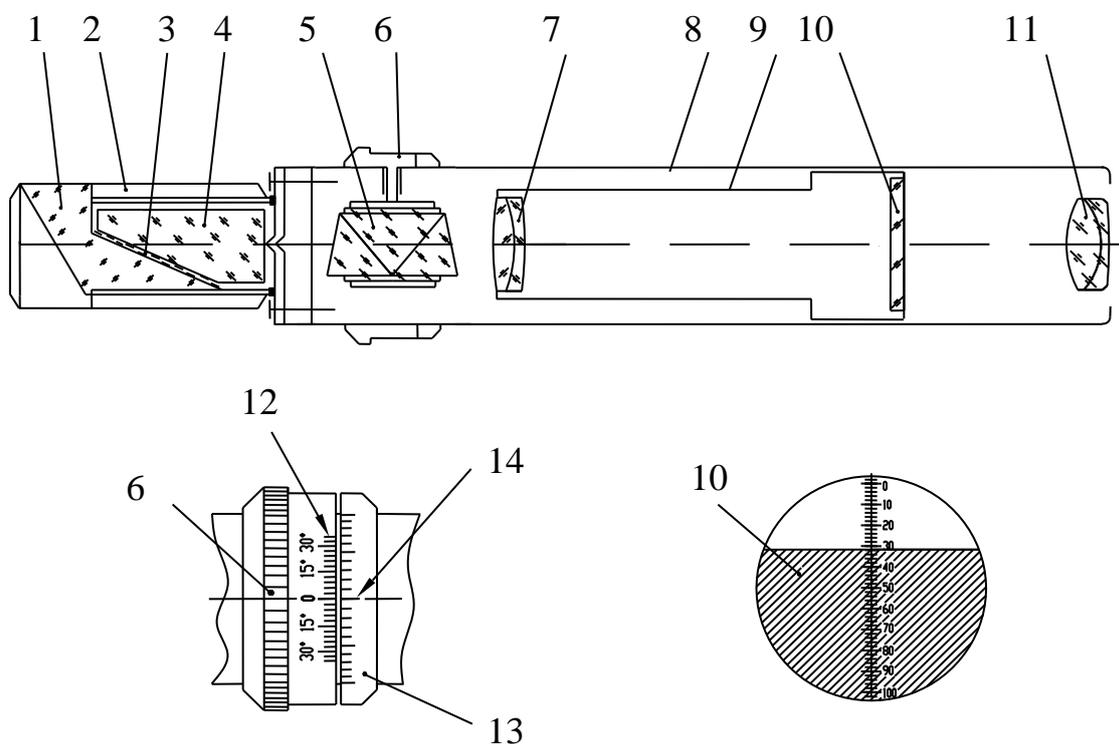


Рис. 1. Структурная схема спектрорефрактометра ИРФ-479А

Принцип работы представленного прибора следующий: белый свет от любого источника света проходит призму-осветитель 1, слой исследуемого топлива 3, преломляется в измерительную призму 4, вторично преломляется на выходной грани призмы 4, проходит через компенсатор 5 и попадает на объектив 7. В фокальной плоскости объектива 7, где установлена равномерная шкала 10, строится изображение границы света и тени, которую можно наблюдать с помощью окуляра 11.

Если наблюдаемая граница света и тени имеет радужную окраску, то необходимо с помощью вращения кольца 6 добиться полной компенсации дисперсионных эффектов, образовавшихся в результате преломления света при его

прохождении через призму 4. Показания в делениях шкалы М с прибора снимают по положению границы света и тени относительно шкалы 10. Показания в делениях шкалы М соответствуют измеренному показателю преломления топлива n_{D_x} :

$$n_{D_x} = n_D \sin \left\{ \theta - \arcsin \left[\left(\frac{1}{n_0} \right) \sin(\beta_{\min} - M\Delta\beta) \right] \right\}, \quad (7)$$

где n_0 – показателю преломления призмы 4; θ – угол между входной и выходной гранями призмы 4; β_{\min} – угол предельных лучей относительно нормали к выходной грани призмы 4 при минимальном показателе преломления топлива; $\Delta\beta$ – цена деления шкалы 10 (град).

По положению шкалы 12 кольца 6 относительно нулевого индекса 14 неподвижного кольца 13 определяют угол поворота φ призмы 5 и находят среднюю дисперсии через конструктивные коэффициенты А и В [1]:

$$\Delta_{FC} = (n_F - n_C) = A + B(\Delta_{FC})_k \sin\varphi, \quad (8)$$

где

$$A = n_0 \sin\theta (\Delta_{FC})_0 / G; \quad (9)$$

$$B = \left(\sqrt{(n_0^2 - n_x^2)(1 - n_0^2 + G^2)} \right) / G; \quad (10)$$

$$G = n_x \sin\theta + \cos\theta \sqrt{n_0^2 - n_x^2}; \quad (11)$$

$(\Delta_{FC})_k = 0,025598$ – угловая дисперсия, вносимая призмой 5.

Подставляя в формулы (9) – (11) значения $n_0 = 1,5688$, $(\Delta_{FC})_0 = 0,01015$, $\theta = 66,5^\circ$ находим, что при изменении n_x от 1,3750 до 1,4805 средняя величина коэффициента А $\approx 0,009304$, а величина коэффициента В меняется от $B_{\min} \approx 0,328819$ до $B_{\max} \approx 0,478996$.

Таким образом, для расчетов средней дисперсии моторных топлив для данной конструкции спектрорефрактометра можно пользоваться формулой:

$$\begin{aligned} \Delta_{FC} &= A + (B_{\min} - (B_{\max} - B_{\min}) \cdot M) \cdot (\Delta_{FC})_{k_{\max}} \cdot \sin\varphi^\circ = \\ &= 0,009304 + (0,479 - 0,001502 \cdot M) 0,025598 \cdot \sin\varphi^\circ, \end{aligned} \quad (12)$$

где М – число делений шкалы 10; $(\Delta_{FC})_{k_{\max}}$ – максимальная угловая дисперсия, вносимая призмой 5; $\varphi^\circ = z \cdot 3^\circ$ – угол поворота призмы 5; z – число делений шкалы 12 относительно индекса 14.

На рис. 2 показана зависимость дисперсии $(\Delta_{FC})_k$, вносимой призмой 5 (компенсатором), от угла поворота φ° призмы 5.

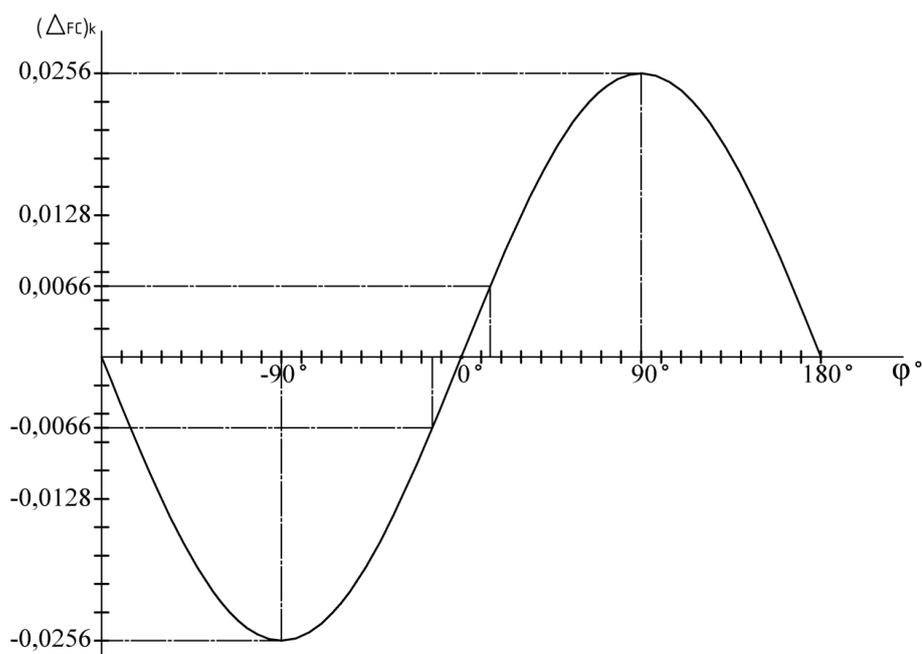


Рис. 2. Зависимость дисперсии $(\Delta_{FC})_k$ от угла поворота φ° призмы 5

Из формулы (12) и рис. 2 видно, что если компенсатор дисперсии находится в исходном положении, т. е. при $\varphi = 0^\circ$, то искомая дисперсия $\Delta_{FC} = 0,009304$ соответствует средней величине диапазона измерения дисперсии моторных топлив. Значит, в диапазоне углов φ° от $\varphi_{\min} = -15^\circ$ до $\varphi_{\max} = +15^\circ$ формула (12) близка к линейной функции, где наблюдается наибольшая ее крутизна, следовательно, достигается наибольшая точность измерений Δ_{FC} .

В результате исследований методов измерения показателя преломления и дисперсии моторных топлив авторам удалось создать простой портативный спектрорефрактометр ИРФ-479А (рис. 1). Если в спектрорефрактометре ИРФ-479А вместо шкалы 10 и окуляра 11 установить многоэлементный фотоприемник, управляемый микропроцессором, а в процессор внести программы на основе формул (7), (12), то процесс экспрессных измерений основных характеристик топлив существенно упростится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. – Л. : Химия, 1974. – 400 с.
2. Иоффе Б. В., Баталин О. Е. Определение группового состава стандартных фракций бензинов // Нефтехимия. – 1964. – 4, 481.
3. Хейфец Е. М. Новые методы определения химического состава топлив и масел. – М. ; Л. : Гостоптехиздат, 1950. – 64 с.
4. Пеньковский А. И., Николаев В. Ф., Боровкова Н. С. Способ экспрессной оценки качества моторных топлив и устройство для его осуществления // Патент РФ№2532638.
5. Пеньковский А. И., Николаев В. Ф., Боровкова Н. С. Новые оптические способы и устройства для анализа качества моторных топлив // Оптический журнал. – 2016. – 83, 4. – С. 63.

© А. И. Пеньковский, М. В. Фаттахова, 2017

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ ТЕПЛОВОЙ ПРИЕМНИК ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Святослав Дмитриевич Иванов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, аспирант, тел. (383)330-79-86, e-mail: ivanow183@mail.ru

Эдуард Геннадьевич Косцов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор физико-математических наук, тел. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

В работе описывается новый принцип создания быстродействующего теплового приемника ИК-излучения. Он основан на использовании пьезоэлектрического эффекта в тонких высококачественных кристаллических пленках. Конструкция приемника исключает необходимость его теплоизоляции, его работа основана на генерации и накоплении заряда при воздействии импульсов излучения. Создана математическая модель чувствительного элемента и приведены экспериментальные исследования особенностей его функционирования, показано их соответствие модельным представлениям.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, ИК-излучение, тонкая пленка, ниобат бария-стронция, импульс излучения.

FAST RESPONSE UNCOOLED THERMAL IR-RADIATION DETECTOR

Svyatoslav D. Ivanov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, graduate student, tel. (383)330-79-86, e-mail: ivanow183@mail.ru

Eduard G. Kostsov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, D. Sc., tel. (383)330-79-86, e-mail: kostsov@iae.nsk.su

A new approach of development of a fast-response thermal IR detector is described. The physical principle behind the functioning of the element is the pyroelectric effect in thin high-quality crystalline films. The element does not need to be thermally insulated and its work is based on the generation and accumulation of charge during action of radiation pulses. A mathematical model of the element has been created and experimental studies of features of element functioning have been conducted. The correspondence of experimental data and the model was shown.

Key words: pyroelectricity, IR-radiation, thin film, strontium barium niobate, radiation pulse.

Неохлаждаемые тепловизионные устройства получили широкое распространение в различных сферах деятельности человека. Среди них можно отметить промышленную термографию, неразрушающий контроль состояния и диагностику энергетического оборудования, мониторинг исправности элементов городской инфраструктуры [1]. Все большее применение находит термография в медицинских приложениях при выявлении заболеваний органов человека, которые сопровождаются локальным изменением нормальной температуры,

а также при диагностике воспалительных, сосудистых, опухолевых заболеваний [2]. В военной отрасли неохлаждаемые ИК матрицы используются для создания тепловизионных камер и прицелов, работоспособных в условиях нулевой видимости [3].

Современные тепловые приемники регистрации ИК-излучения, пироэлектрические и болометрические, основаны на обеспечении максимальной теплоизоляции чувствительного элемента. В них используется режим детектирования излучения, основанный на накоплении тепла от воздействия энергии излучения в объеме приемника за время кадра. С этой целью чувствительный элемент максимально теплоизолируется от подложки. В матрицах тепловых приемников теплоизоляция достигается за счет использования технологии глубокого и сухого травления кремния, с применением «жертвенных» слоев (полиимида, поликремния и т. п.). На поверхности созданных таким путем мембранных конструкций с толщинами менее 1 мкм, удерживаемых над поверхностью подложки на высоте порядка 2 мкм, с помощью микробалок, поддерживающих «ног», размещается фоточувствительный элемент – тонкопленочная структура.

В России одним из наиболее практически используемых одноэлементных ИК-приемников является МГ-33, выпускаемый в АО НПП «Восток». Его работа основана на использовании пироэлектрического эффекта в тонких органических пленках поливинилдентофторида (ПВДФ), величина пироэлектрического коэффициента в которых равна $0.2-0.5 \cdot 10^{-4}$ Кл/(м²·К), обнаружительная способность не менее $3 \cdot 10^8$ см·Гц^{1/2}/Вт⁻¹, [4]. На рис. 1 изображена его схематическая конструкция, иллюстрирующая принцип теплоизоляции чувствительного элемента от подложки.

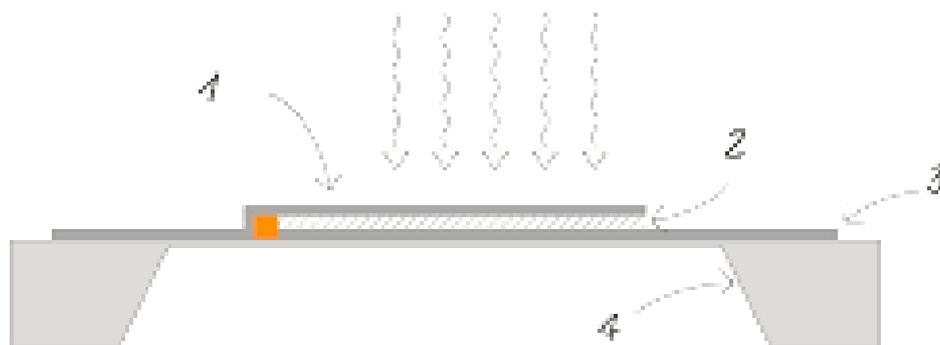


Рис. 1. Конструкция ИК-приемника МГ-33:

1 – поглощающий электрод; 2 – пленка ПВДФ; 3 – нижний электрод; 4 – микробалки, изолирующие элемент от подложки

Ранее нами был предложен новый подход к построению элемента тепловой матрицы приемников ИК-излучения, [5], основанный также на использовании пироэлектрического эффекта. Элемент не теплоизолируется от подложки, наоборот, достигается максимально возможный тепловой контакт твердое тело – твердое тело для обеспечения наиболее высокой скорости изменения средней

температуры элемента, после прекращения действия импульса излучения. В этом случае синтез пироэлектрической пленки осуществляется непосредственно на подложку, что значительно более технологично по сравнению с совокупностью процессов при создании теплоизолированных чувствительных элементов. Схематически элемент представлен на рис. 2.

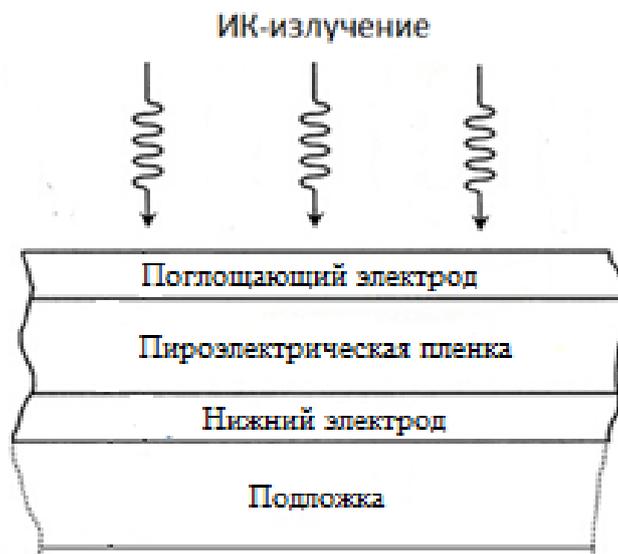


Рис. 2. Конструкция элемента – многослойная структура

Целью настоящей работы является как экспериментальное, так и теоретическое исследование отклика указанных тонкопленочных пироэлектрических приемников излучения на воздействие коротких импульсов излучения, микро – наносекундный диапазон, а также определение реальных параметров таких приемников. Объектом исследования является тонкопленочная структура: поглощающий электрод – пироэлектрический слой – нижний электрод – подложка (рис. 2). Рассматривался случай, когда на поглощающий электрод поступает излучение в течение времени, t_p , импульс излучения, а на другой границе – на поверхности подложки, поддерживается постоянная температура. Такое предположение допустимо в силу того, что толщина пироэлектрической пленки много меньше толщины подложки.

Для анализа нестационарного распределения температуры в указанной многослойной структуре была разработана математическая модель теплового процесса, позволяющая в каждый момент времени определять распределение температуры в этой структуре, в зависимости от интенсивности и длительности поступающего на поглощающий электрод излучения, и, соответственно, величину пироэлектрического сигнала, генерируемого в пироэлектрической пленке.

Показано, что для наиболее эффективного использования энергии излучения при генерации заряда, необходимо согласовывать длительность импульса излучения t_p с толщиной пироэлектрического слоя, d_p , оптимальная величина t_p равна $2d_p^2 / \chi_p$, где χ_p – температуропроводность пироэлектрика.

При поглощении излучения в электроде (например, в тонкой пленке золотой черни) время первоначального отклика элемента определяется временем распространения тепловой волны в электроде (порядка d_{el}^2/χ_{el} , где d_{el} – толщина электрода, χ_{el} – его температуропроводность). На рис 3 представлен пример зависимости пироэлектрического тока от величины d_{el} .

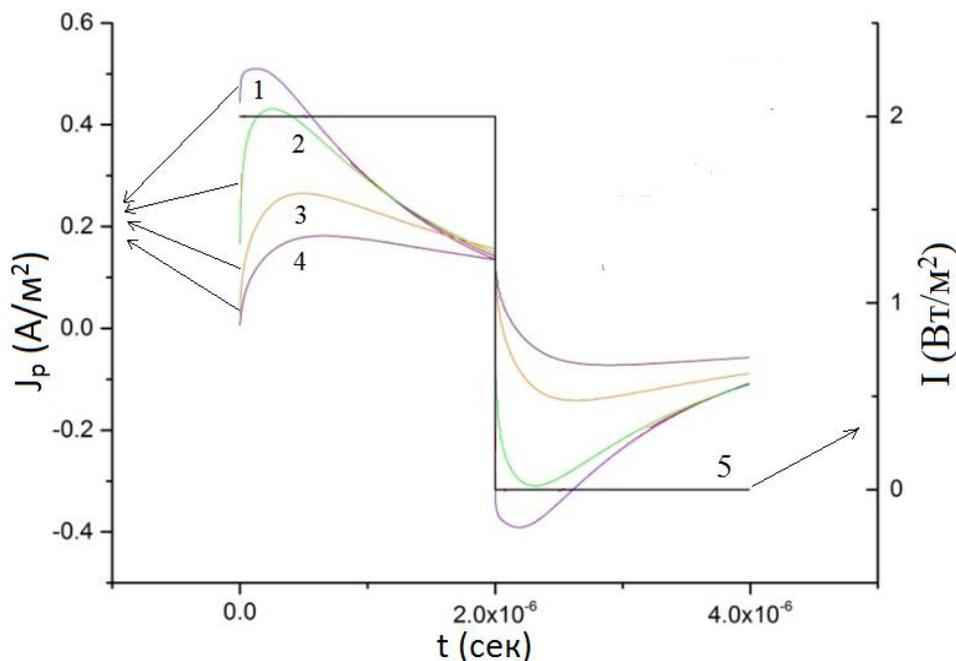


Рис. 3. Зависимость пироэлектрического тока от толщины поглощающего верхнего электрода, длительность импульса, $t_p = 2$ мкс, $d_p = 1.5$ мкм, $I = 2$ Вт/м². Толщина верхнего электрода d_{el} : 1 – 0.01 мкм, 2 – 0.1 мкм, 3 – 0.5 мкм, 4 – 1 мкм

Проведено экспериментальное исследование поведения пироэлектрического тока в указанной структуре при воздействии на нее импульсов излучения. Объектом исследований являлись тонкопленочные структуры: ИТО (нижний электрод)-SBN (пироэлектрический чувствительный слой)-Cr или Al (верхний, поглощающий электрод). Пироэлектрические гетероэпитаксиальные пленки SBN ($Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb_2O_6$) были синтезированы на поверхности пленок ИТО, ($In_2O_3 + 10\% SnO_2$), которые осаждались на поверхность кремния или сапфира, они имеют высокое значение пироэлектрического коэффициента, γ , до $8 - 20 \cdot 10^{-4}$ Кл/(К·м²), абсолютное значение которого определялось методом низкочастотной модуляции температуры, [6]. В качестве поглощающего электрода использовались тонкие пленки Al или Cr. Источником импульсного излучения служил полупроводниковый лазер, модулированный импульсами напряжения с фронтами 50–100 нс и частотой следования от 4 до 700 кГц. Плотность потока энергии поглощаемой в электроде составляла $10^2 - 10^3$ Вт/м² (в абсолютном выражении 100–300 мкВт).

Образцы являлись генераторами пироэлектрического тока, J_p , который с помощью быстродействующего трансимпедансного усилителя линейно преобразовывался в напряжение, подаваемое на цифровой осциллоскоп, позволяющий фиксировать форму и параметры пиротока при различных частотах модуляции и напряжениях смещения на элементе. Площадь исследуемых элементов составляла $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$.

Типичное модельное поведение пироэлектрического тока, $J_p(t)$, в указанной многослойной структуре с величиной d_p равной 3 мкм, при воздействии на нее импульса излучения длительностью $t_p = 500 \text{ нс}$ представлена на рис. 3, график 1. Кривая 2 является зависимостью поступающего на элемент излучения от времени $I(t)$, а кривая 3 характеризует поведение средней по объему пироэлектрика температуры, $T_{cp}(t)$. Все величины представлены в безразмерном виде.

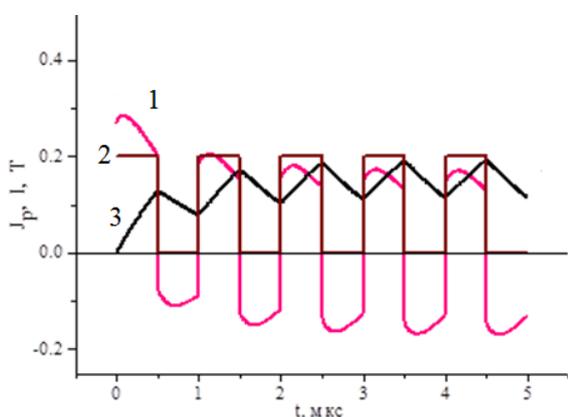


Рис. 3а. Модельное описание



Рис. 3б. Эксперимент

На рис. 3б представлена экспериментальная кривая описывающая поведение $J_p(t)$ (график 1), а кривая $I(t)$ описывает проведение импульса излучения (график 2), его длительность 800 нс, а плотность 10^3 Вт/м^2 , $d_p = 3 \text{ мкм}$. Как видно, модельные представления качественно соответствуют экспериментальными данными.

Оценки показывают, что при размерах указанного элемента $12 \times 12 \text{ мкм}$, он обладает высокой обнаружительной способностью, D^* , близкой к теоретическому пределу, до $10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0.5} / \text{Вт}^{-1}$. При более высокой по сравнению с современными микроболометрами его технологичностью, можно полагать, что на основе таких элементов могут быть созданы мегапиксельные неохлаждаемые ИК матрицы для регистрации теплового изображения.

Таким образом, разработан и экспериментально исследован быстродействующий приемник ИК-излучения на основе нетеплоизолированных тонких пироэлектрических пленок. Создана математическая модель элемента, установлено хорошее соответствие экспериментального поведения пироэлектрического тока в многослойной тонкопленочной структуре на основе ниобата бария стронция с его модельным описанием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shakmak B., Al-Habaibeh A. Detection of Water Leakage in Buried Pipes Using Infrared Technology // IEEE Jordan Conf. Appl. Electr. Eng. Comput. Technol. 2015.
2. Иваницкий Г. Р. Тепловидение в медицине // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76, вып. 1. – С. 48–62.
3. Corsi C. A Key Technology for Security Systems // Adv. Opt. Technol. – 2012. – Vol. 2. – P. 1–15.
4. НИИ «Восток» ФГУП [Электронный ресурс] // Малогабаритный приемник оптического излучения пироэлектрический. – Режим доступа: www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf.
5. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. Тепловые приемники многоэлементных неохлаждаемых тепловизионных матриц. Ч. II: Новые, нетеплоизолированные элементы // Автометрия. – 2016. – Т. 52, вып. 1. – С. 104–115.
6. Garn L.E. Use of low-frequency sinusoidal temperature waves to separate pyroelectric currents from nonpyroelectric currents . Part I . Theory // Journal of Applied Physics – 1982. – Vol. 53. – P. 8974–8979.

© С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов, 2017

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В РАЗРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИДЕОКАМЕР НАНОДРОНОВ

Марина Петровна Егоренко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры наносистем и оптоотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Виктор Сергеевич Ефремов

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

Иван Александрович Катков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и оптоотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: ichikkid@gmail.com

Проведено сравнение современных технологий получения преломляющих поверхностей оптических деталей, достижимых параметров в сравнении с технологией 3D печати и с расчетными значениями допусков на разработку оптических систем видеокамер нанодронов.

Ключевые слова: оптический материал, оптические свойства, выбор, требования к нанодрону, 3D печать.

PERSPECTIVES OF TECHNOLOGY 3D PRINTING IN THE DEVELOPMENT OF OPTICAL SYSTEMS CAMERA NANODRONS

Marina P. Egorenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior lecturer of the Department of Nanosystems and Optics Engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: e_m_p@mail.ru

Victor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. associate Professor of the Department of Nanosystems and Optics Engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Ivan A. Katkov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., undergraduate of the Department of Nanosystems and Optics Engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: ichikkid@gmail.com

A comparison of modern technologies of refractive surfaces of optical components, attainable parameters in comparison with the technology of 3D printing and with the calculated values of the tolerances for the development of optical systems nanodrons cameras.

Key words: optical material, the optical properties, the choice to the requirements of nanodron, 3D printing.

Разработкой беспилотных летательных аппаратов или дронов активно занимаются многие лаборатории мира. Это одно из самых перспективных направлений развития современных технологий, так как дроны могут использоваться для выполнения миссий потенциально опасных или же сложных для человека.

Нанодроны – маленькие, иногда миниатюрные летательные устройства, обладают огромными возможностями. Их уже сейчас используют для задач тактической разведки как в гражданских, так и в военных целях (например, нанодрон PD-100 Black Hornet [1, 2]).

Особенно жесткие требования по массогабаритным характеристикам предъявляются к перспективным разработкам оптических систем видеокамер нанодронов «особо» малого размера (например, размером с крупных насекомых), разработка которых ведется в разных странах мира, в том числе и в России [3].

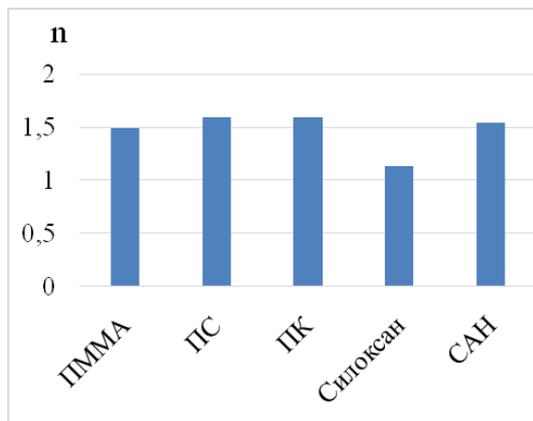
При разработке оптических систем видеокамер нанодронов «особо» малого размера следует учитывать технологию изготовления оптических деталей. Малые диаметры линз (1–5 мм и менее) ограничивают возможности традиционных технологий. Так положительные линзы микро- и фотообъективов, светосильных конденсоров из неорганических материалов с радиусами $R_1 \leq 15$ мм $< R_2$ и отношением $d_1 = (0,8 - 1,3) R_1$, точностью формы поверхности $N = 1,0$, $\Delta N = 0,2$ и чистотой P от II до IV класса составляют тип деталей, изготавливаемых по особой «шариковой» технологии. Шариковая технология предъявляет высокие требования к точности размеров заготовки, что значительно удорожает производство оптических деталей [4]. Кроме того, фактор массы оптического материала является основным, поэтому силикатные стекла и другие неорганические материалы не желательны к применению.

Для разработки «сверхлегкой» оптической системы, было проведено исследование оптических и физических свойств разных материалов [5–8]. При этом, явное преимущество по плотности имели органические материалы – оптические пластики: полиметилметакрилат (ПММА), полистирол (ПС), поликарбонат (ПК), силоксан (силикон), стирол-акрилонитрил (САН). Для ряда пластиков и фотополимеров полных оптико-физических данных получить не удалось. На рисунке приведены некоторые физико-химические параметры ряда пластических материалов.

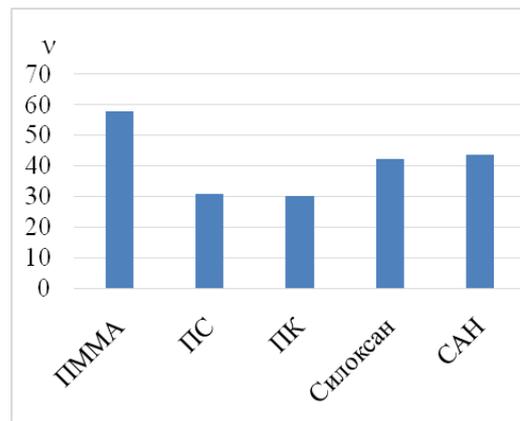
Для разработки «сверхлегкой» оптической системы видеокамеры нанодронов «особо» малого размера было проведено исследование оптических схем выполненной из одного оптического материала. В частности, такое техническое решение по компенсации хроматизма зеркалами Манжена, было предложено в патенте [9].

Объектив имеет следующие оптические параметры:

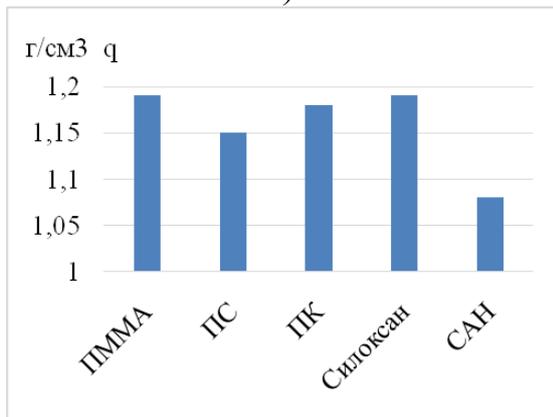
- фокусное расстояние – 10 мм;
- диафрагменное число – 1,4,
- угол поля зрения – 12° ;
- размер абберационного кружка рассеяния – не более 3–5 мкм.



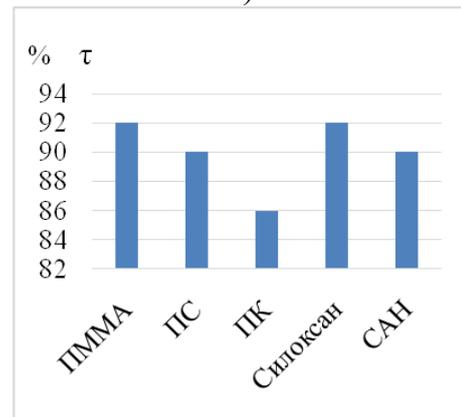
а)



б)



в)



г)

Рис. Некоторые параметры оптических пластиков:

а) показатель преломления; б) коэффициент дисперсии; в) плотность; г) светопропускание

Для обеспечения такого качества изображения были рассчитаны допуски на конструктивные параметры объектива, численные значения которых приведены в таблице.

Таблица

Допуски на конструктивные параметры объектива в мм

№ пов.	Радиус	Отклонение		Толщина	Отклонение		Децентрировка		Наклон	
		-	+		-	+	по X	по Y	по X	по Y
1	11,33	0,15	0,15	0,86	0,05	0,05	0,28	0,19	0,22	0,14
2	17,80	0,43	0,45	2,63	0,05	0,05	0,71	0,35	0,19	0,08
3,5,9	-24,46	0,26	0,22	0,79	0,04	0,04	0,59	0,26	0,08	0,06
4	-29,55	0,23	0,24	0,79	-	-	0,37	0,10	0,10	0,03
6,8	-24,46	0,26	0,22	-	-	-	0,34	0,20	0,07	0,04
7	41,51	0,94	0,86	-	-	-	0,53	0,16	0,06	0,02
10	-29,55	0,23	0,24	2,58	0,10	0,10	0,76	0,61	0,09	0,07
11	1,91	0,36	1,15	0,29	1,55	0,70	0,26	0,14	0,26	0,18
12	4,69	1,6	7,12	0,38	-	-	0,70	0,32	0,37	0,16

Рассмотрим возможности некоторых технологий для изготовления оптических деталей данного объектива.

Литьем под давлением изготавливают все виды линз из пластика [4]. Точность литых полимерных деталей сравнительно невысока: отклонение преломляющих поверхностей от заданной формы составляет $20N$ и более интерференционных полос. Геометрические размеры литых деталей находятся в пределах четвертого-пятого классов точности. Основным недостатком данной технологии является значительная усадка материала при остывании, что требует учета при изготовлении сферических формующих поверхностей пуансонов. Корректировка формы поверхности требуется под каждый оптический материал.

$$\Delta r_1 = - (kr_1/r_2) (r_2 - r_1 + 0,33d),$$

где Δr_1 – необходимое изменение радиуса формующего пуансона;

r_1, r_2 – расчетные радиусы линзы;

d – толщина линзы по оси;

k – коэффициент деформации (для полиметилметакрилата $k = 0,031$).

Сферическую поверхность пуансона выполняют с точностью до двух интерференционных полос, обеспечивая центрировку в пределах $(5 \times 10^{-5}) - (1 \times 10^{-4})$ м и шероховатость $R_z = 0,063 - 0,050$ мкм.

В качестве перспективной технологии по изготовлению микро оптики из пластических материалов можно предположить технологию 3D печати [10, 11].

Как известно, качество и точность FDM 3D принтера определяются:

– точностью позиционирования по осям X и Y – это параметр, определяющий точность перемещения печатающей головки 3D принтера относительно заданных компьютером координат. Точность позиционирования у всех принтеров практически идентична от 6 до 30 мкм.

– толщиной слоя (высота шага по оси Z) – шаг механики очень мал. Современные 3D принтеры способны сдвигать платформу на ничтожно малое расстояние – 2,5 мкм. Однако, это ограничивает высоту слоя при печати до 2,5 мкм. Существует целый ряд физических ограничений, не позволяющих создавать слои такого размера. Например, экструдер выдавливает расплавленную вязкую каплю пластика и «ничтожно мелкой» ее сделать не может.

Экспериментально определена оптимальная высота слоя для FDM 3D печати – 200 мкм. При такой высоте слоя капля образуется достаточно большой, чтобы склеиться с предыдущим слоем и надежно зафиксироваться на поверхности. Приемлемой является высота слоя 100 мкм, но такая настройка вдвое увеличивают время печати и делают объект более хрупким.

Реальный размер «точки» намного больше зависит от диаметра отверстия сопла экструдера, чем от высоты слоя. Экспериментально был определен оптимальный диаметр сопла 400–500 мкм.

Стереолитография более высококачественная технология 3D печати. Классические DLP принтеры имеют самую высокую детализацию и скорость печати на рынке. Разрешение проектора формирует размер точки. Со штатным проектором размер точки – 50 мкм, высота слоя – 50 мкм.

3D принтеры построенные на базе классической SLA технологии обеспечивают толщину лазерного луча размер точки по оси X/Y – 300 мкм и высоту слоя – 50 мкм. Существенным недостатком стереолитографии является ограниченный ассортимент прозрачных фотополимеров и отсутствие оптических данных на них.

Из сравнения данных таблицы с параметрами 3D принтеров можно сделать вывод о возможности применения технологии 3D печати для изготовления оптических деталей микро объективов видеокамер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. PD-100 BlackHornet – разведывательный нанодрон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://itc.ua/blogs/pd-100-black-hornet-razvedyivatelnyiy-nano-dron/>.
2. Нанодрон Crazy Flie Nano – новая высокотехнологичная забава для энтузиастов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mir24.net/news-science/324-techno-news/3851-nanodron-crazyflie-nano-novaya-vysokotekhnologichnaya-zabava-dlya-entuziastov>.
3. Популярная механика. В Техасе разрабатывают «тараканов-киборгов» [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.popmech.ru/science/56056-v-tekhase-razrabatyvayut-tarakanov-kiborgov/>.
4. Справочник технолога-оптика : справочник / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Байгожин и др. ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.
5. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 284 с.
6. Серова В. Н. Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров : монография. – Казань : КГТУ, 2010. – 540 с.
7. Слюсар В. И. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 5. – С. 54–60.
8. Катков И. А., Егоренко М. П. Анализ свойств оптических материалов для многодиапазонных объективов видеокамер нанодронов /// Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 3–7.
9. Пат. 98072 на полезную модель Российская Федерация, МПК⁴G02B 17/00. Российская Федерация МПК51 G01C 3/00; Двухспектральная зеркально-линзовая система / М. П. Егоренко, В. С. Ефремов; заявитель и патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – № 2010108755/22(012273); заявл. 09.03.10, опубл. 27.09.10.
10. Ликбез о точности и качестве современной 3D печати. FDM, SLA 3D принтеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dprinter.ua/3d-print-quality/>.
11. Вся правда о быстром прототипировании. Достоинства и недостатки технологии FDM глазами независимого эксперта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=8311>.

© М. П. Егоренко, В. С. Ефремов, И. А. Катков, 2017

РОБОТОТЕХНИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Геннадий Александрович Сырецкий

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, тел. (383)346-11-77, e-mail: sga-2002k@mail.ru

Показана необходимость повышения производительности труда и внедрения в промышленность передовых технологий. Отражено современное состояние автоматизации и роботизации производств приборостроительной отрасли. Дан краткий анализ и показаны возможные пути расширения применения автоматизированных систем и робототехнических комплексов в производстве оптических и электронных приборов.

Ключевые слова: автоматизация, PLM-система, MES-система, промышленный робот, робототехнический комплекс.

ROBOTICS AND AUTOMATION OF MANUFACTURING: MODERN STATE

Gennady A. Syretsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St.; Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx Prospect, Ph. D., tel. (383)346-11-77, e-mail: sga-2002k@mail.ru

The need to increase the labor productivity and introduce the advanced technologies in industry is shown. The current state of automation and industries robotization are presented. A brief analysis is given and possible ways for expanding the use of automated systems and robotic complexes in the production of optical and electronic devices are shown.

Key words: automation, PLM-system, MES-system, industrial robot, robotic complex.

Земная цивилизация с момента своего возникновения постоянно стремится к улучшению условий жизни, повышению благосостояния людей и мирному сосуществованию. Их достижение неразрывно связано с необходимостью повышения производительности труда, подготовки квалифицированных кадров и эволюционными процессами научно-технического прогресса. Кстати, Президент РФ В. В. Путин, выступая на съезде Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) 16 марта 2017 года, в Москве, отметил, что в России «на рубеже 2019–2020 годов темпы роста должны опережать мировые» и для этого необходимо «...существенно увеличить производительность труда и обеспечить промышленность квалифицированными кадрами, ускорить разработку и внедрение передовых технологий...». Повышение производительности как физического, так и умственного труда предполагает совершенствование его организации и использование искусственно созданных человеком различных помощников, осуществляющих автоматизацию множества управленческих, инженерных, производственных, технологических и бизнес-процессов.

Стремление людей к комфортности обслуживания зародилось «с древнего желания подделывать богов» искусственными существами. Об этом свидетельствуют многие мифы и фантазии наших далеких предков, в частности, таковыми были «золотые служанки» в знаменитой эпосе «Илиада» древнегреческого поэта Гомера – это, в современном представлении, говорящие человекоподобные роботы (андрóиды) с интеллектом, которых «самым различным трудам обучили».

Роботы, в зависимости от назначения, могут иметь различные конструкции и внешний вид, не напоминающий человеческую внешность. В настоящее время они служат основой роботизации ряда процессов многих производственных и постпроизводственных стадий жизненных циклов изделий гражданского и военного назначения, в том числе оптического и электронного приборостроения. Прогресс в области вычислительной, сенсорной и электромеханической приводной техники микро- и нанометрового уровня исполнения способствовал появлению кибернетических организмов (киборгов) и киборгизации. Киборг – это биологический организм с согласованной встроенной технической системой, определенного технологического уровня исполнения. Такое встраивание предоставляет работодателю новые возможности для обеспечения как безопасности труда производственного персонала, так и требуемого уровня организации процесса производственного менеджмента.

Конкуренция высокотехнологичной продукции предполагает ускоренное ее создание и производство на основе текущих достижений научно-технического прогресса. Это способствует расширению области применения системной инженерии, определяемой ГОСТ Р 56862–2016 как «совокупность знаний, методик, принципов и подходов к решению производственных и управленческих задач, основанных на представлении об объектах и субъектах работ как о взаимодействующих системах и требованиях максимальной интеграции информации, управленческих решений и взаимодействия участников», и организации на предприятии системы менеджмента знаний, в том числе и в области системного инжиниринга.

Ныне работа любого предприятия, в том числе оптического и электронного приборостроения, немислима без поддержки электронными цифровыми информационными технологиями управления и автоматизированными системами, начиная с технологического уровня и кончая уровнем управления стратегией для руководителей высшего звена. В современных условиях наблюдается интеграция автоматизированных систем, относящихся к определенному уровню, так и по вертикали управления работой промышленного предприятия, производственной организации. Она сопровождается формированием единого электронного информационном пространстве (ЕИП) пространства, в котором появляется виртуальная составляющая организации, производственной компании, именуемая *виртуальным предприятием*. Его функционирование и взаимодействие с внешним окружением осуществляется разными по назначению и наименованию виртуальными агентами (программными роботами). Создание ЕИП основывается на концепции, принципах и технологиях (информационных технологиях описаний изделий, производственной среды и процессов, которые проте-

кают в этой среде) CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) и агентно-ориентированных виртуальных предприятий. Отображением возможностей CALS являются PLM-решения (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом продукции), в частности, ориентированные на IP-протокол, широкий спектр взаимодействий различных категорий пользователей, использование веб-технологий и СУБД, интеграцию различных открытых автоматизированных систем поддержки решения управленческих задач, инженерной деятельности, производственных процессов и встроенных в технологическое оборудование и приборы. В докладе обсуждаются возможности PLM-решений, которые предлагаются на российском рынке рядом фирм для автоматизации решения множества задач промышленных предприятий, в том числе и производства. Например, таких популярных в России зарубежных компаний как Dassault Systemes, Parametric Technology Corporation и Siemens (рис. 1). Примером отечественного решения служит ЛОЦМАН:PLM компании АСКОН. Поддержка программными средствами многокомпонентной спецификации ISO 13584 PLIB упрощает объединение участников виртуального предприятия, информационную поддержку процессов конструкторской и технологической подготовки производства и логистики. Причем они позволяют моделировать семейства сходных изделий. Стандарты STEP устанавливают единые формы, способы представления и толкования данных на всех этапах жизненного цикла продукции обычного и виртуального предприятия. Их объединяющей основой служит язык Express. Практически информационная модель какого-либо приложения (STEP-модель) может быть выражена средствами графического (Express-G) либо текстового языка Express. Стандарты STEP ориентированы на поддержку моделирования лишь одного изделия. Спецификации стандартов STEP и ISO 13584 PLIB нашли свое отражение в программных продуктах ряда зарубежных и отечественных компаний.

С PLM-решениями связан модельно-ориентированный процесс подготовки производства, изготовления и сборки, часто сопровождаемый созданием цифровых моделей производств. Использование цифровых моделей возможно как на этапе проектирования и отладки виртуального производства, так и в режиме реального времени для мониторинга процессов и корректировки протекающих производственных процессов.

Ряд задач производственной зоны решается посредством функционала производственных исполнительных систем (MES-систем), функции и примеры которых обсуждаются в докладе.

Системы производства обмениваются информацией с автоматизированными системами технологической зоны. В технологической зоне располагаются различные технологические механизмы, стационарные и подвижные машины, технологическое оборудование, в том числе оснащенные системами числового программного управления (СЧПУ) и поддерживаемые работой автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП).



а)



б)

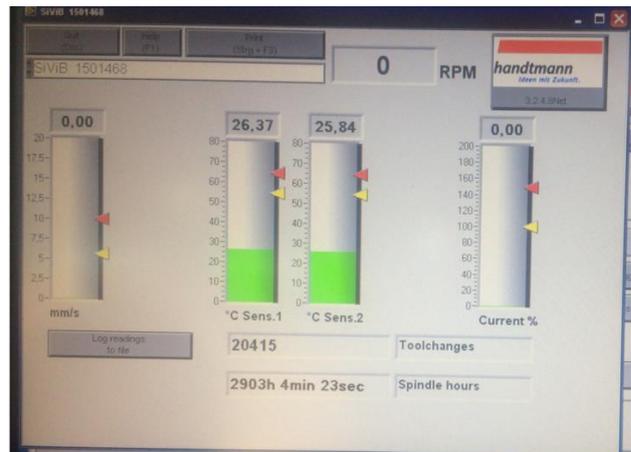
Рис. 1. PLM-система управления TeamCenter подразделения Siemens Industry Software:

а) классическое представление состава; б) представление, ориентированное на поддержку технологий системного инжиниринга

Для предприятий приборостроения актуально технологическое оборудование, реализующее в автоматизированном режиме множество технологий литья, нанесения покрытий, маркирования, механообработки различных материалов и позволяющее автоматизировать процессы изготовления печатных плат, нанесение паяльной пасты или клея на печатные платы, расстановки элементов на печатной плате, навесного монтажа и пайки, сборки печатных плат и изделий. В настоящее время возможна разработка и отладка управляющих программ в инструментальной 2D и 3D виртуальной среде как СЧПУ (рис. 2), так и на персональном компьютере. В докладе приводятся примеры таких инструментальных сред для различных средств технологического оснащения и отмечаются их особенности.



а)



б)

Рис. 2. Пульта управления металлообрабатывающего станка с СЧПУ:

а) с двумя панелями; б) одна из мнемосхем оператора-технолога

Для решения различных промышленных задач разрабатывают и используют промышленные роботы. Их использование наблюдается и на предприятиях приборостроения, в частности, в виде роботизированных модулей и робототехнических комплексов, решающих задачи механообработки разных материалов, пайки, сварки, окраски, сортировки, измерения, сборки и транспортировки.

Согласно ГОСТ Р 60.0.0.2-2016 (ISO 8373:2012) *промышленный робот* определяется как «автоматически управляемый, перепрограммируемый манипулятор, программируемый по трем или более степеням подвижности, который может быть установлен стационарно или на мобильной платформе для применения в целях промышленной автоматизации», а *манипулятор* – «устройство, механизм которого обычно состоит из нескольких звеньев, вращающихся или перемещающихся поступательно друг относительно друга с целью взятия и/или перемещения объектов (деталей или инструмента), как правило, по нескольким степеням свободы». С учетом приведенных определений различают промышленные манипуляционные роботы, которые ориентированы на выполнение технологических операций, и транспортные роботы (мобильные роботы), осуществляющие внутрицеховые и межцеховые перемещения на своей платформе различных физических объектов, грузов. Мобильный робот – «робот, способный передвигаться под своим собственным управлением».

В робототехнических комплексах и роботизированных линиях роботы могут работать автономно, совместно друг с другом и во взаимодействии с человеком в рабочем пространстве (рис. 3). Взаимодействие оператора с роботом определяется его программно-аппаратными устройствами ввода-вывода информации. Так, возможно взаимодействие с использованием задающих устройств (например, кнопок, джойстиков), звуковое (речевых команд, звуковых сигналов), визуальное (жестов, распознавания мимики) и через церебральные интерфейсы (нейрокомпьютерный интерфейс или интерфейс мозг-компьютер). Последние детально обсуждаются в докладе.



Рис. 3. Примеры совместной работы человека с роботами

В нашей стране используются в основном промышленные роботы, производимые зарубежными компаниями, например, Fanuc Robotics и KUKA Roboter GmbH. Каждая из них представляет широкий модельный ряд роботов для разнообразных приложений (рис. 4).



Рис. 4. Промышленные роботы компании Fanuc Robotics:

- а) фрагмент модельного ряда роботов;
- б) интеллектуальный переносной пульт;
- в) системный контроллер

В заключительной части доклада проводится сравнительный анализ возможностей и показывается целесообразность широкого использования роботов различных компаний в робототехнических комплексах технологических систем промышленных предприятий приборостроительной отрасли.

© Г. А. Сырецкий, 2017

ПОРОГИ ЦВЕТРАЗЛИЧЕНИЯ В МОДЕЛИ *RGB* С ГЛУБИНОЙ ЦВЕТА 8 БИТ

Ирина Георгиевна Пальчикова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)306-58-74, e-mail: palchikova@gmail.com

Евгений Сергеевич Смирнов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, младший научный сотрудник, тел. (965)823-23-75, e-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru

Показано, что аналого-цифровое преобразование *RGB* сигнала фотоприемной матрицы вносит систематическую ошибку в значения доминирующей длины волны и насыщенности цвета образца, определяемые из его цифрового изображения, и приводит к необходимости применения методов интервального анализа при оценке близости цветов. Предложен способ нахождения интервалов значений доминирующей длины волны и насыщенности цвета образца. Методом вычислительного эксперимента выявлена спектральная зависимость для порогов цветоразрешения, подобная характеристикам глаза человека.

Ключевые слова: цифровое изображение, цвет, доминирующая длина волны, насыщенность, *RGB* модель, квантование сигнала, пороги цветоразличения.

DISCRIMINATION THRESHOLDS OF THE *RGB* MODEL WITH DEPTH OF 8 BIT COLOUR

Irina G. Palchikova

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

Evgenii S. Smirnov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., junior researcher, tel. (965)823-23-75, e-mail: evgenii.s.smirnov@yandex.ru

It is revealed that the analog-to-digital *RGB*-signal conversion at a photomatrix introduces a systematic inaccuracy into values of a dominant wavelength and a color saturation, calc-assisted on the basis of a digital image. It leads to the need of application the interval analysis methods for an assessment of color closeness and color discrimination thresholds. The method of estimation for intervals of values of the dominant wavelength and the color saturation of a sample is proposed. The computing experiment method revealed a spectral dependence for the colour discrimination thresholds, which is similar to visual one's.

Key words: digital image, color, dominant wavelength, saturation, *RGB* model, quantized signal, color discrimination thresholds.

В современных цифровых фотоматрицах и камерах информация о цвете кодируется триплетом яркостных сигналов ($R;G;B$). И математическая обработка [1] цветного цифрового изображения позволяет объективно выполнить измерение цвета и выразить результаты в виде координат заданного цветового пространства. Доминирующая длина волны (ДДВ) и насыщенность цвета (НЦ) являются характеристиками, допускающими количественное выражение, и легко согласующимися с перцептивными оценками цвета. Их использование позволяет проводить сравнительные оценки цветовых характеристик образцов с высокой достоверностью.

В работе [2] экспериментально выявлена нелинейность цветопередачи цифровых камер, калибровка которых была выполнена производителем общепринятым образом. Обоснована необходимость проведения дополнительной калибровки цифровых измерительных колориметрических систем. Разработана процедура корректировки алгоритма вычисления доминирующей длины волны, которая улучшает достоверность, воспроизводимость и повышает точность определения спектральных цветов до величины $\pm 2,5$ нм.

Однако на цветопередачу и точность калибровки оказывает влияние так же и квантование входного сигнала от образца в ходе его аналого-цифрового преобразования (АЦП) перед записью в цифровой файл. Независимо от выбора источника освещения в цветопередачу вносится характерная систематическая ошибка квантования. Настоящая работа содержит анализ ошибки квантования, вносимой АЦП сигнала от цветной ($R;G;B$) приемной фотоматрицы с разрешением 8 бит на канал.

1. Метод описания цвета

В наших работах [2, 3] описано разработанное цифровое колориметрическое устройство, в котором свет от образца переносится оптическими компонентами на фотоматрицу, где разделяется на триплет яркостных сигналов ($R;G;B$). Каждый из них подвергается АЦП и в результате имеет 256 градаций интенсивности. Общее количество комбинаций интенсивностей ($R;G;B$) составляет 16 777 216. Для комбинаций, принадлежащих к спектральным цветам, определяются [4] следующие параметры: ДДВ света (нм), НЦ (%), и яркость цвета, соответствующая серому цвету с гамма-коррекцией (светимость [1]) и без таковой. Кроме того, рассчитываются, во-первых, координаты цветности каждой из комбинаций ($R;G;B$) интенсивностей на плоской диаграмме цветностей ($x; y$); во-вторых, угол наклона прямой, проходящей через две точки: точку источника освещения и точку цвета, до крайнего положения физически реализуемых цветов (до локуса). Мы использовали спектральный локус [5] для колориметрического наблюдателя с углом зрения десять градусов, полученный из значений функции «*long, medium and short wavelengths*» (*LMS*) (длинные, средние и короткие длины волн) путем пересчета их в координаты цветового пространства *CIE XYZ* [2].

В расчетах осветитель задавался как равноэнергетический *CIE-E*, с координатами цветности ($x; y$) = (0,3333; 0,3333). Количественные характеристики

цвета (ДДВ и НЦ) рассчитываются из значений RGB цифрового изображения. Поэтому ошибка квантования сигнала фотоматрицы в процессе АЦП в каждом из каналов будет сказываться на точности результата.

2. Анализ ошибки квантования

Квантование – это разбиение интервала значений непрерывной величины на конечное число интервалов. В случае 8-битного приемника излучения количество интервалов квантования составляет 256. АЦП вносит «ошибку квантования» [6], максимальное значение которой не превосходит половину значения единицы в младшем разряде, т. е. $\pm 0,5$. Для оценки влияния ошибки квантования на точность вычисления ДДВ и НЦ, потребуется, во-первых, определить с учетом квантования граничные координаты цветностей точек источника белого осветителя $CIE-E$ (рис. 1, а), а во-вторых – координаты цветности образца. При квантовании сигнал от образца в интервале $(254,5+)$ округлится до величины 255 и запишется в файл. Далее, по нисходящей, следует сигнал яркости, равный 254. Он вберет в себя яркость образца в интервале $(253,5...254,4)$, значения которого округлятся до 254 и запишутся в файл; и т. д. Величина аналогового светового сигнала равновероятно [6] может принимать любое значение в пределах каждого интервала.

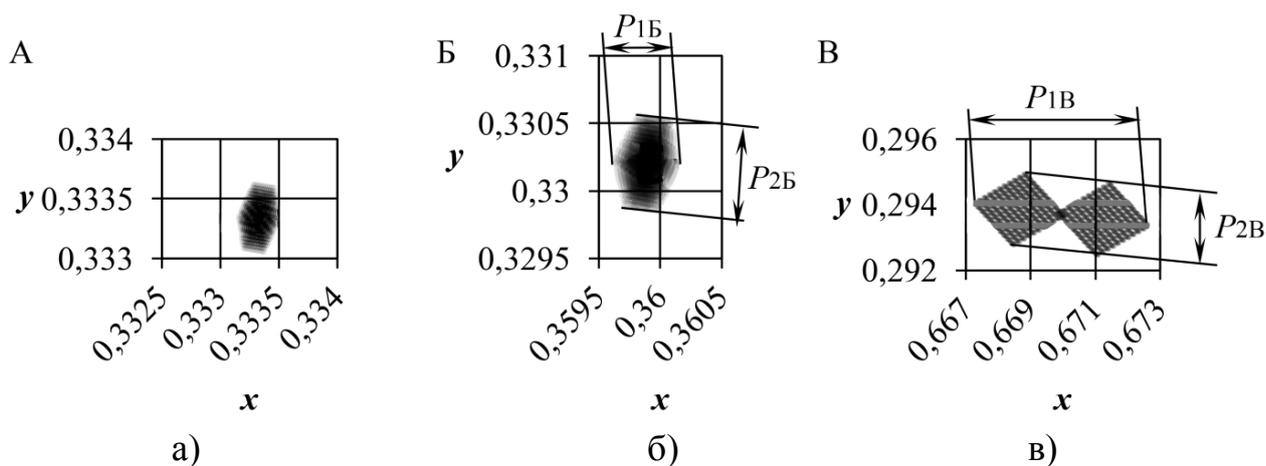


Рис. 1. Геометрия области распределения точек на плоской диаграмме цветностей x, y :

- а) точка «А» – это точка $CIE-E$ со значениями $(R; G; B)$ равными $(255; 255; 255)$;
- б) точка «Б» со значениями $(R; G; B)$ равными $(254; 194; 192)$, основная ДДВ = 642,95 нм, НЦ = 7 %;
- в) точка «В» со значениями $(R; G; B)$ равными $(254; 15; 7)$, основная ДДВ = 642,95 нм, НЦ = 89 %

При вычислении ДДВ образца с учетом ошибки квантования, интервалы $(R;G;B)$ пересчитываются в области точек на плоской диаграмме цветностей (рис. 1, б, в). Области появляются всякий раз, когда необходимо охарактеризовать образец квантуемыми величинами, в данном случае – $(R;G;B)$.

На рис. 2 координаты цветности произвольных точек Б и В, имеющих одинаковую ДДВ, соответствуют цветам с разной насыщенностью (S). Размеры $P_{1Б} \times P_{2Б}$ области Б и $P_{1В} \times P_{2В}$ области В (рис. 1, б и в соответственно), будут определять как ширину интервала W за пределы которого ДДВ образца не выходит, так и ширину интервала WS в пределах которой находится НЦ образца. На рис. 2 величина интервала W будет тем больше, чем величина НЦ (S) в точках изображения меньше. Верно и обратное утверждение: величина интервала W будет тем меньше, чем величина НЦ (S) в точках изображения больше (сплошная линия W на графике рис. 3).

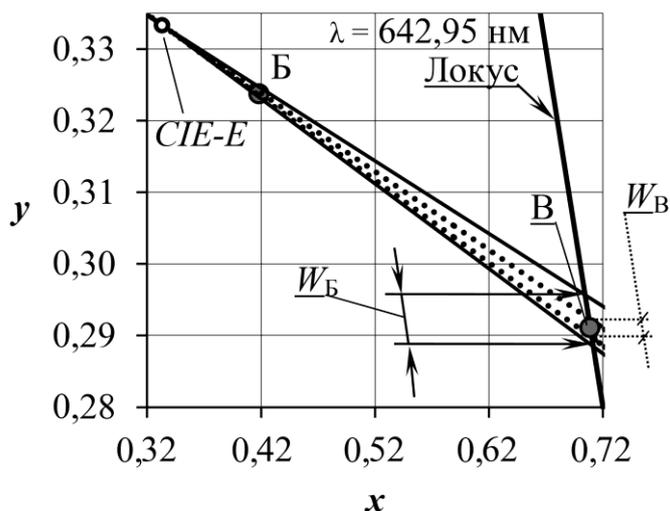


Рис. 2. Геометрия определения цвета объекта на диаграмме цветностей ($x; y$)

Область В (см. рис. 1, в) в несколько раз шире, чем область Б (см. рис. 1, б). Однако более насыщенный цвет В образца определится с меньшим интервалом W_B (т. е. – более точно), по сравнению не насыщенным цветом Б. Для точки цвета Б (с НЦ S_B) интервал значений ДДВ (W_B) больше, чем W_B для точки цвета В (с НЦ S_B).

Влияние ошибки квантования на НЦ иллюстрирует рис. 3. Графики зависимости $W(S)$ и $WS(S)$ приведены для двух значений яркости опорного канала и одинаковой ДДВ. Можно заметить – интервал W тем меньше (сумма расстояний между его верхней – $W+$ и нижней – $W-$ границей), чем яркость образца больше. Цифра на рис. 3 показывает значение максимального (опорного) яркостного сигнала в соотношении $R:G:B$.

Возможности интервальной оценки цвета из цифровых изображений рассмотрены в работе [7], где проведен анализ вариации параметров цвета при изменении яркости образца и показано, что близость двух цветов ($ДДВ_1 > ДДВ_2$), можно оценивать с помощью коэффициента Жаккара, который определяется как отношение количества общих длин волн из интервалов шириной W_1 и W_2 (или $MAX(ДДВ_1) - MIN(ДДВ_2)$) к сумме непересекающихся элементов интервалов.

В результате расчетов интервалов ДДВ мы выявили, что величины интервалов зависят от значения основной ДДВ. То есть для колориметрического устройства с АЦП способность различать цвета образца обнаруживает спектральную зависимость.

Вместе с этим, хорошо известно [8], что способность глаза различать цвета существенно меняется в зависимости от спектрального состава света.

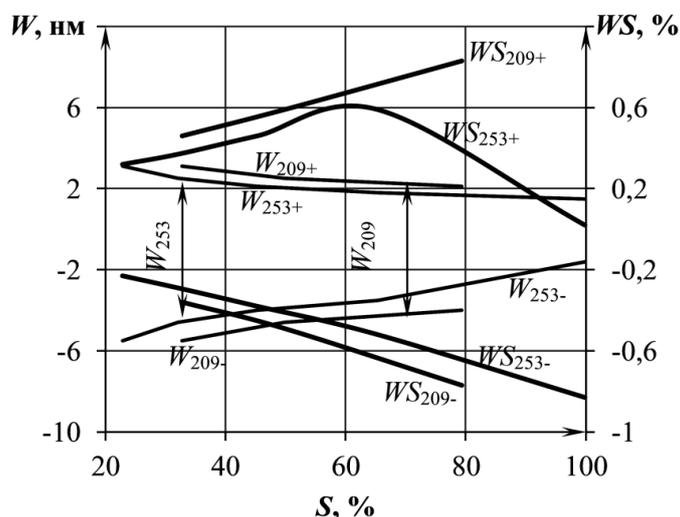


Рис. 3. Пример зависимости интервала значений ДДВ – ось W и НЦ – ось WS для 640,35 нм от величины насыщенности цвета

На рис. 4 сплошной линией 1 показана кривая спектральной зависимости цветоразличительной способности глаза, взятая нами из [8, 9]. По горизонтальной оси нанесены длины волн, а по вертикальной – наибольшие допустимые разности длин волн, при которых глаз еще не замечает разницы в окраске. В этом же масштабе даны значения интервалов W , вычисленные для различных диапазонов яркости: линии 96, 192 и 256, соответственно для диапазонов опорных яркостей 65–96, 161–192 и 225–256. Верхняя граница диапазона указана на соответствующей кривой.

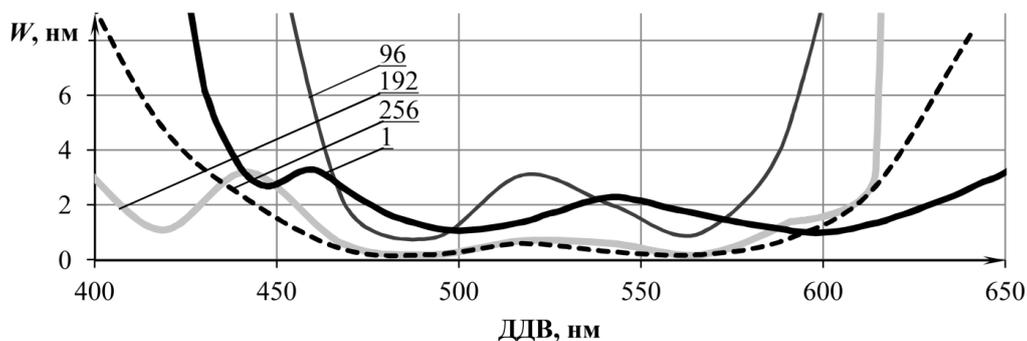


Рис. 4. Спектральные зависимости цветоразличительной способности глаза (кривая 1) и цифрового устройства (кривые 96, 192 и 256)

Легко видеть, что ход кривых достаточно близкий. Можно предположить, что природа вариаций W и различительной способности глаза одинакова. То есть, процесс кодирования зрительных нейронных сигналов может включать в себя процедуры, аналогичные АЦП.

Выводы

Предложен способ нахождения интервалов значений ДДВ и НЦ образца из его цифрового изображения.

Метод вычислительного эксперимента показал, что имеется зависимость величин W и WS от яркости опорного канала RGB цвета. То есть цвета с меньшей яркостью имеют больший интервал W и определяются с меньшей точностью.

Методом вычислительного эксперимента выявлена спектральная зависимость интервалов для характеристик цвета, рассчитанных из цифровых изображений. Показана схожесть цветоразличительной способности цифрового колориметрического устройства и глаза человека (по литературным данным [8, 9]).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Цветовой анализ цифровых изображений при производстве экспертных исследований следов выстрела / И. Г. Пальчикова, И. В. Латышов, В. А. Васильев, А. В. Кондаков, Е. С. Смирнов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2 (27). – С. 88–101.
3. Видеоанализатор количественных цветовых характеристик образцов/ И. Г. Пальчикова, А. Ф. Алейников, Ю. В. Чугуй и др. // Приборы. – 2014. – № 12. – С. 38–44.
4. Пальчикова И. Г., Смирнов Е. С. Особенности цветовой калибровки измерительных систем // 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. 128–134.
5. Color and Vision Research Labs [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cvrl.org/> (дата обращения: 11.04.2017).
6. Классен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы. – Долгопрудный : Изд. Дом «Интеллект», 2008. – 352 с.
7. Пальчикова И. Г., Смирнов Е. С. Интервальная оценка параметров цвета из цифровых изображений // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, №1. – С. 95–102. DOI:10.18287/2412-6179-2017-41-1-95-102.
8. Вавилов С. И. Глаз и Солнце. – М. : Наука, 1976. – 127 с.
9. Кравков С. В. Цветовое зрение. – М. : АН СССР, 1951. – 175 с.

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, 2017

**ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА КОНТРЕФЛЕКТОРА ТЕЛЕСКОПА
«МИЛЛИМЕТРОН» В УСЛОВИЯХ ТЕРМОБАРОКАМЕРЫ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ АСФЕРО-ГОЛОГРАММНОГО ПРОБНОГО СТЕКЛА ИЗ ЦЕРОДУРА**

Анатолий Васильевич Лукин

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», 420075, Россия, г. Казань, ул. Н. Липатова, 2, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (843)294-87-61, e-mail: gipo@telebit.ru

Андрей Николаевич Мельников

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», 420075, Россия, г. Казань, ул. Н. Липатова, 2, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела, тел. (843)294-87-60, e-mail: gipo@telebit.ru

Александр Фридрихович Скочилов

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», 420075, Россия, г. Казань, ул. Н. Липатова, 2, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (843)294-87-59, e-mail: gipo@telebit.ru

Предложена оптическая схема интерферометра на основе применения асферо-голограммного пробного стекла из церодура. Интерферометр предназначен для исследования термодформаций рабочей выпуклой гиперболической поверхности зеркала контррефлектора космического телескопа «Миллиметрон» в условиях термобарокамеры при криогенных температурах. Обсуждены возможности практической реализации этого технического решения.

Ключевые слова: интерферометр, асферическое пробное стекло, церодур, синтезированная голограмма, зеркало контррефлектора, телескоп, «Миллиметрон», термобарокамера.

**INTERFEROMETRIC STUDY'S FEATURES OF THERMAL DEFORMATION
OF «MILLIMETRON» TELESCOPE'S CONVERGENT MIRROR USING
THE ASPHERIC AND HOLOGRAPHIC TEST GLASS MADE OF ZERODUR
UNDER THERMAL VACUUM CHAMBER**

Anatoly V. Lukin

Joint Stock Company «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», 420075, Russia, Kazan, 2 N. Lipatov St., D. Sc., Professor, Chief Researcher, tel. (843)294-87-61, e-mail: gipo@telebit.ru

Andrey N. Melnikov

Joint Stock Company «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», 420075, Russia, Kazan, 2 N. Lipatov St., Ph. D., associate Professor, Head of Department, tel. (843)294-87-60, e-mail: gipo@telebit.ru

Alexander F. Skochilov

Joint Stock Company «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», 420075, Russia, Kazan, 2 N. Lipatov St., Ph. D., leading researcher, tel. (843)294-87-59, e-mail: gipo@telebit.ru

The optical layout of interferometer on basis of the aspheric and holographic test glass made of Zerodur is proposed. The interferometer is designed to study the thermal deformations of operating convex hyperbolic surface of "Millimetron" space telescope's convergent mirror in a thermal vacuum chamber at cryogenic temperatures. The possibilities of practical realization of this technical solution are discussed.

Key words: interferometer, aspheric test glass, Zerodur, computer-generated hologram, convergent mirror, telescope, "Millimetron", thermal vacuum chamber.

Особенность конструкции телескопа «Миллиметрон» космического базирования состоит в том, что его зеркало контррефлектора является монолитным и жестким, поэтому активная коррекция его рабочей выпуклой гиперболической поверхности в криогенных условиях чрезвычайно затруднена в отличие от его главного параболического составного зеркала [1, 2]. Кроме того, разработчики телескопа «Миллиметрон» при выборе материала зеркала контррефлектора отдают предпочтение карбиду кремния, как имеющему наиболее высокое значение коэффициента Максудова [3].

Следовательно, при изготовлении зеркала контррефлектора в нормальных (цеховых) условиях необходимо придать такую форму его рабочей поверхности, которая при охлаждении до штатной криогенной температуры ($\sim 4^\circ \text{K}$) приобрела бы заданную гиперболическую форму. В связи с этим на первых этапах работы требуется выявить закономерности и воспроизводимость изменения формы рабочей поверхности (термодеформации) зеркала контррефлектора при изменении температуры в интервале от $\sim 300^\circ$ до $\sim 4^\circ \text{K}$.

Работа должна включать как численное, так и физическое моделирование. Целесообразно физическое моделирование как комплексную работу выполнить на уменьшенных моделях зеркала контррефлектора.

Важнейшей проблемой в данном случае является сложность обеспечения точного и объективного контроля изменения формы зеркала контррефлектора из карбида кремния, вызванного термодеформациями в процессе охлаждения в термобарокамере, имитирующей космические условия.

Для решения данной проблемы предлагается применить интерферометр на основе использования асферического пробного стекла с вогнутой рабочей гиперболической поверхностью. На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема этого интерферометра. Интерферометр такого типа обладает, как известно (см., например: [4]), чрезвычайно высокой помехоустойчивостью к внешним механическим воздействиям и низкой чувствительностью к дефектам оптических элементов, а выполнение пробного стекла из оптического материала «церодур» [5] обеспечит повышенную устойчивость формы рабочей поверхности пробного стекла к температурным изменениям в указанном выше температурном диапазоне. В качестве осветительного объектива предлагается применить осевую синтезированную голограмму, кольцевая микроструктура которой выполняется непосредственно на задней поверхности подложки пробного стекла (сферической или плоской); это делает интерферометр еще более помехоустойчивым и компактным.

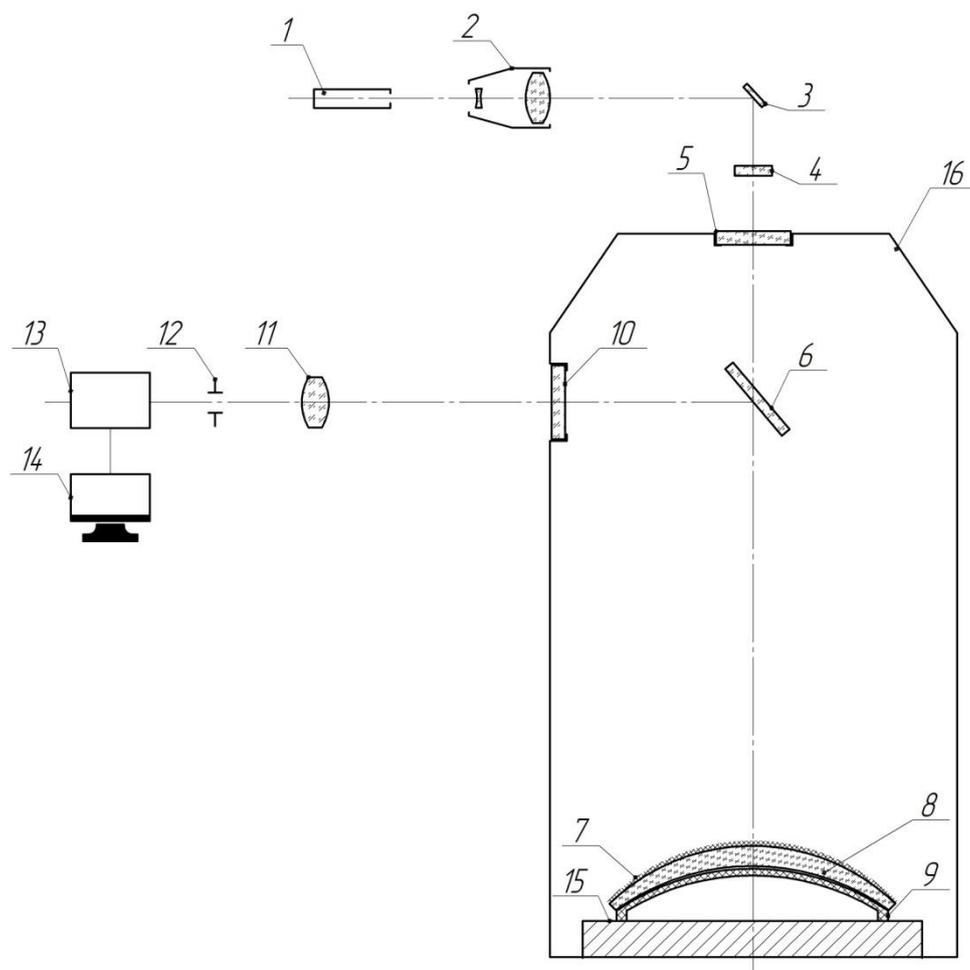


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема интерферометра для исследования термодформаций зеркала контррефлектора:

1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – поворотное зеркало; 4 – рассеиватель; 5, 10 – иллюминаторы термобарокамеры; 6 – светоделитель; 7 – рельефно-фазовая структура осевой синтезированной голограммы-осветителя; 8 – асферо-голограммное пробное стекло из церодура (световой диаметр ~ 580 мм); 9 – выпуклое гиперболическое зеркало контррефлектора космического телескопа «Миллиметр» облегченной конструкции из карбида кремния (световой диаметр 542 мм); 11 – сопрягающий объектив; 12 – пространственный фильтр; 13 – телевизионная камера; 14 – персональный компьютер; 15 – термостабилизированное основание; 16 – термобарокамера, имитирующая космические условия

На рис. 2 приведены графики частотной характеристики осевой синтезированной голограммы-осветителя для случая выпуклой сферической (радиус кривизны 275 мм) задней поверхности пробного стекла в зависимости от изменения расстояния d (в мм) от «точечного» источника излучения до голограммы-осветителя 7. Особо следует отметить, что для такого типа интерферометра характерны весьма умеренные требования к оптическому качеству его формирующей оптики, включая в данном случае и осевую синтезированную голограмму-осветитель.

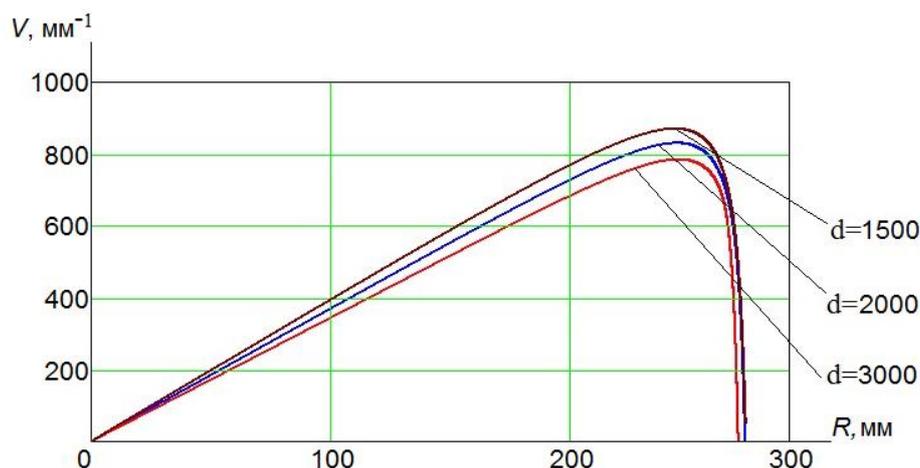


Рис. 2. Графики частотной характеристики осевой синтезированной голограммы-осветителя:

R – радиус голограммы, V – пространственная частота

Вогнутую гиперболическую поверхность этого асферо-голограммного пробного стекла предлагается контролировать в автоколлимационной схеме неравноплечевого интерферометра типа Тваймана – Грина [6] с использованием инфракрасного лазерного источника излучения на рабочей длине волны $\lambda_p = 10,6$ мкм и осевой синтезированной голограммы в качестве оптического компенсатора (нуль-корректора) [7]. Фотоприемное устройство построено на основе неохлаждаемого микроболометрического модуля с пространственным разрешением 640×480 пикселей (см., например: [8]).

Расчетные параметры осевой синтезированной голограммы-компенсатора:

- световой диаметр, мм..... 312;
- наибольшая пространственная частота, мм^{-1} 31;
- погрешность формирования волнового фронта, λ_p не более $1/200$

На рис. 3 в качестве иллюстрации представлена интерферограмма, зарегистрированная в макете интерферометра, собранного по принципиальной оптической схеме рис. 1, которая подтверждает работоспособность предложенного технического решения.

В качестве деталей поз. 8 и 9 применялись оптические элементы диаметром 60 мм со сферическими поверхностями; радиус кривизны выпуклой сферической поверхности 250,008 мм, вогнутой – на ~ 200 мкм больше; в качестве голограммы поз. 7 использовалась зонная пластинка с фокусным расстоянием 180 мм.



Рис. 3. Интерферограмма, зарегистрированная в макете интерферометра по схеме рис. 1 (на длине волны 632,8 нм)

Таким образом, предложенный интерферометр на основе асфероголограммного пробного стекла из церодура открывает возможность выполнения экспериментально обоснованных количественных исследований термодетформаций зеркала контррефлектора из карбида кремния в условиях термобарокамеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайт Астрокосмического центра ФИАН, г. Москва [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://millimetron.ru>.
2. Лукин А. В., Мельников А. Н., Скочилов А. Ф. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы // Фотоника. – 2016. – № 5. – С. 44–48.
3. Максутов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – М. : Наука, 1984. – 272 с.
4. Изготовление и контроль асферической оптики / О. Г. Карлин, В. Г. Кукс, Л. Е. Липовецкий, А. В. Лукин, К. С. Мустафин, А. З. Хабиров, А. Г. Хуснутдинов. – М. : ЦНИИ информации, 1980. – 272 с.
5. Hartmann P. SCHOTT – Ultra low expansion glass ceramic ZERODUR®: Improvements in properties, understanding and production (Advanced Optics). – Mainz : SCHOTT AG, 2015. – 94 p.
6. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. – 296 с.
7. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. I / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. – 2014. – № 4. – С. 12–32.
8. Сайт (каталог продукции ОКБ «АСТРОН», г. Лыткарино, Московская обл.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://astrohn.ru/files/Catalogue_Detector.pdf.

© А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов, 2017

СПЕКЛ-ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Александр Викторович Макеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (923)241-85-15, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

Дается краткий обзор методов эллипсометрических исследований на шероховатых поверхностях. Подробно описан метод спекл-эллипсометрии. Представлены экспериментальные результаты регистрации спекл-картин отраженного поляризованного лазерного излучения от металлической поверхности с микрорельефом. Показаны возможности вейвлет-анализа спекл-эллипсометрических картин.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, эллипсометрия, поверхностный слой, спекл-эллипсометрия, спекл, вейвлет-анализ.

SPECKLE ELLIPSOMETRY OF ROUGH SURFACES USING THE WAVELET ANALYSIS

Alexander V. Makeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student of the Department of Nanosystems and Optics, tel. (923)241-85-15, e-mail: makeeffsan@yandex.ru.

Valerik S. Hayrapetyan

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Head of the Department of Special Devices and Technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

A brief review of the ellipsometric investigations methods on rough surfaces is given. The method of speckle-ellipsometry is described in detail. Experimental results of registration the speckle patterns of reflected polarized laser radiation from a metallic surface with a microrelief are presented. The possibilities of wavelet analysis of speckle-ellipsometric images are shown.

Key words: rough surface, ellipsometry, surface layer, speckle-ellipsometry, speckle, wavelet analysis.

Повышение качества выпускаемой продукции является одной из наиболее актуальных задач современной промышленности. Срок службы изделия, безотказность его работы напрямую зависит от состояния микрорельефа поверхностного слоя. Поэтому применение высокоэффективных методов для контроля состояния поверхностных слоев деталей предоставляют большие резервы, для повышения качества выпускаемой продукции. Методы контроля состояния по-

верхностного слоя деталей должны обеспечивать высокую точность и локальность получаемых в процессе измерения результатов [1].

Таким образом задачами настоящей работы являются: рассмотреть возможности эллипсометрии, как метода исследования шероховатости поверхностного слоя, представить спекл-эллипсометрический метод анализа микрорельефа поверхности с компьютерной обработкой результатов, на основе вейвлет-анализа.

Эллипсометрические методы, используемые для исследования поверхностных слоев очень чувствительны к изменению параметров отражающей системы, одним из которых является шероховатость поверхностного слоя. В работах отечественных и зарубежных ученых [2–11] описаны различные способы решения задачи эллипсометрии для поверхностей с шероховатостью. Большинство эллипсометрических методов исследования поверхности основано на анализе изменении состояния поляризации отраженного пучка, измеренные параметры не могут однозначно соотноситься с параметрами микрорельефа поверхности и требуют для анализа использования различных способов моделирования шероховатости поверхности, что является достаточно трудоемкой задачей. Возможна ситуация, при которой рельеф шероховатой поверхности оказывается сложнее используемой модели. Предпринимались попытки моделирования шероховатости поверхности периодическими дифракционными решетками различного профиля [6–8], по методу «эффективного слоя» и «эффективной подложки» [3]. В работе [5] предложен оригинальный метод моделирования шероховатости поверхности с помощью случайных фазовых масок (СФМ).

Отдельного внимания заслуживает метод спекл-эллипсометрии [12]. Суть данного метода заключается в том, что поляризованное лазерное излучение рассеиваясь от объекта со случайным микрорельефом претерпевает случайную модуляцию [13–14]. При визуализации спекл-картины можно наблюдать случайные световые пятна, которые распределены в зависимости от микрорельефа рассеивающей поверхности, что позволяет производить прямой анализ микрорельефа, без разработки его модели. Данный метод обладает всеми достоинствами бесконтактных методов контроля шероховатости поверхности, позволяет осуществлять контроль *in situ*.

В ходе проведения экспериментальных исследований на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М-1 ($\lambda = 0,6328$ мкм) была произведена регистрация спекл-картины металлической поверхности с $Rz \leq 0,063$ мкм [15], при угле падения лазерного пучка 68 градусов (рис. 1).

На рис. 2 представлена спекл-картина участка поверхности с дефектом в виде царапины. Угол падения лазерного пучка составляет 68 градусов.

Однако среди недостатков данного метода можно выделить отсутствие методов анализа спекл-картин, позволяющих высокоточное выделение и локализацию спекл-структур [12]. Для решения этой задачи использован метод вейвлет-анализа. В качестве материнского вейвлета выбран вейвлет Мейра, имеющий следующий вид [16–17]:

$$\psi(t) = 2 \int_0^{\infty} \sin[\Omega(v)] \cos\left[2\pi\left(t - \frac{1}{2}\right)v\right] dv. \quad (1)$$

Частотная форма:

$$\hat{\psi} = \exp(j\pi v) \sin[\Omega(v)], \quad (2)$$

где v – базис; $\Omega(v)$ – четная, симметричная при $v = \frac{1}{2}$ функция

$$\Omega(1-v) = \frac{\pi}{2} - \Omega(v), \text{ при } \frac{1}{3} \leq v \leq \frac{2}{3};$$

$$\Omega\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\pi}{4}.$$

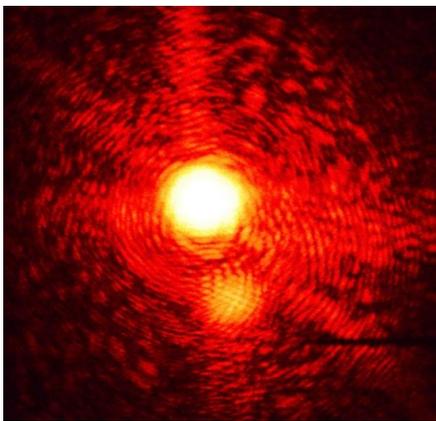


Рис. 1. Спекл-картина
 $Rz \leq 0,063$ мкм

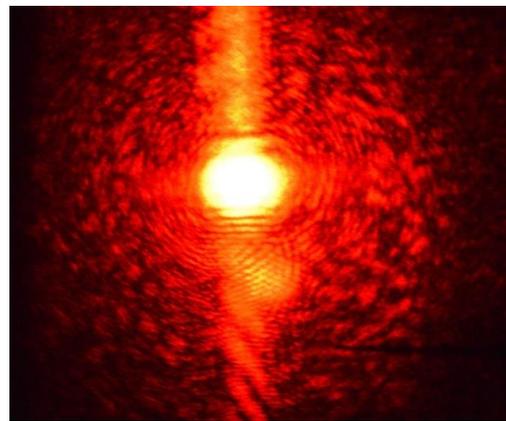


Рис. 2. Спекл-картина участка
поверхности с дефектом

На рис. 3 представлено графическое изображение вейвлета Мейра

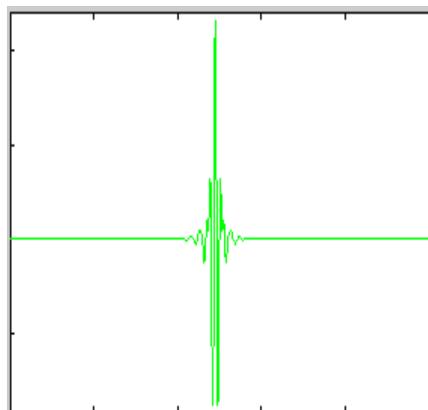


Рис. 3. Вейвлет Мейра

На рис. 4 представлен результат детализации спекл-картины по горизонтали (а), вертикали (б) и диагонали (в), с помощью вейвлет-преобразования в среде MATLAB.

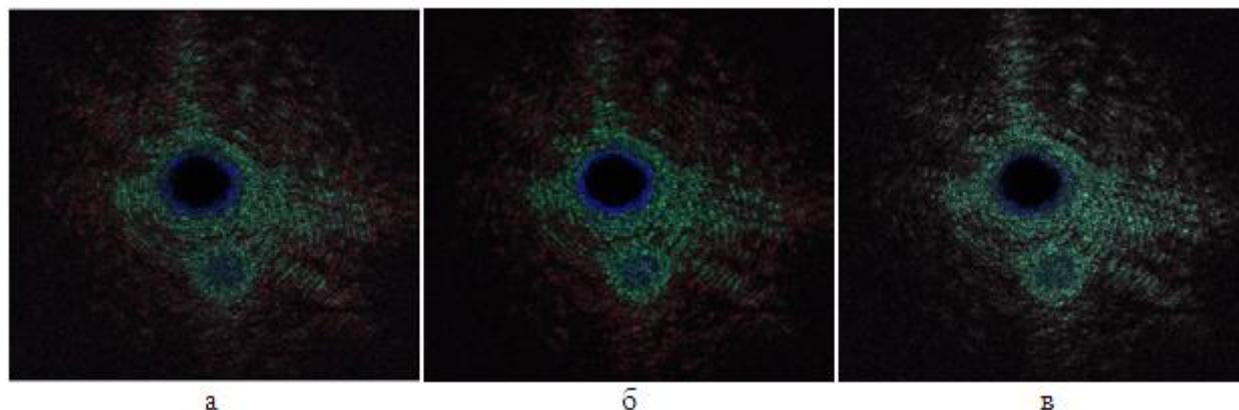


Рис. 3 Детализация спекл-картины в среде MATLAB

На рис. 5 представлена карта поверхности после двумерной вейвлет обработки с использованием вейвлета Мейра.

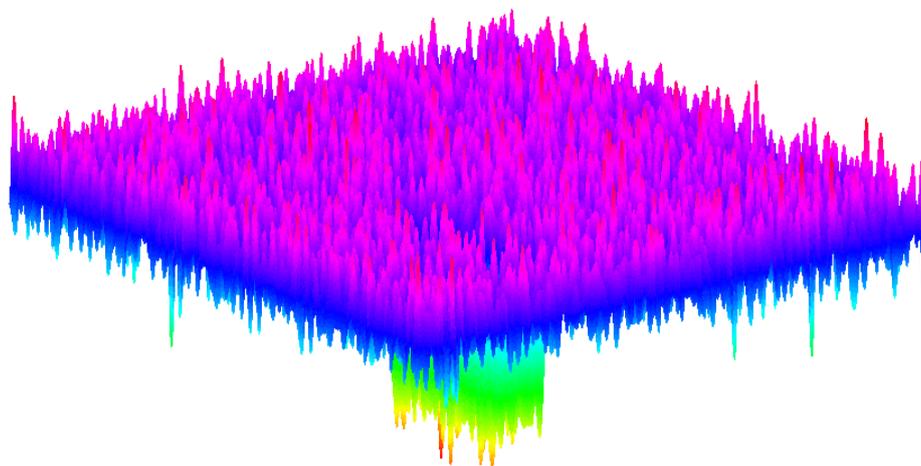


Рис. 5. Карта поверхности после двумерной вейвлет-обработки с использованием вейвлета Мейра

Таким образом, в данной работе приведен краткий обзор эллипсометрических методов исследования шероховатости поверхности. Произведена регистрация спекл-эллипсометрических картин поляризованного лазерного излучения, отраженного от поверхности с шероховатостью $Rz \leq 0,063\text{мкм}$. Показаны результаты компьютерной обработки спекл-картин методом вейвлет-анализа в среде MATLAB. Производится дальнейшее совершенствование и оптимизация алгоритмов обработки и анализа спекл-эллипсометрических картин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макеев А. В., Айрапетян В. С. Анализ современных методов исследования шероховатости поверхности деталей // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 80–86.
2. Основы эллипсометрии / А. В. Ржанов, К. К. Свиташев и др. – Новосибирск : Наука, 1978. – С. 338–343.
3. Данилова Т. М. Эллипсометрические и спектрофотометрические методы исследования и контроля оптических характеристик поверхностных слоев элементов оптоэлектроники : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07. – СПб., 2011. – 22 с.
4. Стаськов Н. И., Ивашкевич И. В., Кречетов Н. А. Эллипсометрия переходных слоев полупроводник – диэлектрик // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 2 (15). – С. 18–24.
5. Свиташева С. Н. Эллипсометрия шероховатых поверхностей : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. – Новосибирск, 2009. – 29 с.
6. Эллипсометрия диффрактированного света / Г. А. Егорова, Э. С. Лонский, Е. В. Потапов, А. В. Раков // Микроэлектроника. – 1980. – Вып. 4. – С. 319.
7. Elson, J., Bennett, J. Relation Between the Angular Dependence of Scattering and the Statistical Properties of Optical Surfaces // J. Opt. Soc. Am. – 1979. – 69, 1. – P. 31.
8. Azzam R. M. A., Bashara N. M. Polarization characteristics of scattered radiation from a diffraction grating by ellipsometry with application to surface roughness // Phys. Rev. B. – 1972. – V. 5, N12. – P. 4721.
9. Marton J. P. Chan E. C. Surface roughness interpretation of ellipsometer measurements using the generalized Maxwell Garnett theory // J. Appl. Phys. – Vol. 45, № 11. – P. 5008.
10. Ohlidal I., Lukes F. Ellipsometric parameters of randomly rough surfaces // Opt. Comm. – Vol. 5, № 5. – P. 323.
11. Smith T. Effect of surface roughness on ellipsometry of Aluminium // Surf. Sci. – Vol. 56. – P. 252.
12. Скалецкая И. Е. Введение в прикладную эллипсометрию : учеб. пособие по курсу «Оптические измерения». Ч. 2: Свойства решений ОУЭ для однородных слоев. – СПб. : СПбГУИТМО, 2007. – С. 43–45.
13. Франсон М. Оптика спеклов. – М. : Мир, 1980.
14. Ульянов С. С. Что такое спеклы // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 5. – С. 1–6.
15. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.
16. Меркушева А. В. Классы преобразований нестационарного сигнала в информационно-измерительных системах. III: Время-масштабные (вейвлет) преобразования для спектрально-временного анализа // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12, № 3. – С. 68–82.
17. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.

© А. В. Макеев, В. С. Айрапетян, 2017

АДАПТИВНАЯ ЖИДКОСТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЫ

Диана Георгиевна Макарова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Александр Александрович Болотин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11

В настоящее время развитие оптико-электронных приборов и освоение новых диапазонов спектра ставит задачу о разработке инновационных конструкций и схем для оптического приборостроения. В статье представлен вариант адаптивной оптической системы терагерцового диапазона спектра переменного увеличения с жидкостной линзой для медицинской аппаратуры. Поскольку этому диапазону спектра нашлось потенциальное применение в медицине для визуализации, томографической и голографической регистрации тканей, терапии и хирургии, то становится актуальным исследование и разработка новых оптических систем повышенной точности и с минимальным временем на смену фокусного расстояния для обеспечения высокой производительности медицинской техники. В качестве решения предлагается использование жидких адаптивных элементов. В статье предложен вариант адаптивной оптической системы терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры, состоящей из жидкостного элемента с изменяемым фокусным расстоянием и фокусирующего объектива. В ходе исследований произведен анализ и выбор материалов, пригодных для работы в терагерцовом диапазоне для изготовления линз и адаптивного жидкостного элемента. В качестве доказательной базы приведены показатели преломления и коэффициенты поглощения для пяти углеводородов, которые потенциально возможно использовать в жидкостном элементе. При помощи компьютерного моделирования получены и приведены оптические характеристики системы, подтверждающие возможность разработки адаптивной жидкостной оптической системы терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон спектра, адаптивная жидкостная оптическая система, переменное увеличение.

ADAPTIVE OPTICAL LIQUID SYSTEM OF SPECTRUM TERAHERTZ RANGE FOR MEDICAL DEVICES

Diana G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., assistant of the Department of Nanosystems and Optical Devices, tel. (383)343-91-11, e-mail: Diana_ssga@mail.ru

Alexandr A. Bolotin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of Nanosystems and Optical Devices, tel. (383)343-91-11

The development of optoelectronic devices and the study of new spectrum bands set the task of developing the new designs and schemes for optical instrument-engineering. The article presents a version of the adaptive optical system using the spectrum terahertz range of variable magnification with the liquid lens for medical equipment since this spectrum range can be used in medicine for imaging, tomographic and holographic tissue recording, therapy and surgery. Therefore, the investigations as well as the development of new optical high-precision systems with minimal time for focal length change to provide the high performance of medical equipment are very urgent. As the solution the use of liquid adaptive elements is proposed. The article proposed a variant of adaptive optical system using the terahertz range of spectrum for medical devices consisting of a liquid element with a variable focal length lens and a focusing lens. The analysis and materials selection suitable for use in the terahertz range and for producing an adaptive liquid lens element have been made. As the evidence the refractive index and absorption coefficients for five indicators of hydrocarbons, which potentially can be used in the liquid element, are shown. Using the computer simulation the optical characteristics of the system confirming the possibility of developing an adaptive liquid optical system of terahertz range of spectrum for medical equipment were obtained and presented.

Key words: the terahertz range of the spectrum, an adaptive liquid lens system, variable magnification.

Развитие современных оптических приборов в совокупности с ростом инновационных медицинских технологий требует от медицинской аппаратуры высокоточной работы с минимальными временными затратами. Поэтому является актуальной разработка оптических систем с использованием новых технических решений и освоение ранее не используемых спектральных диапазонов.

Терагерцовому диапазону спектра (30 мкм – 1 мм) излучения нашлось потенциальное применение в медицине для визуализации, томографической и голографической регистрации тканей, терапии и хирургии. Томография способна заменить и вытеснить рентген и ультразвук из медицинских исследований и дефектоскопии, поскольку с ростом вычислительных мощностей данная технология позволит получать трехмерный образ внутренних тканей с разрешением в несколько десятков микрометров в реальном масштабе времени [1].

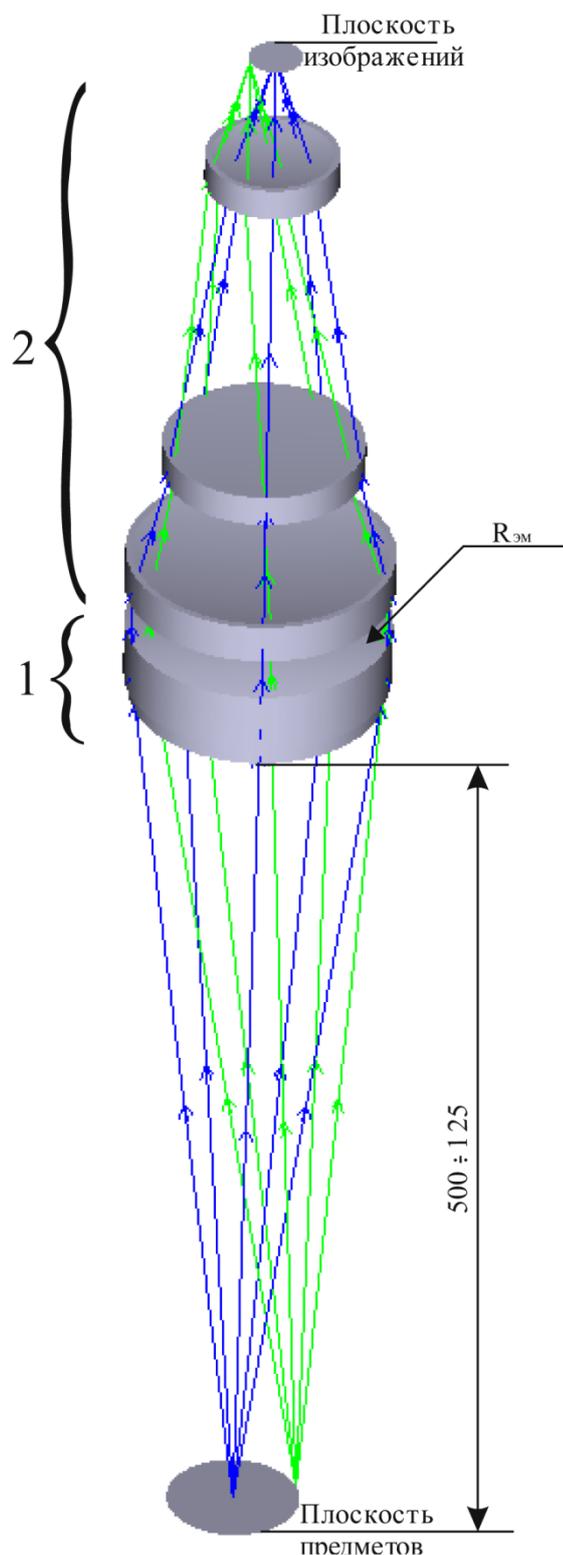
Терагерцовые волны хорошо проникают в верхние слои кожи и дают возможность контролировать развитие злокачественных процессов на самых ранних стадиях. Методы такой диагностики уже используются английской компанией TeraView [2]. И российскими учеными созданы установки для ТГц терапии – «ИК-Диполь» и «Инфратератрон» для использования в ожоговых центрах [3].

Поскольку в процессе работы необходимо оперативно перенастраивать аппаратуру на разноудаленные от объектива точки объекта, то наведение на конечные расстояния производится при помощи сменных насадных линз с фиксированными фокусными расстояниями. Именно последние рационально заменить на одну-единственную жидкостную линзу, радиус кривизны, которой регулируется, например, за счет гидростатического эффекта [4–6].

На рис. 1 представлена адаптивная оптическая система терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры, состоящая из жидкостного элемента 1 с изменяемым фокусным расстоянием и фокусирующего объектива 2.

Фокусировка оптической системы происходит за счет изменения давления жидкости в линзе 1 [7, 8]. Рабочее положение системы – вертикальное. В таблице приведены оптические характеристики изображенной системы.

Для оптических элементов системы были выбраны материалы, хорошо пропускающие терагерцовое излучение, с длиной волны от 100 мкм. Из твердых материалов – кремний, из пластических – полиэтилен. При рассмотрении свойств жидкостей, пригодных для разработки оптических элементов, следует



сразу исключить воду и водные растворы. В качестве наполнителей жидкостных компонентов могут быть использованы углеводороды. На рис. 2 представлены графики оптических характеристик некоторых углеводородов в зависимости от частоты излучения в ТГц.

На рис. 2 представлены оптические характеристики 5 нефтепродуктов, которые пропускают терагерцовое излучение. Gasoline (бензин) обладает самым высоким показателем преломления (Refractive index) и низким коэффициентом поглощения (Absorption coefficient). Diesel (соляровое масло), thinner (смесь бутилацетата и этилацетата) и сепох (смесь бутилацетата, этилацетата, толуола и метанола) имеют низкие показатели преломления и средние коэффициенты поглощения. Kerosene (керосин) имеет оптимальное соотношение коэффициентов преломления и поглощения [9–11].

Высокие коэффициенты дисперсии выбранных материалов в диапазоне длин волн от 100 до 300 мкм: кремния ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 800,5$), полиэтилена ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 1284$) и керосина ($n_{\lambda=200\text{мкм}} = 364,8$) позволяют отказаться от коррекции хроматических aberrаций [12–14].

Рис. 1. Ход лучей в объективе с жидкостным элементом:

1 – жидкостный элемент (линза); 2 – фокусирующий объектив; $R_{эм}$ – радиус эластичной мембраны

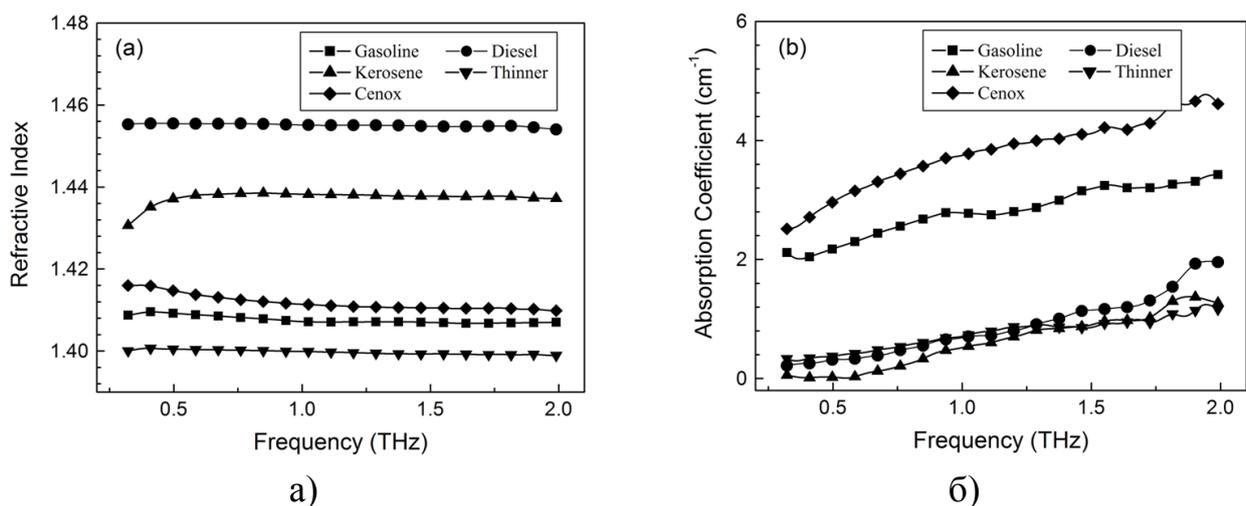


Рис. 2. Зависимость показателя преломления и коэффициента поглощения от частоты излучения:

а) показатель преломления; б) коэффициент поглощения

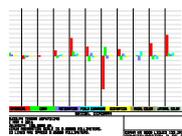
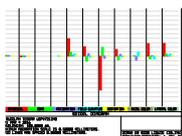
Таблица

Оптические характеристики адаптивной жидкостной системы

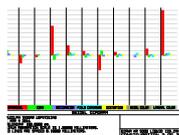
Параметр	Расстояние до объекта, мм		
	125	250	500
Радиус эластичной мембраны ($R_{ЭМ}$) ЖЛ, мм	-70,17	-145,42	-366,02
Линейное поле зрения в плоскости предметов, мм	30,87	58,17	112,9
Размер изображения, мм	24,0	24,0	24,0
Линейное увеличение, $\times 10^{-3}$ крат	777	413	213
Полихроматическая концентрация энергии в пределах пиксела 150×150 мкм			
Дифракционный предел	0,82	0,83	0,83
В центре поля зрения	0,49	0,77	0,82
Для зоны поля зрения 0,707	0,49	0,80	0,81
На краю поля зрения	0,44	0,73	0,74

Как видно из таблицы, оптическая система позволяет фокусироваться на расстояниях от 500 до 125 мм. Для расстояний от 500 до 250 мм система обеспечивает качество изображения, близкое к дифракционному. А на коротких расстояниях (125 мм) требуется усложнение конструкции жидкостного элемента для повышения качества изображения. Таким образом, результаты моделирования показывают возможность разработки адаптивной жидкостной оптической системы терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры [15, 16].

На рис. 3 представлены графики результата расчета коэффициентов Зейделя для трех расстояний до объекта а) 500 мм; б) 250 мм; в) 125 мм. Из графиков видно, что происходит перераспределение aberrаций при изменении управляемого радиуса, в ходе которой осуществляется фокусировка на разные расстояния. На рисунке а) жидкостная линза не вносит aberrаций в оптическую систему, на рисунке б) жидкостный элемент оказывает небольшое влияние на aberrации в системе, а на рисунке в) видно заметное ухудшение общей картины aberrаций в системе.



а)

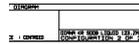


б)

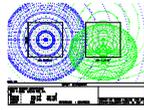
в)

Рис. 3. Графики коэффициентов Зейделя для трех расстояний до объекта:
а) 500 мм; б) 250 мм; в) 125 мм

На рис. 4 представлены графики распределения энергии в aberrационном пятне для трех расстояний до объекта: а) 500 мм; б) 250 мм; в) 125 мм. На рисунке обозначена квадратной областью граница пикселя фотоприемника 200 x 200 мкм. Из рисунка видно, что для расстояний до объекта в пределах до 500 мм aberrационный кружок укладываются в квадратную область пикселя и далее с уменьшением расстояния до объекта графики распределения энергии в aberrационном кружке все сильнее выходят за пределы области 200 x 200 мкм, и качество изображения на фотоприемнике ухудшается.



а)

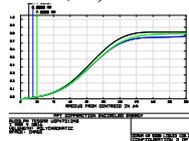
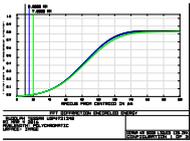


б)

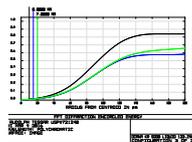
в)

Рис. 4. Графики распределения энергии в абберационном пятне для трех расстояний до объекта:

а) 500 мм; б) 250 мм; в) 125 мм



а



б

в

Рис. 5. Графики концентрации энергии в абберационном пятне для трех расстояний до объекта:

а) 500 мм; б) 250 мм; в) 125 мм

Из графиков концентрации энергии в абберационном пятне на рис. 5 также видно, что с уменьшением расстояния до объекта качество изображения ухудшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чекрыгина И. М. Терагерцовые технологии – медицине [Электронный ресурс] / Электрон. дан. – Таганрог, 2010. – Режим доступа: <http://astrohn.ru/THZ/solution.html/>.
2. THz Science & Technology Network. TeraView Ltd. [Электронный ресурс] / отдел «Archive» TeraView Ltd. – Электрон. дан. – Cambridge, 2010. – Режим доступа: <http://www.teraview.co.uk/>.
3. Баграев Н. Терагерцевая кремниевая наноэлектроника в медицине // Инновации. – 2011. – № 10 (156). – С. 105–119.
4. 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.
5. Pat. 2007/0247724 US. Liquid Lens With Curved Contact Surface / M. S. Jung. Publication Date: 10.25.2007.
6. Михайлов И. О., Чурилов С. М., Шлишевский В. Б. Некоторые особенности сборки и юстировки линзовых оптических систем с жидкостными компонентами // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 106–116.
7. 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.
8. Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б. Использование насадной жидкой линзы для изменения переднего отрезка объектива видеокамеры робототехнических устройств // 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. 2. – С. 80–83.
9. Yun-Sik Jin. Analysis of petroleum products and their mixtures by using terahertz time domain spectroscopy // Journal of the Korean Physical Society. – 2008. – Vol. 53, No. 4. – P. 1879–1885.
10. ТГц оптика. «Тидекс»: научная и промышленная оптика [Электронный ресурс] / отдел «Продукты». – М., 2010. – Режим доступа: [http://www.tydex.ru\(http://www.tydexoptics.com/ru\)/](http://www.tydex.ru(http://www.tydexoptics.com/ru)/).
11. Wakaki M. Physical Properties and Data of Optical Materials / Boca Raton, London, NJ : CRC Press, 2007. – P. 561.
12. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 284 с.
13. Palik E. D. Handbook of Optical Constants of Solids. – New York : Academic Press, 1985. – Vol. 1. – 724 p.
14. Palik E. D. Handbook of Optical Constants of Solids. – New York : Academic Press, 2010. – Vol. 2. – 1024 p.
15. Ahmad A. Optomechanical Engineering Handbook. – Boca Raton : CRC Press LLC, 1999. – 395 p.
16. Макарова Д. Г., Ефремов В. С. Применение дисперсионных формул материалов в суб-миллиметровом диапазоне длин волн // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 122–132.

© Д. Г. Макарова, А. А. Болотин, 2017

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО РАДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЙ

Игорь Николаевич Куропятник

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)747-46-94, e-mail: kuropyat@tdisie.nsc.ru

Описан алгоритм определения трех координат центра масс изделий, основанный на измерении веса в трех точках с помощью высокоточных электронных весов и одновременном измерении координат этих точек с помощью лазерного радара.

Ключевые слова: центр масс, весовой метод, измерение координат, лазерный радар, лазерный сканер.

APPLICATION OF LASER RADAR FOR DETERMINATION OF THE MASS CENTER COORDINATES OF PRODUCTS

Igor N. Kuropyatnik

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., senior researcher, tel. (913)747-4694, e-mail: kuropyat@tdisie.nsc.ru

The algorithm for the determination of three mass center coordinates of products has been described. Algorithm is based on measurements in three points by high accuracy electronic balance and the simultaneous coordinates measurements of these points using the laser radar.

Key words: mass center, balance method, coordinate measurements, laser radar (scanner).

При разработке летательных аппаратов или изделий, выводимых в космическое пространство, необходимо знать координаты центра масс изделия и его составных частей. Среди различных методов экспериментального определения координат центра масс [1] весовые методы нашли широкое применение [1–3]. Для определения координат центра масс с использованием этих методов [2, 3] требуется проведение серии измерений с различным положением изделия относительно опорной точки. При этом положение изделия может изменяться наклоном изделия в вертикальной плоскости с последующим измерением угла этого наклона [2] или перемещением изделия как целого в горизонтальной плоскости [3]. С появлением лазерных радаров (сканеров), позволяющих измерять трехмерные координаты точки с большой точностью относительно любой точки в пространстве, появилась возможность упрощения процедуры определения координат центра масс.

В работе приведена методика определения всех трех координат центра масс изделий, основанная на измерении веса в трех точках с помощью высоко точных электронных весов и одновременном измерении координат этих точек с помощью лазерного радара. Приведены также результаты экспериментальной

апробации методики на примере определения координат центра масс протяженного изделия цилиндрической формы.

Устройство для определения центра масс изделий схематично изображено на рис. 1. Устройство включает в себя каркас 1, оснастку 2, которая предназначена для закрепления изделия 9, весы 3, 4, 5, пальцы 6, 7, 8 и лазерный радар 10. Посредством пальцев вес каркаса с оснасткой и объектом измерения передается на весы. Пальцы, жестко закрепленные на каркасе, имеют металлические сферы, центры которых располагаются на осях симметрии пальцев. В результате направления векторов сил тяжести P_1 , P_2 и P_3 , действующих на весы, проходят через центры сфер, как показано на рис. 2. Лазерный радар служит для измерения координат центров сфер. Устройство изготовлено и установлено так, что центры сфер находятся в одной плоскости, перпендикулярной силе тяжести.

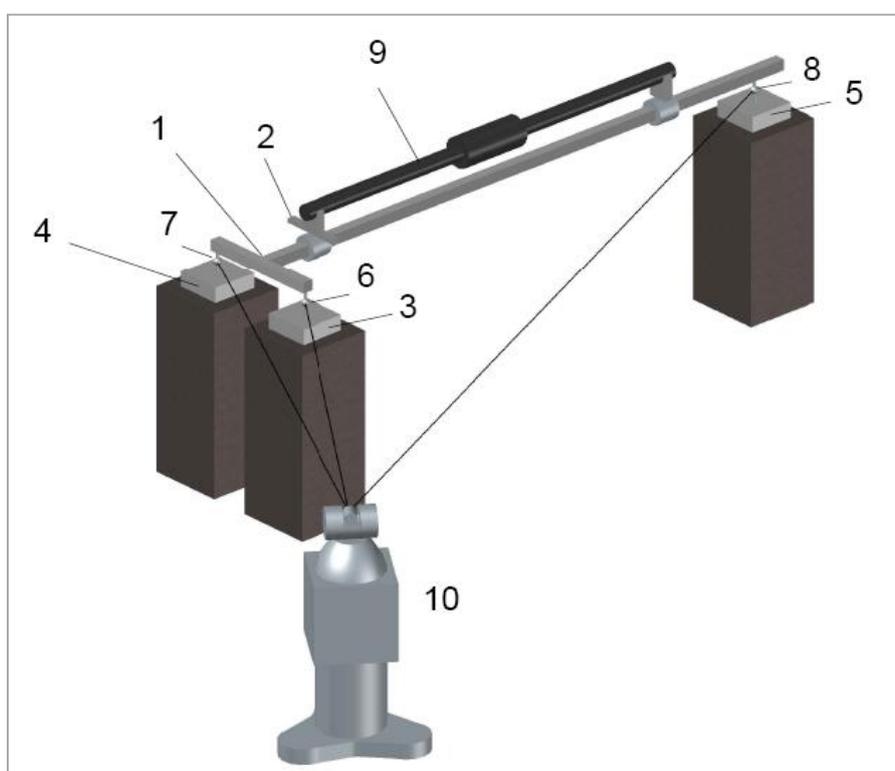


Рис. 1. Схематичное изображение устройства для определения центра масс изделий

Для определения центра масс измеряются силы тяжести P_1 , P_2 и P_3 с помощью весов, и одновременно измеряются координаты X , Y , Z центров сфер 1, 2 и 3 лазерным радаром (рис. 2). Координаты центра масс Y_t , Z_t изделия вместе с каркасом и оснасткой определяются следующим образом [4]:

$$Y_t = \frac{P_{t1}Y_{t1} + P_{t2}Y_{t2} + P_{t3}Y_{t3}}{P_t}, \quad (1)$$

$$Z_t = \frac{P_{t1}Z_{t1} + P_{t2}Z_{t2} + P_{t3}Z_{t3}}{P_t}, \quad (2)$$

$$P_t = P_{t1} + P_{t2} + P_{t3}, \quad (3)$$

где $Y_{t1}, Z_{t1}, Y_{t2}, Z_{t2}, Y_{t3}, Z_{t3}$ – координаты центров сфер 1, 2, 3, соответственно, P_{t1}, P_{t2} и P_{t3} – показания весов 3, 4 и 5, P_t – суммарный вес изделия вместе с каркасом и оснасткой.

Для удобства вычислений система координат X, Y, Z устанавливается так, чтобы начало координат совпадало с центром сферы 1, и ось Z лежала бы на линии, соединяющей центры сфер 1 и 2 (рис. 2).

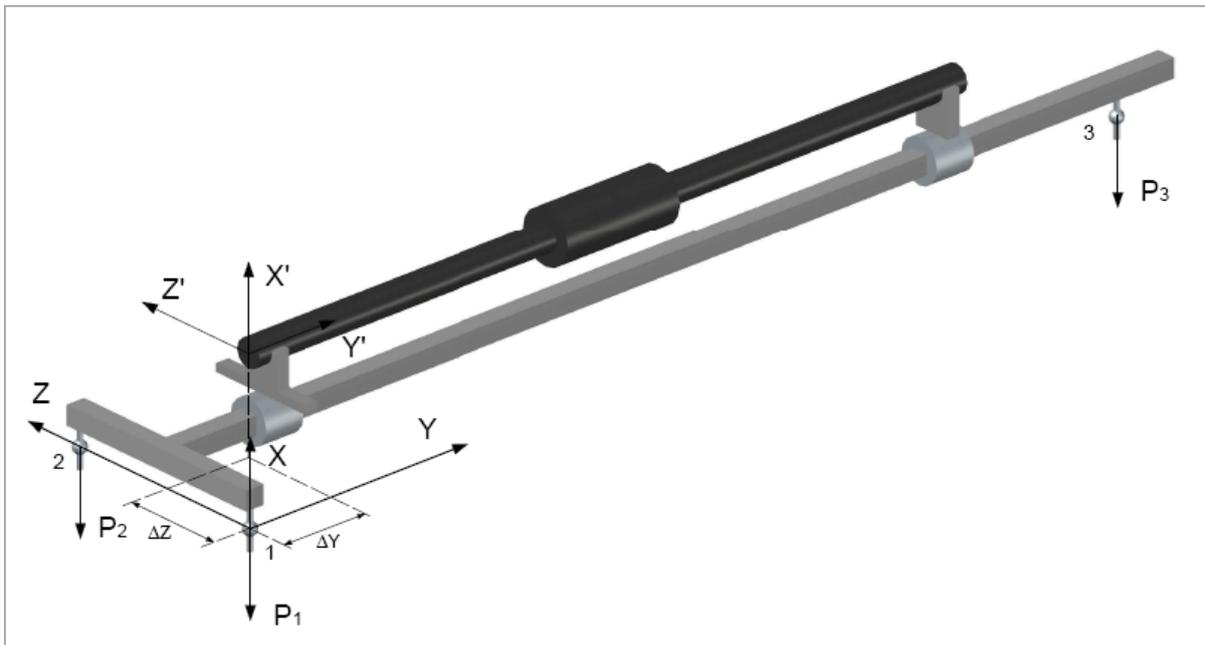


Рис. 2. Схематичное изображение каркаса с оснасткой и изделием

Чтобы определить координаты центра масс собственно изделия необходимо устранить вклад каркаса с оснасткой. Для этого проводится процедура определения координат центра масс Y_s, Z_s каркаса с оснасткой без изделия в соответствии с выражениями (1) – (3), где используются $Y_{s1}, Z_{s1}, Y_{s2}, Z_{s2}, Y_{s3}, Z_{s3}$ – координаты центров сфер 1, 2, 3 вместо $Y_{t1}, Z_{t1}, Y_{t2}, Z_{t2}, Y_{t3}, Z_{t3}$, P_{s1}, P_{s2} и P_{s3} – показания весов 1, 2 и 3 вместо P_{t1}, P_{t2} и P_{t3} , P_s – суммарный вес каркаса с оснасткой без изделия вместо P_t .

Координаты центра масс изделия Y_o, Z_o вычисляются, используя выражение для определения центра масс двух объектов с заданными массами и координатами центров масс [4]. Координаты Y_o, Z_o определяются как

$$Y_o = \frac{P_t Y_t - P_s Y_s}{P_o}, \quad (4)$$

$$Z_0 = \frac{P_t Z_t - P_s Z_s}{P_0}, \quad (5)$$

$$P_0 = P_t - P_s, \quad (6)$$

где P_0 – вес изделия.

Координаты центра масс изделия Y_0, Z_0 определены в системе координат X, Y, Z , связанной с каркасом устройства. В системе координат X', Y', Z' , связанной с изделием, координаты центра масс изделия Y'_0, Z'_0 определяются выражениями [5]: $Y'_0 = Y_0 - \Delta Y$; $Z'_0 = Z_0 - \Delta Z$. ΔY и ΔZ – смещения системы координат X', Y', Z' , по осям Y и Z , соответственно, относительно системы координат X, Y, Z . При этом оси системы координат X', Y', Z' параллельны соответствующим осям системы координат X, Y, Z (Рис. 2).

Для того, чтобы определить координату X'_0 центра масс изделия, оснастка вместе с изделием поворачивается на 90° . Поворот производится относительно направляющей каркаса, которая параллельна оси Y . При этом система координат X', Y', Z' , жестко связанная с изделием, также поворачивается на угол 90° . В результате координата X'_0 центра масс изделия оказывается лежащей в плоскости Y, Z и, таким образом, становится доступной для измерения.

Проведя вышеописанные измерения для каркаса с оснасткой и изделием, а также для каркаса с оснасткой без изделия после поворота оснастки с изделием на 90° , проводятся вычисления координат центра масс Y_t, Z_t, Y_s, Z_s и Y_0, Z_0 согласно выражениям (1) – (6). Но при этом координате Z_0 соответствует координата центра масс изделия X_0 : $Z_0 = X_0$. В системе координат X', Y', Z' , связанной с изделием, координата центра масс изделия X'_0 определяется выражением [5]: $X'_0 = X_0 - (\Delta Z - R)$.

Приведенная методика, основанная на измерении веса в трех точках с помощью весов и измерении координат этих точек лазерным радаром, позволяет определить три координаты центра масс изделия X'_0, Y'_0, Z'_0 .

Экспериментальная апробация проводилась на устройстве, укомплектованном весами GP-61KS, позволяющими измерять изделия массой до 61 кг с погрешностью от ± 1 до ± 2 г. Координаты измерялись лазерным радаром MV-224 (Metris), характеризующимся диапазоном погрешностей с минимальным значением ± 12 мкм. В каркасе металлическая сфера 2 находилась на расстоянии 860 мм по оси Z от сферы 1 (рис. 2), сфера 3 – на расстоянии 430 мм по оси Z и 3500 мм по оси Y . Изделие цилиндрической формы длиной 1950 мм имело массу 29 кг и следующие расчетные значения координат центра масс в системе координат X', Y', Z' , показанной на рис. 2: $X'_0 = 0$ мм, $Y'_0 = 975$ мм, $Z'_0 = 0$ мм.

Приведена методика определения всех трех координат центра масс изделий, основанная на измерении веса в трех точках с помощью высоко точных электронных весов и одновременном измерении координат этих точек с помощью лазерного радара. Показано, что методика может быть использована для определения координат центра масс протяженных изделий длиной несколько метров и массой несколько десятков килограмм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гернет М. М., Ратобылский В. Ф. Определение моментов инерции. – М. : Машиностроение, 1969. – 249 с.
2. Пат. № RU 2485466 С1. Способ определения массы и положения центра масс изделия и устройство для его осуществления / Матвеев Е. В., Блинов А. В., Кочкин Е. В. // Бюл. – 2013. – № 17.
3. Пат. № RU 2332650 С1. Способ определения статического момента тела / Кочетков А. А., Корж Д. Д. // Бюл. – 2008. – № 24.
4. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов. – 8-е изд. – М. : ОНИКС : Мир и образование, 2006. – С. 36.
5. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. – М. : АСТ : Астрель, 2006. – С. 56–60.

© И. Н. Куропятник, 2017

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТОВ

Леонид Валентинович Финогенов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)306-59-40, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Петр Сергеевич Завьялов

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

Владимир Эдуардович Карлин

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

Дмитрий Радионович Хакимов

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

Максим Сергеевич Кравченко

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

Виталий Викторович Уржумов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, техник, тел. (383)306-59-40, e-mail: vitaliy010195@mail.ru

Рассмотрен оптико-электронный метод высокопроизводительного контроля боковой поверхности цилиндрических объектов. Метод основан на формировании с помощью дифракционных оптических элементов замкнутой световой полосы на боковой поверхности цилиндрических объектов и считывании изображения цифровыми камерами. Представлена оптическая система экспериментальной установки и результаты исследований по определению глубины рельефа боковой поверхности цилиндров на примере имитаторов ядерного топлива.

Ключевые слова: метод, контроль, топливная таблетка, дефект, изображение, дифракционный оптический элемент, световое кольцо.

A HIGH-PERFORMANCE INSPECTION METHOD OF CYLINDRICAL OBJECT LATERAL SURFACE WITH DEFECT DEPTH DETERMINATION

Leonid V. Finogenov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., senior researcher, tel. (383)306-59-40, e-mail: finog@tdisie.nsc.ru

Petr S. Zavyalov

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

Vladimir E. Karlin

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., leading programmer, tel. (383)306-59-40, e-mail: vkarlin@mail.ru

Dmitry R. Khakimov

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

Maxim S. Kravchenko

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

Vitaliy V. Urzhumov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., technician, tel. (383)306-59-40, e-mail: vitaliy010195@mail.ru

An optoelectronic method for high-performance inspection of the external view of cylindrical objects side surface is considered. The method is based on the formation of the closed light band using the diffractive optical elements and image reading by digital cameras. The optical system of the experimental device and the results of experiments on determination the relief depth of the cylinder side surface on the example of the fuel pellets simulators are presented.

Key words: method, inspection, fuel pellet, defect, image, diffractive optical element, light ring.

Топливные таблетки (ТТ) с диоксидом урана являются активными элементами тепловыделяющих сборок (ТВС) для атомных энергетических реакторов. Для реакторов типа ВВР они представляют собой керамический цилиндр диаметром $D_c \approx 8$ мм и высотой 9...12 мм. В процессе производства ТТ на их поверхности могут образовываться дефекты: сколы, трещины, непрошлифовка, поры. Для выявления дефектных ТТ при производстве осуществляется контроль продукции. До последнего времени такой контроль проводился визуально, однако, с 2011 года а ПАО «НЗХК» начали внедряться в производственный цикл автоматические оптико-электронные системы, разработанные в КТИ НП СО РАН [1]. Принцип работы таких систем основан на контрастном методе выделения дефектов по изображению ТТ [2].

В отличие от методики визуального контроля, этот метод не учитывает глубину дефектов, что приводит к ограничению достоверности контроля. Очевидно, что для надежного контроля ТТ, по большому счету, необходимо определять 3D-форму дефектов. Известен метод контроля формы поверхности объектов (метод светового сечения) [3], который позволяет определять глубину дефектов. Суть метода заключается в формировании на поверхности контролируемого объекта сплошной световой полосы и регистрации ее изображения с помощью нескольких камер, расположенных под углом к поверхности кон-

троля. Недостатком данного способа является низкая производительность в случае контроля изделий с большой кривизной формы поверхности, например, цилиндров. Это обусловлено тем, что изображение световой полосы, в виде дуги, зарегистрированное с поверхности ТТ, занимает достаточно много строк. В результате чего кадры будут иметь большой объем данных, значительная часть которых оказывается неинформативной. Это потребует достаточно много времени на ее регистрацию, передачу и обработку, что приведет к значительному снижению производительности контроля.

В данной работе рассмотрен высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля внешнего вида ТТ с определением глубины дефектов. Приведены структурная схема устройства, реализующего предлагаемый метод контроля, расчеты элементов оптической системы и результаты экспериментальных исследований. Намечены пути дальнейших исследований и перспективы внедрения результатов.

На рис. 1 представлена структурная схема одного канала устройства, реализующего предлагаемый метод контроля ТТ с определением глубины дефектов. Устройство содержит четыре идентичных канала. Осветительная часть включает источник 1 света (полупроводниковый лазер), коллиматор 2, формирователь 3 световой полосы 4 на поверхности контролируемой ТТ 5. Таблетки перемещаются по направляющей 6 с прорезью 7. Приемный канал содержит фотоприемную камеру 8, включающую объектив 9 и матричный фотоприемник 10.

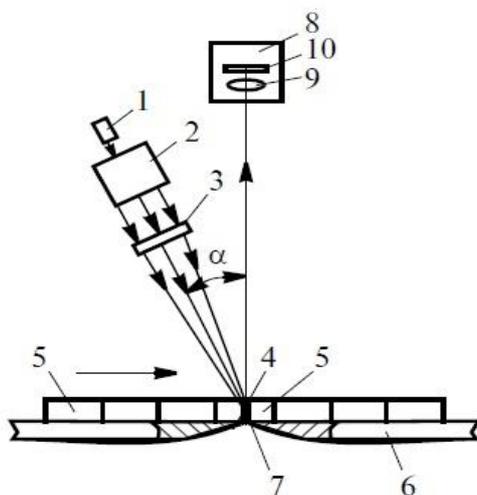


Рис. 1. Структурная схема устройства контроля ТТ

При контроле ТТ перемещаются с постоянной скоростью. Разрыв направляющей служит для прохода освещающих лучей света. На позиции контроля на цилиндрической поверхности ТТ формируются световые полосы 4, которые образуют световое кольцо по периметру ТТ в плоскости, расположенной перпендикулярно продольной оси ТТ и под углом α к оптическим осям осветительных частей.

В качестве формирователей 3 световых полос используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Направление строчной развертки в кадре камеры δ параллельно плоскости светового кольца. Для минимизации количества регистрируемой информации размер кадра фотоприемных камер δ в направлении строчной развертки ограничен длиной изображения световой полосы 4 , а размер кадра в направлении, перпендикулярном строкам матрицы, ограничивается изображением максимально допустимого дефекта ТТ по глубине. Современные матричные фотоприемники позволяют выполнить необходимое ограничение считываемой области кадра с помощью параметра ROI (Region of Interest), при этом частота получения кадров увеличивается. Информация с фотоприемных камер δ поступает в аналитическое устройство, где определяется смещение световой полосы ΔX в пикселях. Далее вычисляется глубина дефекта H непосредственно на поверхности таблетки по формуле:

$$H = k \cdot \Delta X ,$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый при калибровке устройства.

В процессе сканирования всей боковой поверхности накапливаются данные с многих сечений, в результате чего реконструируется 3D-форма контролируемой поверхности. При наличии дефектов производится вычисление их геометрических размеров (длина, ширина, глубина, объем и др.).

Важнейшим элементом устройства, реализующего предложенный метод контроля, является ДОЭ. Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДОЭ формировал на цилиндрической поверхности световую дугу — фрагмент окружности (рис. 2), диаметр которой равен диаметру контролируемого цилиндра D_c . При использовании трех (четырёх) оптических каналов угловой размер дуги должен быть 90° (120°).

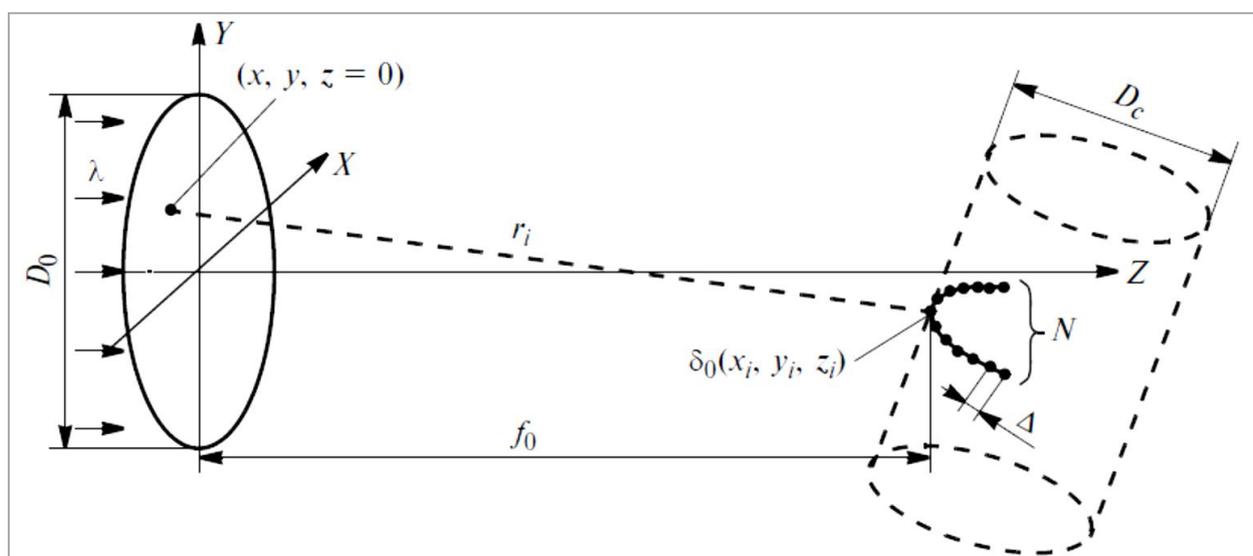


Рис. 2. Расчет ДОЭ на основе преобразования Френеля – Кирхгофа

Среди известных методов аналитического расчета фазовой функции ДОЭ [4, 5], нами выбран более простой и универсальный метод на основе численного решения интеграла Френеля – Кирхгофа. Данный метод подразумевает дискретизацию формируемой световой картины. Формируемое поле задается в виде набора из N точечных источников (δ -функций), лежащих на дуге окружности с некоторым шагом Δ друг относительно друга.

При этом, как известно, комплексная амплитуда поля, создаваемого точечным источником $\delta(x_i, y_i, z_i)$, описывается импульсным откликом свободного пространства:

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

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

Поле в каждой точке ДОЭ описывается суперпозицией N импульсных откликов:

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

где I_i — относительные интенсивности точек.

Функция пропускания ДОЭ рассчитывается с некоторым шагом (около 1 мкм) в круге диаметром D_0 . При этом из результирующего поля (1) выделяется его фазовая составляющая:

$$T(x, y) = \arg\{E(x, y)\}, \quad T(x, y) \in [-\pi; \pi]. \quad (2)$$

При изготовлении ДОЭ функция пропускания (2) бинаризуется:

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

Из полученного массива чисел с помощью математической среды MATLAB (Matrix Laboratory) рассчитывалось изображение, которое имело формат BMP (Bitmap Picture), микроструктуры ДОЭ. Они были изготовлены на круговом лазерном фотоплоттере CLWS-300/C-M [6]. Шаг дискретизации ДОЭ составлял 1 мкм, рабочая длина волны $\lambda = 405$ нм, диаметр ДОЭ $D_0 = 10$ мм, фокусное расстояние $f_0 = 260$ мм, угол падения лучей на ТТ $\alpha = 15^\circ$.

Следует учитывать, что ширина проецируемой световой полосы налагает определенные ограничения на минимальный размер измеряемых дефектов. Очевидно, что дефекты с размером меньше ширины полосы будут измеряться с

большой погрешностью. Полученная на данном этапе ширина полосы 50...65 мкм удовлетворяет требованиям контроля ТТ, где минимальный размер дефекта составляет $R_{\min} = 0,1...0,2$ мм. Для формирования более узких световых полос необходимо увеличивать апертуру ДОО (отношение D_0/f_0). Также стоит отметить, что максимальная измеряемая глубина узких дефектов будет ограничена углом освещения α , так как полоса в узких и глубоких дефектах будет формироваться не на дне дефекта, а на его боковой поверхности.

Для экспериментов по измерению глубины дефектов была собрана система контроля ТТ (рис. 3, а). В системе имеется два оптических канала, состоящих из полупроводниковых лазеров SLD3237vf мощностью 150 мВт с $\lambda = 405$ нм 1 и фотоприемных камер с КМОП-матрицей MT9V034C12STM ON Semiconductor 2 с разрешением 752 x 480 пикселей и размером пикселя 6 x 6 мкм. Калибровка системы проводилась с помощью калибра, представляющего собой ступенчатый валик, величина ступеньки которого соответствует максимальной допустимой глубине дефекта.

Для экспериментальных исследований был изготовлен имитатор ТТ 3 диаметром $D_c = 7,5$ мм с дефектом на боковой поверхности типа «пора» диаметром 2,5 мм и глубиной 0,4 мм. Так же создан опытный образец системы для контроля ТТ (рис. 3, а), на котором производилось сканирование поверхности имитатора ТТ (рис. 3, б). Абсолютная погрешность определения глубины выемки не превысила 40 мкм при вероятности обнаружения 95%, в том числе при контроле на конвейере в темпе 6 шт./с. Таким образом, видно, что метод позволяет определять 3D-форму дефектов.

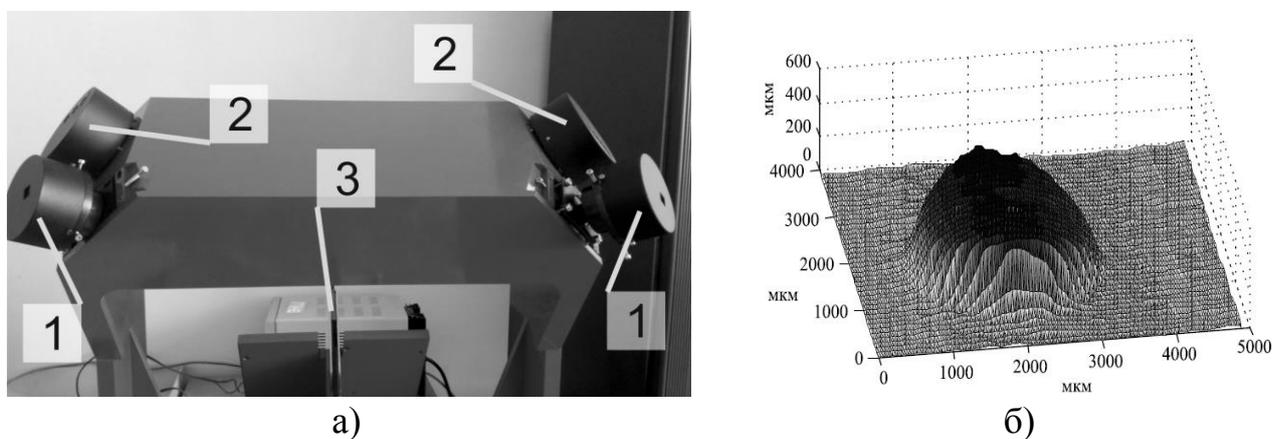
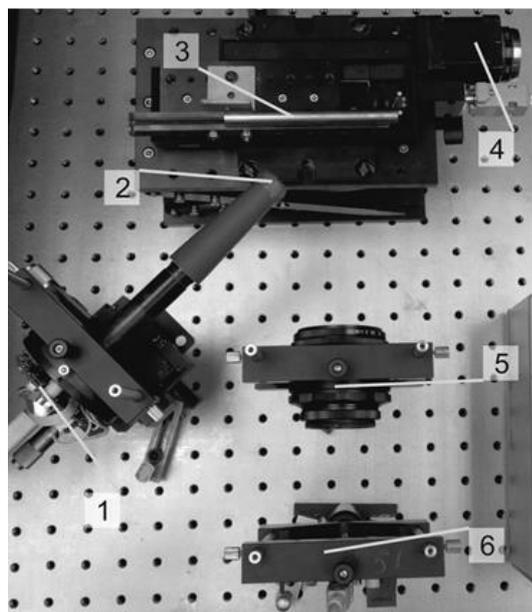


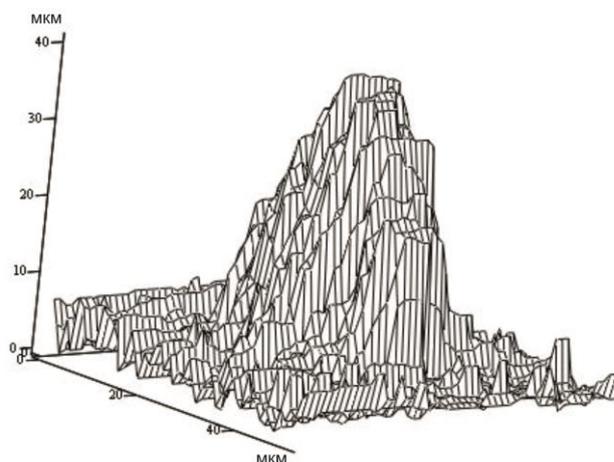
Рис. 3. Опытный образец системы для контроля боковой поверхности ТТ (а) и результат сканирования поверхности имитатора ТТ с дефектом типа «пора» (б)

Также были проведены эксперименты по контролю боковой поверхности тепловыделяющих элементов, диаметр которых 9,1 мм (ТВЭЛ). На рис. 4 представлен внешний вид экспериментального стенда для контроля оболочек ТВЭЛ (1 – лазер SLD3237vf мощностью 150 мВт с $\lambda = 405$ нм, 2 – ДОО, 3 – объект, 4 – устройство перемещения объекта, 5 – объектив, 6 – КМОП-матрицей

MT9V034C12STM ON Semiconductor 2 с разрешением 752 x 480 пикселей и размером пикселя 6 x 6 мкм.), а также результат сканирования поверхности имитатора ТВЭЛ с дефектом типа «пора».



а)



б)

Рис. 4. Экспериментальный стенд для контроля оболочек ТВЭЛ (а) и результат сканирования поверхности имитатора ТВЭЛ с дефектом типа «пора» (б)

В данной схеме калибровка осуществлялась аналогичным образом – с использованием ступенчатого валика. Для контроля ТВЭЛ был изготовлен отдельный калибровочный элемент, так как диаметр ТВЭЛ отличен от диаметра ТТ. Кроме этого, в схеме для контроля оболочек ТВЭЛ увеличен угол проекции дуги на поверхность объекта измерения (с 15° до 45°), что позволило увеличить чувствительность метода. Благодаря этому, удалось зарегистрировать дефекты с глубинами 20, 35 мкм. Для проверки полученных данных, те же образцы измерены на интерференционном микроскоп-нанопрофилометре [7], где глубины дефектов составила 24, 38 мкм соответственно.

Предложенный оптико-электронный метод контроля внешнего вида топливных ТТ в сравнении с традиционными методами обладает большей производительностью и, в отличие от используемых в производстве систем, основанных на контрастном методе выделения дефектов по изображению, позволяет определять глубину поверхностных дефектов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили реализуемость предложенного метода контроля. Полученные результаты по точности определения глубины дефектов на имитаторах ТТ отвечают требованиям автоматического контроля. Результаты проведения экспериментальных исследований по определению глубины дефектов на боковой поверхности ТВЭЛ также подтверждают применимость описанного метода и для контроля этих изделий. Проведение исследований служит основой

для создания промышленного варианта системы контроля внешнего вида ТТ и ТВЭЛ с определением глубины дефектов, которая позволит улучшить качество продукции для энергетических атомных реакторов.

Проведение дальнейших исследований метода необходимо в направлении повышения его чувствительности и точности, что связано с созданием новых ДОЭ, позволяющих формировать узкую световую полосу с минимальным уровнем шума (шириной порядка 15...20 мкм), и оптимизацией угла освещения α .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптико-электронный контроль внешнего вида топлива для АЭС / А. В. Белобородов, Е. В. Власов, П. С. Завьялов и др. // Юбилейный сборник избранных трудов КТИ НП СО РАН «Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы». – Новосибирск : ГЕО, 2012. – С. 285. [Beloborodov A. V., Vlasov E. V., Zavyalov P. S. et al. Optoelectronic inspection of the External View of Fuel for Atomic Stations / Jubilee collection of selected works of TDI SIE "Optical measuring information and laser technologies and systems". – Novosibirsk : GEO, 2012. – P. 285. (In Russian)].

2. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток / Л. В. Финогенов, А. В. Белобородов, В. И. Ладыгин и др. // Дефектоскопия. – 2007. – № 10. – С. 68–79. [Finogenov L. V., Beloborodov A. V., Ladygin V. I. et al. Optoelectronic system of automatic control of the appearance of the fuel pellets // Defectoscopy. – 2007. – № 10. – P. 68–79. (In Russian)].

3. Патент RU 2 604 109 С2.

4. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В. А. Соифера. — М. : Физматлит, 2007. – С. 93–115. [The diffractive optical computer / Soifer V. A. (Ed). (Moscow : Fizmatlit, 2007. – P. 93–115. (In Russian)]

5. Golub M. A., Kazanskiy N. L., Soifer V. A. et al. // Proceedings SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 194–206.

6. Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on the axisymmetric 3-D surfaces / V. M. Gurenko, L. B. Kastorsky, V. P. Kiryanov et al. // Proc. SPIE 4900-2002. – P. 320–325.

7. Патент RU 2245515.

© Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Э. Карлин,
Д. Р. Хакимов, М. С. Кравченко, В. В. Уржумов, 2017

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В ПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИИ

Галина Михайловна Жаркова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)330-38-96, e-mail: zharkova@itam.nsc.ru

Сергей Анатольевич Стрельцов

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики, тел. (383)346-06-77, e-mail: strelczov@corp.nstu.ru

Рассмотрены свойства поляризационных голографических решеток, сформированных в полимерно-жидкокристаллических композитах в результате одноэтапного процесса записи. Показано влияние условий записи и легирования композита неорганическими наночастицами на эксплуатационные характеристики решеток.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, жидкокристаллические композиты, поляризационная голография, наночастицы.

GENERATION OF THE DIFFRACTION GRATINGS IN POLYMER-LIQUID CRYSTAL COMPOSITES BY THE POLARIZATION HOLOGRAPHY METHOD

Galina M. Zharkova

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4/1 Institutskaya St., D. Sc., Professor, chief researcher, tel. (383)330-38-96, e-mail: zharkova@itam.nsc.ru

Sergey A. Streltsov

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx Prospect, Ph. D., associate Professor of the Department of General Physics, tel. (383)346-06-77, e-mail: strelczov@corp.nstu.ru

The properties of polarization holographic gratings formed in polymer-liquid crystal composites as a result of a single-stage recording process are considered. The effect on the performance characteristics of the gratings of the recording and the alloying conditions of the composites by inorganic nanoparticles are shown.

Key words: liquid crystals, liquid crystal composites, polarization holography nanoparticles.

Создание новой элементной базы оптоэлектроники, в условиях развивающихся информационных технологий, предполагает разработку и исследование новых оптически активных сред. В качестве управляемых оптически активных элементов перспективны поляризационные голографические решетки, записанные в полимерно-жидкокристаллических композитах (ЖК-композитах) [1–3].

Поляризационные голографические решетки формируются в слое фото-чувствительного ЖК-композита при разделении фаз нематический жидкий кристалл (НЖК) – полимер в процессе фотополимеризации, вызванной светом суперпозиции двух плоских когерентных волн с взаимно ортогональными поляризациями. В этом случае модуляция интенсивности света отсутствует, а изменение разности фаз между интерферирующими волнами приводит только к изменению поляризационного состояния результирующего светового поля. В результате формируется решетка с повторяющимися ориентациями молекул НЖК в полимерных капсулах.

Эксплуатационные характеристики и эффективность управления свойствами сформированных решеток определяются физическими свойствами НЖК, особенностями надмолекулярной структуры решетки, условиями записи, составом исходной композиции. На анизотропные свойства НЖК влияет температура и внешнее электрическое поле, поэтому вызывает интерес термооптическое и электрооптическое переключение таких решеток. При голографическом способе записи решеток в ЖК-композитах формируется среда с развитой поверхностью межфазных границ. Это приводит к повышению величины управляющего поля, необходимого для переориентации молекул ЖК в решетке. Поэтому исследования по улучшению электрооптических характеристик ЖК-композитов важны для их практического использования.

Основным параметром, определяющим эти характеристики, является состав исходного ЖК-композита. Способ модификации состава ЖК-композита путем введения в него малоразмерных неорганических частиц, получил широкое применение [3]. Выбор частиц определяется их способностью влиять на физические свойства полимерной матрицы и ЖК, а также на свойства поверхности межфазных границ ЖК-полимер.

Поэтому целью работы было исследование влияния условий записи и легирования исходной композиции неорганическими наночастицами на эксплуатационные характеристики решеток.

При формировании ЖК-композита использовалась композиция, которая включала мономер пентаэритритол тетраакрилат ($n_n = 1,487$), связующий компонент, а также фотоиницирующую систему, содержащую краситель и соинициатор. В качестве жидких кристаллов использовались BL087 ($n_o = 1.527$, $n_e = 1.797$, $\Delta\epsilon > 0$, $T_{NI} = 100$ C), BL038 ($n_o = 1.527$; $n_e = 1.799$; $\Delta\epsilon > 0$; $T_{NI} = 100$ C) или E7 ($n_o = 1.521$, $n_e = 1.746$, $\Delta\epsilon > 0$, $T_{NI} = 61$ °C), где n_n показатель преломления полимера, n_o , n_e – показатели преломления жидких кристаллов для обыкновенного и необыкновенного лучей, T_{NI} – температура перехода жидких кристаллов в изотропную жидкость, $\Delta\epsilon$ – диэлектрическая анизотропия. Концентрация НЖК в исходной композиции была равна 37 масс.%, концентрация красителя – 0,3 масс.%. Нанопорошки SiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , Y_2O_3 . использовались как добавки, концентрация которых не превышала 0,1 масс. %. Исходная смесь реагентов с наночастицами тщательно перемешивалась механически и с помощью ультразвуковой обработки и затем вносилась в экспериментальную ячейку. Далее образец освещался пучком света, представляющим суперпозицию двух когерент-

ных волн равной интенсивности с взаимно ортогональными поляризациями ($\lambda = 658$ нм).

Изменяя состав исходной композиции и режим формирования решетки можно регулировать кинетику фотополимеризации и фазового разделения компонентов, тем самым влияя на надмолекулярную структуру композита и на свойства формируемой решетки. Наибольшее влияние на морфологию сформированного композита оказывают: а) соотношение НЖК – полимер в исходной композиции; б) энергия экспозиции; с) температура.

Исследование влияния концентрации НЖК в композиции на дифракционную эффективность (ДЭ) показало, что решетки с лучшей эффективностью формируются в достаточно узком концентрационном интервале НЖК (35–38 %), отклонение от которого приводит к заметному ухудшению их качества (рис. 1).

На рис. 2 представлена зависимость ДЭ поляризационной голографической решетки, сформированной в ЖК-композите, от плотности энергии записи для решетки с пространственной частотой 34 мм^{-1} .

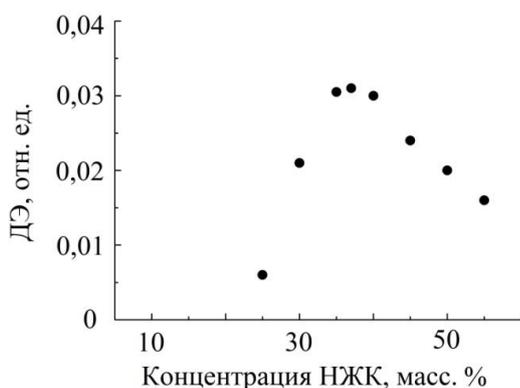


Рис. 1. Зависимость ДЭ решеток от концентрации НЖК в исходной композиции

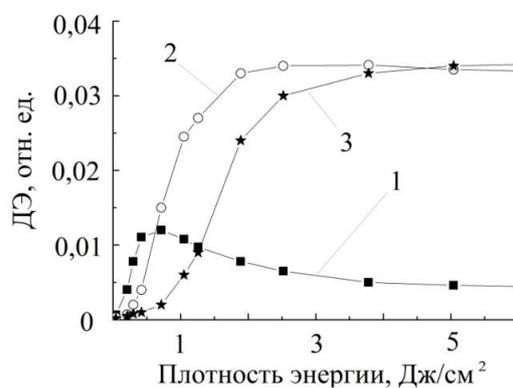


Рис. 2. Зависимость ДЭ решеток от плотности энергии записи: 1 – толщина 10 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 50 мкм

Видно, что с увеличением энергии записи наблюдается рост ДЭ до величины $\sim 3 \%$, затем рост замедляется и наступает насыщение при $\eta = 3,5 \%$ (для образца толщиной 20 мкм). Пороговая энергия записи, соответствующая дифракционной эффективности 1 %, составляет $0,65 \text{ Дж/см}^2$. Полная энергия записи, при которой достигается максимум дифракционной эффективности, равна $2,5 \text{ Дж/см}^2$. Толщина образца влияет на эти значения.

Процесс фазового разделения при формировании поляризационной решетки чувствителен к температуре. С ростом температуры уменьшается вязкость НЖК и мономера. В результате чего лучше и быстрее происходит разделение фаз НЖК-полимер.

На рис. 3 представлена зависимость дифракционной эффективности поляризационных голографических решеток от температуры формирования решетки

(для диапазона температур – от комнатной до температуры перехода НЖК в изотропную жидкость T_{NI}). Видно, что максимальная ДЭ достигается при температурах формирования 35–45 °С. Видимо это тот диапазон температур, при котором гармонично протекают процессы полимеризации, разделения фаз НЖК-полимер и ориентации НЖК под действием результирующего светового поля.

Используя температурную зависимость оптической анизотропии ЖК, можно управлять дифрагировавшим излучением. При температуре перехода ЖК в изотропное состояние оптическая анизотропия исчезает, происходит переход решетки из рассеивающего состояния в прозрачное. Это термооптическое переключение решетки в состояние, когда она «стирается». На рис. 4 представлена зависимость ДЭ поляризационных решеток от температуры.

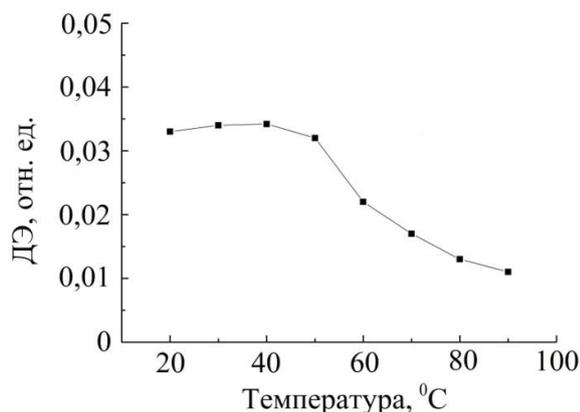


Рис. 3. Зависимость ДЭ решеток от температуры формирования

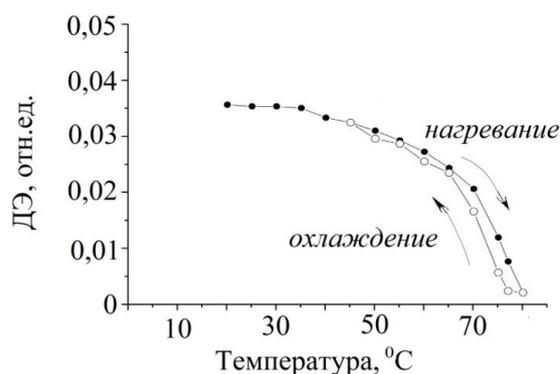


Рис. 4. Термооптическое переключение решетки

Из рисунка видно, что с ростом температуры ДЭ снижается и при температурах, превышающих 80 °С дифракционные свойства решетки исчезают, т. е. НЖК переходит в изотропную жидкость. При охлаждении решетки ее дифракционные свойства восстанавливаются с небольшим гистерезисом.

Температура фазового перехода НЖК в решетках заметно меньше, чем для чистого НЖК, используемого в исходной композиции. Это обусловлено загрязнением НЖК веществами, входящими в исходную композицию.

Легирование композита наночастицами сохраняет тенденцию к снижению T_{NI} . Самая низкая температура фазового перехода наблюдалась у решеток, содержащих SiO_2 . Кроме того, легирование наночастицами оказывает влияние на ДЭ решеток и их электрооптические характеристики. Для всех использованных систем, за исключением ЖК- композитов с SiO_2 , присутствие частиц увеличивает ДЭ решеток. Для Y_2O_3 , Al_2O_3 эффект наблюдался уже при концентрации 0,05 масс.% (рис. 5). Этот факт дает основание полагать, что наночастицы преимущественно локализованы в полимере и распределены в нем более (Y_2O_3 , Al_2O_3) или менее (ZnO) равномерно. Решетки, содержащие наночастицы SiO_2 , характеризуются заметным светорассеиванием. Возможно это связано с тем,

что в капли НЖК попадает больше наночастиц SiO_2 по сравнению с другими исследованными системами, что приводит к нарушению структуры НЖК в каплях и более низкой температуре фазового перехода T_{NI} . Легирование частицами SiO_2 приводит к повышению управляющих полей, а для образцов, содержащих наночастицы ZnO , Y_2O_3 , Al_2O_3 , управляющее электрическое поле уменьшается (рис. 6). Это может быть связано с изменением диэлектрических свойств полимерной матрицы (из-за присутствия в ней наночастиц), с изменением анизотропии диэлектрической проницаемости и вязкоупругих свойств системы, что может привести к изменению эффективного электрического поля, приложенного к ЖК-капсулам.

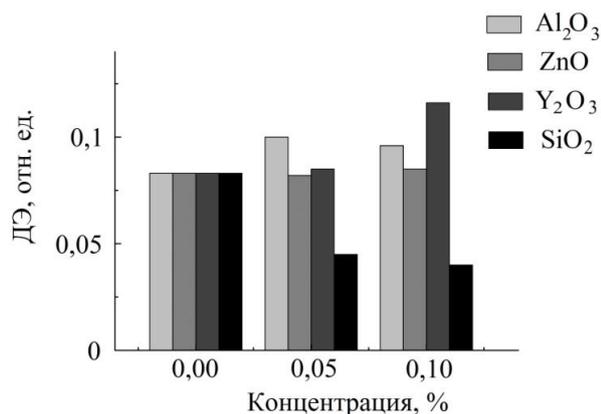


Рис. 5. Влияние концентрации наночастиц на ДЭ решеток

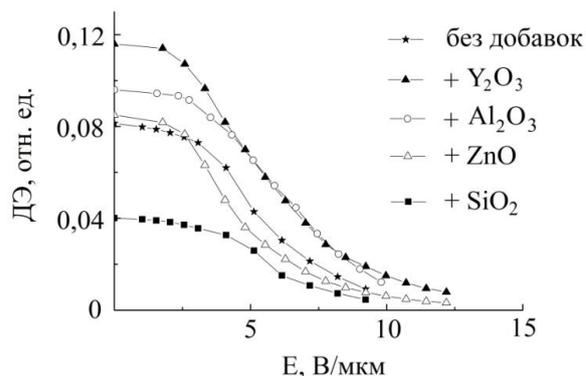


Рис. 6. Зависимость ДЭ решеток, содержащих наночастицы (0,1 %), от внешнего поля (НЖК BL038)

Таким образом, ДЭ записанных поляризационных решеток зависит от энергии записи решетки, температуры ее формирования, концентрации НЖК в исходной композиции. Оптическими свойствами поляризационных голографических решеток можно управлять электрическим и тепловым полями. В решетках температура фазового перехода НЖК заметно ниже чем для чистого НЖК, что связано с наличием в решетке компонентов исходной композиции. Экспериментально доказано, что даже небольшие концентрации наночастиц ZnO , Y_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 в композитном материале способны привести к заметным эффектам. Увеличивается ДЭ сформированных решеток, за исключением решеток, содержащих наночастицы SiO_2 . Легирование наночастицами оказывает влияние на электрооптические характеристики ЖК-композитов. Введение наночастиц SiO_2 приводит к повышению управляющих полей, а наночастиц ZnO , Y_2O_3 , Al_2O_3 к уменьшению. Для объяснения различного влияния наночастиц на характеристики решеток необходимо провести исследования процессов диффузии и фазового разделения в ЖК-композитах в присутствии частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cipparrone G., Mazzulla A., Russo G. Diffraction gratings in polymer-dispersed liquid crystals recorded by means of polarization holographic technique // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78, No 9. – P. 1186–1188.
2. Electrooptical properties of polarizations holographic gratings formed in liquid-crystal composites / G. M. Zharkova, S. A. Streltsov, A. P. Petrov, V. M. Khachatryan // *High Energy Chemistry.* – 2009. – Vol. 43, № 7. – P. 529–531.
3. Polarization holograms in azo dye-doped polymer dissolved liquid crystal composites / H. Ono, F. Takahashi, A. Emoto et al. // *J. of Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 97. – P. 053508.

© Г. М. Жаркова, С. А. Стрельцов, 2017

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТОДАМИ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Евгений Владимирович Сысоев

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

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

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

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 обнаружения дефектов на поверхности оболочки твэл с пороговым контролем глубины. Способ контроля основан на фотограмметрическом и интерференционном методах. Представлены результаты контроля рельефа поверхности оболочек твэл с дефектами известной глубины. Вероятность обнаружения дефектов глубиной более 40 мкм составила 95 %.

Ключевые слова: движущийся объект, низкокогерентная интерферометрия, дифференциальная интерферограмма, контроль.

HIGH-PERFORMANCE INSPECTION OF SURFACE DEFECTS DEPTH USING THE LOW COHERENCE INTERFEROMETRY METHODS

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Ph. D., leading researcher, tel. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., Head of Laboratory, tel. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., junior researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Vasily V. Shirokov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 630058, Russia, Novosibirsk, 41 Russkaya St., junior researcher, tel. (383)306-62-12, e-mail: stewie89@mail.ru

The high-performance method for defects detection on the surface of a fuel element cover with a threshold depth inspection is proposed. The method of defects inspection is based on photogrammetric and interference techniques. The inspection results of fuel element cover surface relief with known depth defects are presented. The probability of defects detection with a depth of more than 40 μm was about 95 %.

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

Автоматизированный бесконтактный контроль качества поверхности является актуальной задачей при производстве ответственных изделий. К таким изделиям относятся тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), из которых собираются тепловыделяющие сборки (ТВС) для реакторов атомных электростанций. ТВЭЛ представляет собой цилиндрическую трубку из сплава циркония диаметром 9 мм и длиной 4 м, внутри которой размещается топливный сердечник (урано-держачи таблетки).

Целостность оболочки ТВЭЛ играет важнейшую роль в безопасности атомных реакторов, поэтому к качеству оболочки предъявляют жесткие требования. Глубина дефектов поверхности оболочки ТВЭЛ не должна превышать 40 микрометров (мкм).

В производственных линиях, в настоящее время, контроль дефектов поверхности оболочек ТВЭЛ осуществляется применением токовихревого метода (ТВК) [1]. Этот метод обеспечивает высокую производительность контроля и обладает устойчивостью к воздействию внешних факторов (влажность, давление и т. д.). Недостатком систем контроля основанных на применении вихревого тока является ограниченный ресурс работы. Связано это с наличием высокоскоростного узла вращения. Кроме того, контроль некоторых типов дефектов (например, протяженная вмятина) осуществляется с большой погрешностью, что приводит как к перебраковке, так и пропуску дефектных изделий. Так же, для окончательной разбраковки ТВЭЛ, дополнительно используется автоматизированная система бесконтактного прецизионного измерения глубины дефектов поверхности оболочки ТВЭЛ, основанная на методе низкокогерентной интерферометрии [2–4]. Измерение глубины дефектов выполняется в полуавтоматическом режиме и не позволяет осуществлять контроль изделий автоматически и в темпе работы линии.

Целью данной работы является создание оптико-электронной системы контроля поверхностных дефектов основанной на применении методов фотограмметрии и низкокогерентной интерферометрии для обеспечения высокой производительности и надежности контроля.

Для решения этой задачи была создана экспериментальная установка для контроля внешнего вида оболочек ТВЭЛ (далее СКВВ). Внешней вид СКВВ представлен на рис. 1.

СКВВ состоит из двух подсистем: СО – подсистемы обнаружения дефектов и определения их положения и СКГ – подсистемы контроля глубины дефектов.

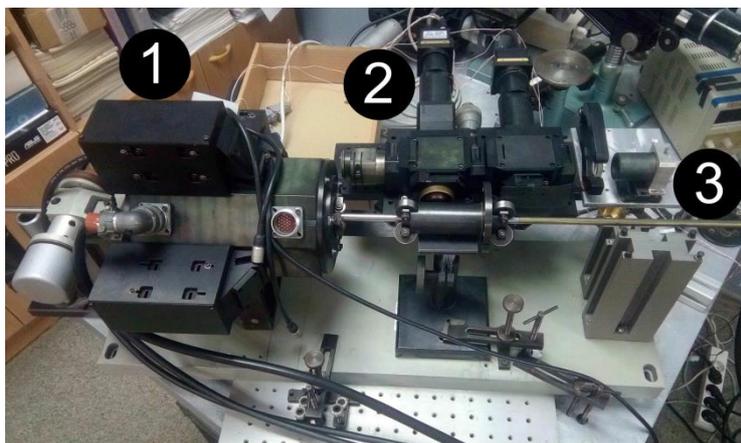


Рис. 1. Экспериментальный образец СКВВ:

1 – система осмотра (СО), 2 – система контроля глубины (СКГ), 3 – контрольный образец

Принцип работы СО основан на фотограмметрическом анализе [5] контролируемой поверхности. Принцип обнаружения дефектов описан в работе [6] и основан на том, что дефект поверхности, находящийся в зоне контроля, вносит неоднородность в индикатрису света, рассеянного контролируемой поверхностью. Поверхность оболочки ТВЭЛ имеет высокий класс чистоты, поэтому при равномерном освещении поверхности наличие даже небольшого дефекта приводит к нарушению однородности регистрируемого изображения. В работе [6] показано, что по рассеянию света можно обнаруживать дефекты с поперечным размером менее 10 мкм.

Принцип работы СКГ основан на использовании явления интерференции частично когерентного света (метод дифференциальных интерферограмм (ДИ) [3, 7]). Для частично когерентного света условие интерференции выполняется для волн, рассеянных измеряемой поверхностью из слоя, толщина которого по высоте равна длине когерентности света. Середина слоя когерентности определяет плоскость нулевой разности фазы интерферирующих волн для точек поверхности опорного зеркала интерферометра и сопряженных точек пространства предмета в измерительном плече. Формируя слой когерентности в заданном участке поверхности можно осуществлять пороговый контроль по глубине. Однако воздействие внешних факторов (вибрации, движение объекта) затрудняет процесс получения дифференциальной интерферограммы [8]. В связи с этим в СКГ применяется дифференциальный интерферометр [9] с двумя каналами синхронной регистрации [10, 11].

В процессе работы СКВВ подача твэл осуществляется внешней транспортной системой. В СО блоками осмотра осуществляется непрерывный автоматический полный осмотр внешней поверхности оболочки твэл. В ходе осмотра происходит определение места дефекта, фиксируются координаты дефекта при помощи датчика контроля перемещений твэл и происходит классификация дефекта (риска, накол, задир и т. д.). Координаты дефектов поступают в СКГ,

расположенную следом за СО по направлению движения твэл. Далее СКГ переходит в режим ожидания переданных координат. В момент, когда дефект попадает в поле зрения СКГ происходит одновременная съемка двух противофазных интерферограмм.

Программное обеспечение вычисляет ДИ по двум противофазным интерферограмм и осуществляет по ней пороговый контроль. Отсутствие или наличие интерференционного сигнала на поверхности оболочки твэл в заданной области свидетельствует о значении глубины дефекта. В результате этого можно сделать вывод, является ли дефект браком.

На экспериментальном образце СКВВ были проведены испытания. Скорость перемещения контрольного образца составляла 110 мм/с, контрольный образец имел длину 2 м и диаметр 9 мм. Глубина дефектов на поверхности оболочки твэл была предварительно измерена на интерференционном микроскопе МНП-1 [12, 13]. Процесс повторения контроля осуществлялся порядка 20 раз. Результаты контроля, представлены на рис. 2.

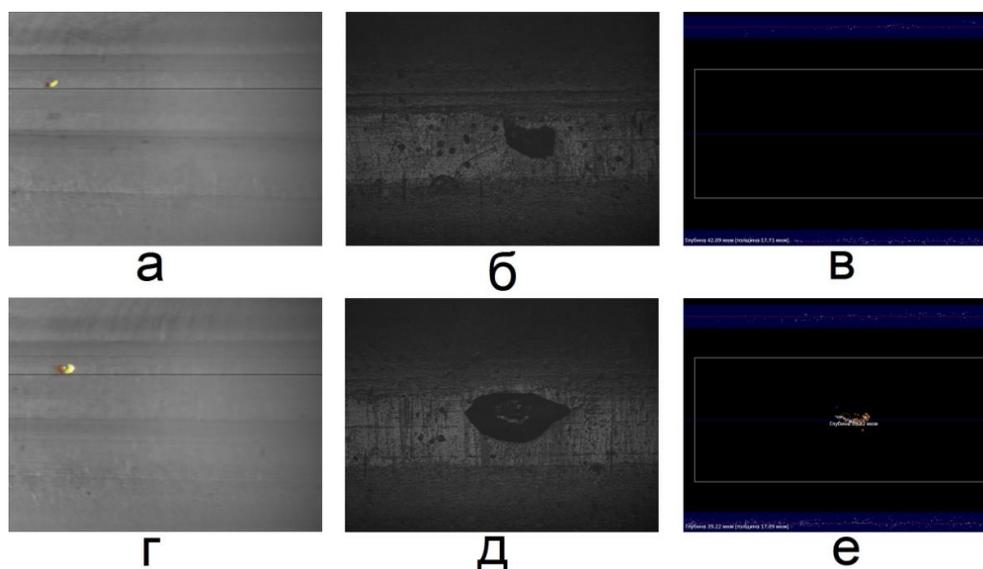


Рис. 2. Результат контроля поверхности оболочки контрольного образца

На рис. 2 представлен результат контроля рельефа поверхности оболочки твэл с двумя дефектами различной глубины. Набор изображений *а–в*, иллюстрируют результат контроля дефекта с глубиной 16 мкм, *г–е* соответствуют дефекту с глубиной 45 мкм. Изображения *а, г* – были получены в СО, которая обнаружила дефект. Изображения *б, д* – соответствует, зарегистрированным интерферограммам в СКГ. Изображения *в, е* – соответствуют дифференциальным интерферограммам. По дифференциальной интерферограмме определяется наличие пересечения поверхности твэл со слоем когерентности на глубине 40 мкм. Таким образом можно видеть что в случае изображения *в* – нет пересечения и глубина дефекта менее 40 мкм (не брак), а в случае изображение *е* – пересечение есть и глубина больше 40 мкм (брак).

Таким образом, предложен высокопроизводительный способ обнаружения дефектов на поверхности оболочки твэл с пороговым контролем глубины.

Экспериментально показано, что данный способ позволяет контролировать дефекты глубиной более 40 мкм с вероятностью не менее 95 %.

Результаты работы будут использованы при проектировании высокоточных, высокопроизводительных систем для бесконтактного контроля объектов промышленного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mook G., Michel F., Simonin J. Electromagnetic imaging using probe arrays. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25–28 Oct 2008, Shanghai, China.

2. Form measurement of small cylindrical objects using two-wavelength interferometry / A. Höink, K. Meiners-Hagen, O. Jusko, A. Abou-Zeid. // Proceedings of SPIE. V. 7133. P. 71333Q-1–71333Q-7

3. Измерения локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света / Е. В. Сысоев, И. В. Голубев, Ю. В. Чугуй, В. А. Шахматов // Автометрия. – 2004. – 40, № 5. – С. 4–13.

4. Dresel Th., Häusler G., Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Applied. Optics. – 1992. – V. 31. – P. 919–925.

5. Исследование фотограмметрических изображений с помощью матриц вероятностного распределения яркости / А. Ю. Баврина, Н. Ю. Ильясова, А. В. Куприянов, А. Г. Храмов // Компьютерная оптика. – 2002. – № 23. – С. 62–65.

6. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Куликов Р. В. Оптический метод обнаружения механических дефектов на поверхностях высокого класса чистоты // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 5. – С. 111–116.

7. Сысоев Е. В., Голубев И. В. Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.

8. Влияние случайного сдвига фазы интерферограмм на погрешность измерений рельефа поверхности интерференционным профилометром / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // 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. 28–31.

9. Modifications of the coherence radar for in vivo profilometry in dermatology / P. Andretzky, M. W. Lindner, G. Bohn, J. Neumann, M. Schmidt, G. Ammon, and G. Häusler // SPIE. – 1998. – V. 3567. – P. 88–96.

10. Двухканальный интерферометр белого света для получения дифференциальных интерферограмм / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // 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. 2. – С. 34–38.

11. Двухканальный интерферометр для измерения рельефа движущихся поверхностей / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // Приборы. – 2016. – № 12. – С. 5–9.

12. Высокопроизводительный оптический интерференционный микропрофилометр / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, А. К. Поташников, В. В. Широков // Датчики и Системы. – 2015. – № 9–10. – С. 52–57.

13. Применение оптической интерферометрии в идентификационной трасологической экспертизе / Ю. В. Чугуй, Е. В. Сысоев, И. В. Латышов, А. В. Кондаков, В. А. Васильев // Эксперт криминалист. – 2016. – № 3. – С. 25–28.

© Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков, 2017

ВАРИООБЪЕКТИВ С ЖИДКОЛИНЗОВОЙ СИСТЕМОЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Виктор Сергеевич Ефремов

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

Диана Георгиевна Макарова

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

Виктор Брунович Шлишевский

Доктор технических наук, профессор, тел. (960)789-39-10, e-mail: svb_dom@ngs.ru

Проанализирован вариант линзового вариообъектива с двухкомпонентной жидкостной системой переменного увеличения.

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

VARIOLENS WITH THE LIQUID SYSTEM OF FOCUS DISTANCE CHANGE

Victor S. Efremov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate Professor, associate Professor of the Department of Nanosystems and Optical Devices, tel. (383)343-91-11, e-mail: ews49@mail.ru

Diana G. Makarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., assistant of the Department of Nanosystems and Optical Devices, tel. (383)343-22-11, e-mail: diana_ssga@mail.ru

Victor B. Shlishevsky

D. Sc., Professor, tel. (960)789-39-10, e-mail: svb_dom@ngs.ru

The variant of a variolens with two-component liquid system of variable magnification was analyzed.

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

В современном оптическом оптико-электронном приборостроении все более широкое применение находят системы с непрерывным изменением масштаба изображения (увеличения) – вариообъективы и трансфокаторы. Вопрос смены увеличения в них традиционно решается путем осевого перемещения оптических компонентов с помощью различного рода электромеханических

устройств, зачастую весьма энергозатратных и недостаточно быстродействующих. Между тем, для ряда оптических систем, прежде всего малогабаритных, фокусное расстояние и масштаб изображения можно регулировать с помощью управляемых жидких (жидкостных) линз (ЖЛ), которые допускают достаточно широкую вариацию радиусов кривизны своих поверхностей за счет различных физических эффектов [1–3]. В частности, фирмой Sandia Corporation анонсируется прицел для автоматических винтовок с технологией адаптивного увеличения «RAZAR» (Rapid Adaptive Zoom for Assault Rifles), основанной на использовании набора управляемых полимерных ЖЛ [4], в работе [5] приводятся примеры конструктивного выполнения простейших ЖЛ и некоторые компоновки ЖЛ-систем в составе вариообъективов фирмы Optotune и т. д.

На рис. 1 показана принципиальная схема вариообъектива с ЖЛ-системой изменения увеличения (ЖЛ СИУ). Положительный компонент 1 проецирует изображение рассматриваемого объекта в плоскость предметов СИУ 2–3, которая и устанавливает требуемый масштаб в плоскости изображений объектива в целом.

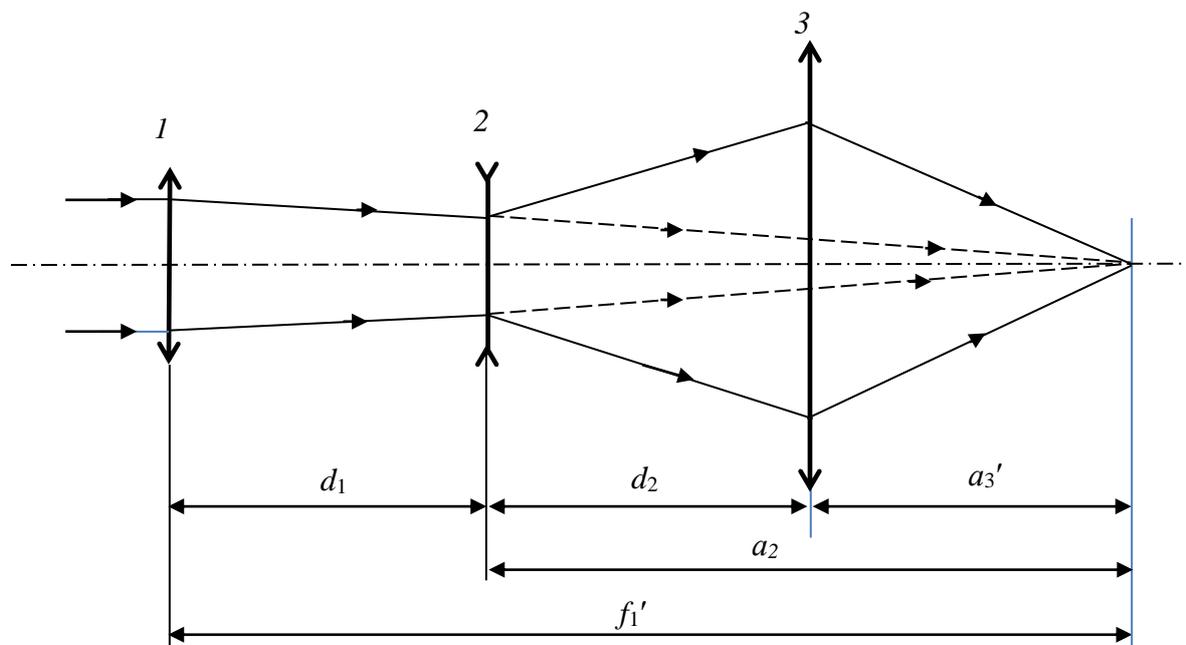


Рис. 1. Ход лучей в вариообъективе с ЖЛ СИУ для двух крайних значений увеличения

На практике при компоновке объектива во внимание принимаются также следующие соображения:

– для удобного размещения фотоприемного устройства фокальная плоскость должна быть вынесена за пределы объектива, т. е. задний фокальный отрезок a_3' должен быть положительным;

– для большей компактности системы плоскости предметов и изображений ЖЛ СИУ должны быть совмещены как друг с другом, так и с фокальной плоскостью всего объектива, что осуществимо, когда $f'_1 > a_2$.

Если указанные исходные параметры известны (заданы), то на основании аналитических соотношений из [6, 7] нетрудно получить комбинацию численных значений фокусных расстояний f'_2 и f'_3 компонентов СИУ для каждого требуемого увеличения системы β .

Примем для определенности и упрощения расчета «удобные» округленные значения $a'_3 = d_2 = 50$ мм и $f'_1 = 150$ мм (тогда $d_1 = 50$ мм).

На рис. 2 приведен пример моделирования варианта подобного вариообъектива с двухкомпонентной ЖЛ СИУ на эффекте электросмачивания («electrowetting» [1]) для видимой области спектра ($\lambda_0 = 589,3$ нм). Апертурная диафрагма здесь расположена вблизи третьего компонента, что обеспечивает постоянство относительного отверстия объектива во всем диапазоне изменения его фокусного расстояния f'_Σ , а сам компонент включает две одинаковые ЖЛ. Оптическими материалами служат кварцевое стекло (все твердотельные элементы), 1-бромнафталин (непроводящие жидкости) и состав № 2 из [8] (проводящие жидкости).

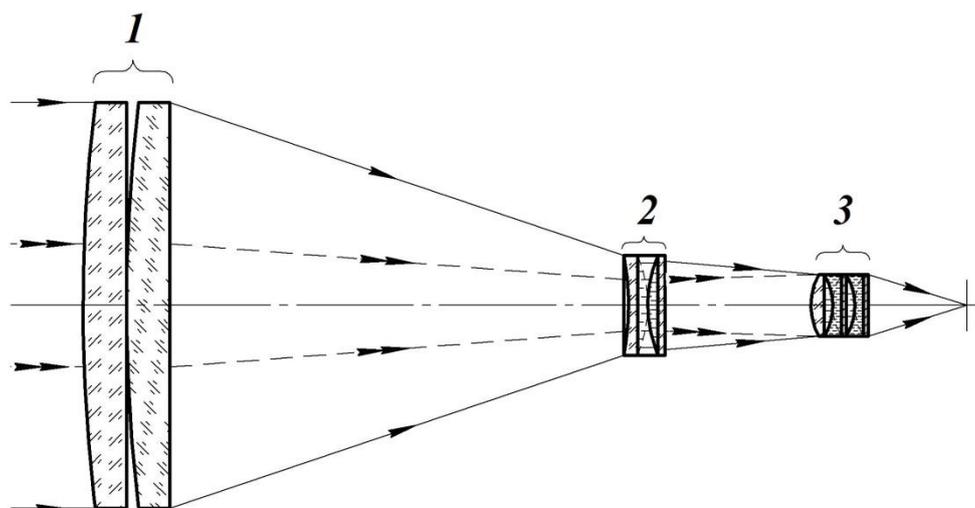


Рис. 2. Схема вариообъектива с двухкомпонентной ЖЛ СИУ (показан ход лучей при двух крайних значениях увеличения $\beta_{\min} = 0,3^\times$ и $\beta_{\max} = 0,9^\times$):

1 – твердотельный фокусирующий компонент с постоянным фокусным расстоянием; 2, 3 – ЖЛ-компоненты с переменными фокусными расстояниями

В табл. 1, 2 даны расчетные характеристики объектива при постоянном относительном отверстии 1 : 3, линейном размере изображения 6 мм и угле поля зрения 2ω от ≈ 7 до $\approx 2,5^\circ$.

Таблица 1

Оптические характеристики вариообъектива с ЖЛ-системой
переменного увеличения

f'_Σ , мм	2ω , град	f'_2 , мм	f'_3 , мм	β
45,1	7,2	-32,19	17,98	0,3
71,5	4,4	-87,29	26,43	0,5
83,7	3,2	-100,17	27,96	0,7
121,1	2,4	215,53	-268,96	0,9

Таблица 2

Концентрация энергии в абберационном пятне рассеяния

Радиус абберационного пятна рассеяния, мкм	Концентрация энергии (в центре поля зрения), %				
	Дифракционный предел	f'_Σ , мм			
		45,1	71,5	83,7	121,1
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0	83,9	10,6	11,1	10,3	9,1
4,0	91,1	23,6	40,2	23,2	20,9
6,0	94,0	37,6	85,8	39,0	34,6
8,0	95,6	57,8	91,0	57,9	52,2
10,0	96,7	94,0	93,1	97,3	76,7

К достоинствам данной системы следует отнести:

- быстрое (в пределах мс) изменение общего фокусного расстояния f'_Σ ;
- возможность выбора плавного или дискретного способа изменения увеличения;
- постоянство относительного отверстия;
- сравнительно простую конструкцию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Light actuation of liquid by optoelectrowetting / P. Y. Chioua, H. Moonb, H. Toshiyoshic, C.-J. Kimb, M. C. Wua // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – Vol. 104 (3). – P. 222–228.
2. 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.
3. Ефремов В. С., Шлишевский В. Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем : учебное пособие. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 284 с.
4. Szondy D. RAZAR riflescope brings push-button zoom to the battlefield [Электронный ресурс]. – URL: <http://newatlas.com/sandia-razar-adaptive-zoom-riflescope/34366/> (дата обращения: 23.01.2017).

5. Compact optical design solutions using focus tunable lenses / M. Blum, M. Büeler, C. Grätzel, M. Aschwanden [Электронный ресурс]. – URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/pro-ceeding.aspx?articleid=1661475> (дата обращения 23.01.2017).

6. Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б. Формулы параксиальной оптики для двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения // 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. 21–25.

7. Ефремов В. С., Макарова Д. Г., Шлишевский В. Б. Условия построения двухкомпонентных жидкостных систем переменного увеличения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 7. – С. 55–59.

8. Pat. EP1979771B1. Multi-phase liquid composition and variable- focus optical lens driven by electrowetting that incorporates the / F. Amiot, G. Malet. Publication Date: 11.02.2011.

© В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский, 2017

ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Александр Петрович Гурьев

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, ул. Ленинградская, 29 Т, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (813)696-84-47, e-mail: guriev@sbor.net

Александр Геннадьевич Бедрин

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, ул. Ленинградская, 29 Т, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории, тел. (813)696-84-13, e-mail: 46@niiоep.ru

Иван Сергеевич Миронов

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, 188540, Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, ул. Ленинградская, 29 Т, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (813)696-88-18, e-mail: 46@niiоep.ru

Приведен обзор технических характеристик ряда источников света на основе газоразрядных излучателей, позволяющих облучать объекты площадью до 1 м². Для генерации световых импульсов миллисекундной длительности используются емкостные накопители, секундной длительности – система сетевого тиристорного энергопитания мощностью 3 МВт. Требуемые амплитудно-временные характеристики светимости излучателей во втором случае формируются посредством компьютерного профилирования импульсов тока. Источники света предназначены для теплофизических исследований оптических и конструкционных материалов, а также для проведения световых испытаний оптико-электронной аппаратуры.

Ключевые слова: физическое моделирование, световые импульсы, мощное некогерентное излучение, ксеноновые лампы, магнитоприжатый разряд.

LIGHT SOURCES FOR THERMOPHYSICAL RESEARCH OF MATERIALS

Aleksandr P. Guriev

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Russia, Leningrad region, Sosnovy Bor, 29 T Leningradskaya St., Ph. D., lead researcher, tel. (813)696-84-47, e-mail: guriev@sbor.net

Aleksandr G. Bedrin

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Russia, Leningrad region, Sosnovy Bor, 29 T Leningradskaya St., Ph. D., Head of Laboratory, tel.(813)696-84-13, e-mail: 46@niiоep.ru

Ivan S. Mironov

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, 188540, Russia, Leningrad region, Sosnovy Bor, 29 T Leningradskaya St., Ph. D., lead researcher, tel. (813)696-88-18, e-mail: 46@niiоep.ru

A review of technical data for a number of light sources based on gas-discharge sources of optical radiation permitting to irradiate objects over an area of up to 1 m² is given. To generate light pulses of millisecond duration the capacitive storages of second duration, namely, a system of thyristor energy supply 3 MW power are used. The required amplitude-time characteristics of optical

radiation brightness are formed in the latter case by computer profiling of the current pulse. The light sources are intended for thermophysical research of optical and structural materials as well as for light tests of optoelectronic equipment.

Key words: physical simulation, light pulses, intense incoherent radiation, xenon lamp, magnet-pressed discharge.

Для целей физического моделирования силового и функционального воздействия мощного оптического некогерентного излучения природных и техногенных вспышек на материалы и оптико-электронную аппаратуру в НИИ ОЭП разработан и построен ряд установок на основе газоразрядных излучателей, позволяющих облучать объекты площадью до 1 м². Ниже приведены описания конструкций и технические характеристики источников света, предназначенных для теплофизических исследований оптических и конструкционных материалов, а также проведения световых испытаний оптико-электронной аппаратуры.

1. Сетевой широкоформатный излучатель

Формирование излучения осуществляется с помощью широкоформатной ламповой панели на основе 15 импульсных трубчатых ксеноновых ламп ИНП 16/530 (рис. 1), работающих в импульсном и квазидуговом режимах миллисекундной и секундной длительности [1]. В импульсном режиме амплитудно-временные параметры регулируются напряжением заряда и изменением емкости конденсаторного накопителя с запасаемой энергией до 55 кДж. Для обеспечения квазистационарного дугового режима работы ламп применяется специализированный сетевой энергокомплекс на основе тиристорного агрегата электрической мощностью 3 МВт (рис. 2), при этом формирование импульсов излучения осуществляется посредством компьютерного управления разрядным током каждой лампы. Такая схема комбинированного электропитания лампового излучателя позволяет охватить широкий диапазон длительностей формируемых световых импульсов и моделировать двухимпульсные вспышки света [2] различной природы.



Рис. 1. Общий вид широкоформатной ламповой панели



Рис. 2. Сетевой энергокомплекс

С целью повышения облученности в рабочем пятне применялись концентрирующие оптические системы фоконного типа. Программно-аппаратный диагностический комплекс стенда позволяет измерять спектрально-энергетические и амплитудно-временные параметры излучения с выводом информации на любой цифровой носитель. Излучатель, технические характеристики которого представлены в табл. 1, удобен при теплофизических исследованиях материалов, обеспечивает достаточно большое пятно облучения и чистые условия для проведения испытаний современных образцов опико-электронной аппаратуры на световую стойкость.

Таблица 1

Технические характеристики излучателя в квазистационарном режиме

Максимальное значение облученности, Вт/см ²	280± 20	
Длительность импульса света, сек	до 10	
Площадь облучения, м ²	до 1	
Неравномерность распределения энергии излучения по пятну, %	не более 20	
Спектральный состав излучения, % / Δλ, нм	Δλ = 220÷400	11±1
	Δλ = 400÷700	22±2
	Δλ = 700÷1300	67±6

2. Имитатор солнечного излучения (стенд Ксенон-Солнце)

Прогнозирование изменений характеристик материалов и приборов при импульсном, длительном постоянном или циклическом воздействии излучения невозможно без проведения испытаний на световое воздействие с помощью стендов, имитирующих излучение реальных источников света. Назначение излучателя Ксенон-Солнце на основе дуговых ксеноновых ламп высокого давления (ДКсШР-3, 5 или 10 кВт) – проведение исследований материалов, элементов, узлов и приборов при воздействии солнечного излучения. Источник света представляет собой оптическую систему из шаровой лампы, эллипсоидного отражателя и сферического контротражателя. На рис. 3 приведена конструкция излучателя, а на рис. 4 – спектр излучения дуговой ксеноновой лампы. С целью изучения светового старения изделий в процессе их эксплуатации нормальный режим, соответствующий требованиям ТЗ (ТУ) на изделие, заменяют форсированным, в котором длительное время τ воздействия излучения заменяется повышенным значением облученности ϵ при сохранении соотношения $\epsilon\tau = \text{const}$. Применение ускоренных испытаний материалов в форсированном по облученности режиме позволяет сократить длительность экспозиции, дает существенный экономический эффект и возможность многократного повторения испытаний.



Рис. 3. Конструкция излучателя

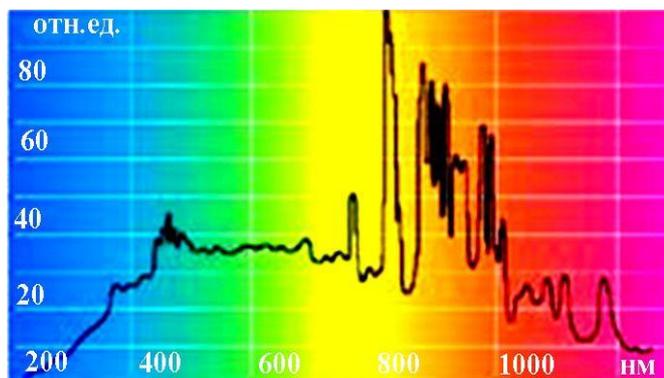


Рис. 4. Спектр излучения лампы ДКсШР 10 кВт

Таблица 2

Технические характеристики стенда Ксенон-Солнце

Плотность потока излучения на образце, Вт/м ²	1120...4600	
Площадь облучаемой поверхности, см ²	до 1300	
Облученность в пятне облучения до 5 см ² , Вт/см ²	до 300	
Спектральное распределение потока излучения в диапазонах, % / Δλ, нм	Δλ = 220÷400	7 ± 0,5
	Δλ = 400÷700	36 ± 2
	Δλ = 700÷1300	57 ± 3

3. Источник света на основе плазменного излучателя

Плазменные излучатели, созданные по принципу разрядов с испаряемой стенкой, могут работать как в импульсном, так и в длительном квазинепрерывном режиме. К числу таких разрядов относится магнитопржатый разряд (МПР), пржатый магнитным полем к ограничивающей непроводящей стенке [3]. На основе МПР разработаны импульсный и квазинепрерывный плазменные излучатели [4], параметры которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры плазменных излучателей на основе МПР

Параметр	Импульсный излучатель	Квазинепрерывный излучатель	Комбинированный излучатель
Габариты, см	20 × 6.5 × 2	8 × 2.5 × 2	8 × 2 × 2
Ток разряда, А	до 3 × 10 ⁵	до 5 × 10 ³	8 × 10 ⁴ ÷ 5 × 10 ³
Яркостная температура, К	до 3 × 10 ⁴	до 6 × 10 ³	1,6 × 10 ⁴ ÷ 7 × 10 ³
Энергетическая светимость, Вт/см ²	до 10 ⁶	до 5 × 10 ³	2 × 10 ⁵ ÷ 10 ⁴
Длительность свечения, сек	до 3 × 10 ⁻³	до 1	до 1

Питание импульсного излучателя осуществляется от емкостного накопителя с запасаемой энергией 2 МДж, зарядным напряжением до 10 кВ, полной емкостью 0,0357 Ф. Такой накопитель позволяет реализовать указанные в табл. 3 характеристики плазменного излучателя с площадью излучающей поверхности 130 см². Питание квазинепрерывного излучателя осуществляется от сетевого тиристорного выпрямителя мощностью 3 МВт.

Комбинированный излучатель с электромагнитом на основе МПР, общий вид которого приведен на рис. 5, может работать как в импульсном, так и в квазинепрерывном режиме. Electroды, подложка и боковые стенки образуют разрядный промежуток, в котором формируется излучающий плазменный канал разряда.

На рис. 6 представлен временной ход тока разряда при питании плазменного излучателя от емкостного накопителя и сетевого тиристорного агрегата. Амплитуда тока в импульсном режиме достигает 75 кА, в квазинепрерывном – 6 кА. Измеренные в видимой и ближней ИК областях ($\Delta\lambda = 400 - 1100$ нм) яркостные температуры T плазмы МПР и энергетическая светимость W комбинированного излучателя приведены на рис. 7.

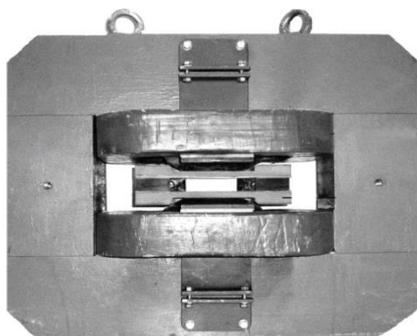


Рис. 5. Плазменный излучатель с электромагнитом

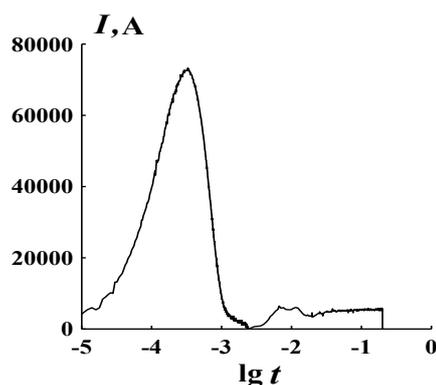
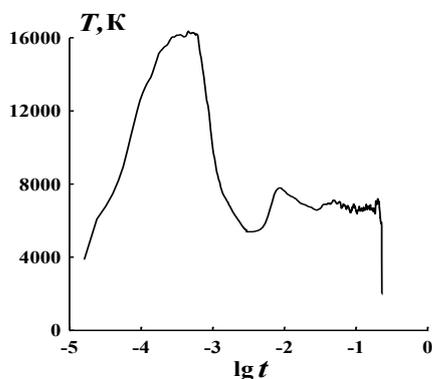
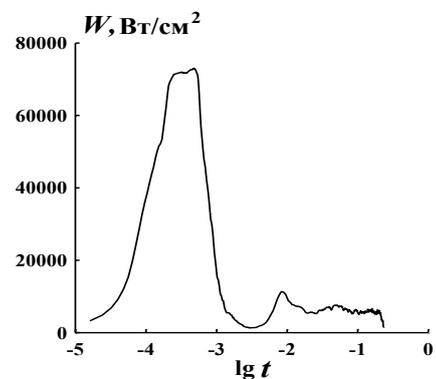


Рис. 6. Временной ход тока разряда



а)



б)

Рис. 7. Временной ход яркостной температуры (а) и энергетической светимости разряда (б)

4. Источник света на основе дуговых ксеноновых ламп ДКсРМ-55 кВт

Назначение стенда Дуга, фотографии которого приведены на рис. 8, а технические характеристики представлены в табл. 4, – проведение исследований воздействия мощного некогерентного излучения на оптические, конструкционные материалы и приборы. Стенд имеет два режима работы – импульсный и непрерывный. Измерительно-управляющий комплекс на базе компьютера позволяет регулировать форму и длительность импульса тока дуговой лампы и производить диагностику процесса облучения материалов.



Рис. 8. Общий вид стенда излучателя (а) и лампы ДКсРМ-55 кВт (б)

Таблица 4

Технические характеристики стенда Дуга

Максимальный лучистый поток, кВт		
– при формировании импульсов		22
– в непрерывном режиме		15
Пределы регулирования тока, А		40–750
Минимальная длительность фронта при токе от 100 до 600 А, мс		20
Угол схождения крайних лучей		$52 \pm 0,5^\circ$
Максимальная облученность, Вт/см ²		1300 ± 130
Спектральное распределение потока излучения в диапазонах, % / $\Delta\lambda$, нм	$\Delta\lambda = 220 \div 400$	$10 \pm 0,2$
	$\Delta\lambda = 400 \div 700$	35 ± 2
	$\Delta\lambda = 700 \div 1300$	55 ± 3

Заключение

Созданные источники света являются метрологически аттестованными излучателями для физического моделирования световых импульсов миллисекундной и секундной длительности. С помощью данных излучателей проведены исследования теплофизических свойств более 600 наименований оптических, конструкционных материалов и приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бедрин А. Г., Гурьев А. П., Дашук С. П. Мощный широкоформатный квазистационарный излучатель на трубчатых ксеноновых лампах. // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 9. – С. 59–66.
2. Формирование двухпикового режима светового импульса широкоформатной ламповой панели / А. Г. Бедрин, А. П. Гурьев, В. М. Громовенко, В. Г. Докучаев // Прикладная оптика : сб. материалов IX Международной конференции. – СПб. : ГОИ им. С. И. Вавилова, 2010. – С. 141–145.
3. Экспериментальное исследование сильноточного магнитопржатого разряда / Г. Г. Ворыпаев, И. С. Миронов, И. В. Подмошенский, П.Н. Роговцев // Сборник материалов I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1990. – С. 140–145.
4. Бедрин А. Г., Дашук С. П., Миронов И. С. Квазинепрерывный источник излучения на основе магнитопржатого разряда // ТВТ. – 2007. – Т. 45, № 2. – С. 182–186.

© А. П. Гурьев, А. Г. Бедрин, И. С. Миронов, 2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ И НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

Максим Александрович Гришин

Институт автоматике и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, тел. (383)335-64-87, e-mail:grishinmax1@yandex.ru

Евгений Дмитриевич Булушев

Институт автоматике и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)335-64-87

Виктор Павлович Бессмельцев

Институт автоматике и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, зав. лабораторией лазерной графики, тел. (383)335-64-87

Построена модель импульсной лазерной абляции алюминия в условиях образования и нагрева плазмы, проведено математическое моделирование процесса абляции. Результаты моделирования качественно и количественно согласуются с экспериментом, при этом коэффициент плазменного экранирования вычисляется в зависимости от температуры плазмы.

Ключевые слова: импульсная лазерная абляция, фазовый взрыв, плазменная экранировка.

MODELING OF PULSED LASER ABLATION OF ALUMINUM IN CONDITIONS OF BOTH PLASMAS FORMATION AND HEATING

Maxim A. Grishin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, engineer, tel. (383)335-64-87, e-mail:grishinmax1@yandex.ru

Evgenij D. Bulushev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, Ph. D., researcher, tel. (383)335-64-87

Victor P. Bessmeltsev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of Laser Graphics Laboratory, tel. (383)335-64-87

A model of pulsed laser ablation of aluminum in the conditions of both plasmas formation and heating was created; mathematical modeling of the ablation process was carried out. The simulation results are qualitatively and quantitatively agreed with the experiment, while the plasma screening coefficient is calculated as a function of the plasma temperature.

Key words: pulsed laser ablation, phase explosion, plasma screening.

Импульсная лазерная абляция (ИЛА) является неотъемлемой частью процесса лазерной микрообработки металлов. Теоретические исследования ИЛА на

протяжении многих лет проводились на основании одномерной тепловой модели [1–3]. На основании последней производились оценки глубины абляции, точность которых составляла ~10–50 %. Такая точность моделирования не удовлетворяет современным требованиям по точности обработки, особенно при послойном трехмерном формообразовании.

В наше время широко распространены лазерные системы со следующими характеристиками: $4.5нс \leq \tau \leq 50нс$, $10^8 \frac{Вт}{см^2} \leq I \leq 10^{11} \frac{Вт}{см^2}$, $10Гц \leq f \leq 10^5 Гц$.

Теоретические предсказания глубины абляции при данных параметрах лазерных систем затруднены ввиду математической сложности описания, которая продиктована наличием нелинейных физико-химических процессов. Поэтому исследования глубины абляции обычно проводятся на основании экспериментального подхода [4]. Методика, примененная в [4], позволяет с высокой точностью предсказывать зависимость геометрических размеров объектов от параметров и режимов работы лазерной системы. Однако, применение такого подхода является трудоемким и времязатратным решением, что актуализирует проблему адаптации простых физико-математических моделей для оценки интегральных характеристик ИЛА.

Математическое моделирование ИЛА затруднено, поскольку имеют место:

1. Температурная зависимость теплофизических и оптических свойств металла.
2. Наличие облака продуктов абляции (газа/плазмы), экранирующих падающее излучение.
3. Наличие режима взрывного вскипания или фазового взрыва.

Во многих работах по моделированию ИЛА были учтены процессы 1 и 2. Учесть эти процессы представляется возможным, если объектом является чистый металл, например, алюминий. Анализ литературы показал, что учет всех вышеперечисленных процессов в рамках тепловой модели ИЛА был произведен только в приближении постоянства температуры плазмы [5]. Коэффициент плазменного экранирования в [5] был подобран таким образом, чтобы теоретически предсказанная глубина абляции совпадала (с погрешностью ~10 %) с глубиной абляции, полученной в эксперименте. Однако, экспериментальные данные свидетельствуют об изменении в широких пределах температуры плазмы и, следовательно, коэффициента экранировки. Таким образом, для улучшения модели [5] необходимо учесть неизотермичность плазменного облака, что позволит оценить значение коэффициента плазменного экранирования и избавиться от произвола в его выборе. Целью настоящей работы являлось развитие физико-математической модели, предложенной в [5], посредством включения в последнюю процессов возникновения и нагрева плазмы, экранирующей падающее излучение.

За основу модели взаимодействия лазерного излучения с веществом была принята модель из [5]. В рамках этой модели, эволюция температуры металла в процессе поглощения энергии лазерного излучения описывалась на основа-

нии уравнения баланса тепловой энергии. Для нахождения скорости абляции металла использовалось соотношение Герца-Кнудсена, в котором давление насыщенных паров определялось согласно уравнению Клапейрона-Клаузиуса. Учет фазового взрыва производился наиболее простым способом: слой металла считался удаленным, когда его температура достигала значения $T = 0.9T_c$. T_c – критическая температура металла.

Для учета плазменной экранировки падающего излучения использовалась модель, развитая в работах [1, 6]. В рамках этой модели оптическая толщина облака плазмы представляется в виде:

$$\Lambda = a\Delta x + bE_a(t),$$

где $a = \alpha_{plas}(T_{vap})$, $b = \frac{(\gamma - 1)}{k_b} \frac{\partial \alpha_{plas}}{\partial T} \Big|_{T_{vap}}$ – коэффициенты экранировки (постоянные при некоторой характерной температуре испарения T_{vap}), γ – эффективный показатель адиабаты, Δx – глубина абляции, $E_a(t)$ – доля энергии, поглощенной в плазменном облаке за время t :

$$E_a(t) = \int_0^t I_0(t') [1 - \exp(-\Lambda(t'))] dt'.$$

Коэффициент плазменной экранировки вычисляется по формуле [7]:

$$\alpha_{plas}(T_{vap}) = \frac{16\pi^2}{3\sqrt{3}} \frac{e^6 Z^2 k_b N T_{vap}}{h^4 c v^3} \exp\left(-\frac{I - hv}{k_b T_{vap}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{hv}{k_b T_{vap}}\right)\right],$$

где Z – заряд иона, e – заряд электрона, N – число частиц в единице объема, I – потенциал ионизации, h – постоянная Планка, v – частота фотонов.

Краевая задача решалась конечно-разностным методом с использованием неявной абсолютно-устойчивой схемы Кранка - Николсона. Шаг по времени составил 0.5 пс, по пространству 1 нм. На подготовительном этапе были рассчитаны таблицы параметров алюминия в зависимости от температуры. Таблица содержит параметры расчета.

Таблица

Параметры численного эксперимента

Плотность (ρ)	$2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Теплоемкость (C_p)	$940 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Окончание табл.

Коэффициент температуропроводности (a)	$8.87 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$
Скрытая теплота испарения (L)	$1.05 \frac{МДж}{кг}$
Масса атома алюминия (m)	$44.8 \cdot 10^{-27} кг$
Температура плавления (T_m)	933 К
Температура кипения (T_b)	2740К
Атмосферное давление (p_b)	$10^5 Па$
Постоянная Больцмана (k_b)	$1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$
Потенциал ионизации (I)	5.984 эВ
Энергия кванта ($h\nu$)	1.17 эВ
Коэффициент плазменной экранировки (α_{plas})	Уравнения (1–3)
Критическая температура (T_c)	6319 К [8], 6700 К [9], 7400К [9], 8000 К [9], 8860 К [9]

Поскольку в литературе нет общепринятого значения T_c алюминия, численный эксперимент был проведен при пяти значениях критических температур: $T_c = 6319К$, $T_c = 6700К$, $T_c = 7400К$, $T_c = 8000К$, $T_c = 8860К$ [8, 9].

На рисунке показаны полученные зависимости глубины абляции от плотности мощности лазерного излучения при различных значениях критической температуры. При плотностях мощности более $12 Дж/см^2$ глубина абляции для $T_c = 6319К$ более чем на порядок выше, чем при $T_c = 8860К$.

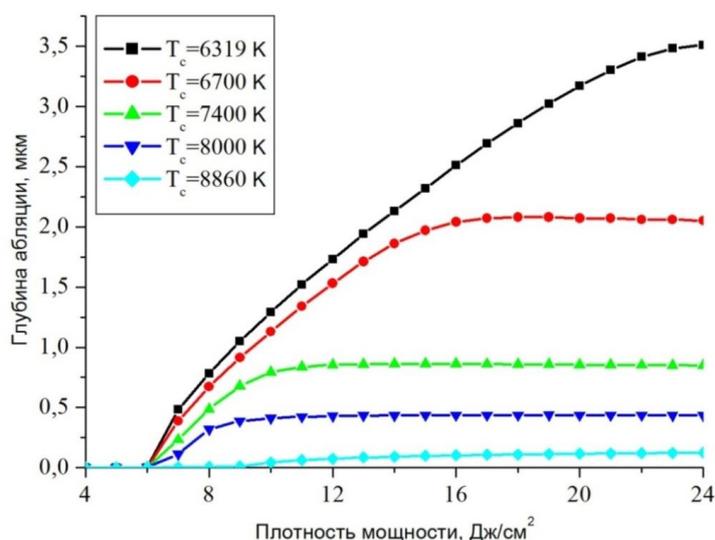


Рис. Зависимость глубины абляции от плотности мощности при различных значениях критической температуры

При всех значениях критической температуры, кроме $T_c = 6700\text{K}$, наблюдается характерный участок постоянства глубины абляции. Наличие такого участка обусловлено сильной зависимостью коэффициента плазменной экранировки от температуры. Сравнение с результатами экспериментальной работы [10] показало, что результаты моделирования наиболее близки к эксперименту в случае, когда при моделировании используется значение критической температуры $T_c = 8000\text{K}$. При вышеуказанном значении критической температуры расхождение экспериментальных и расчетных значений глубины абляции во всем интервале плотностей мощности не превосходит 20 %, что является удовлетворительным расчетным результатом.

Разработанная модель позволила провести математическое моделирование комплексного процесса импульсной лазерной абляции. Модель учитывает температурные зависимости свойств металла, наличие механизма фазового взрыва, а также возникновение и температурную динамику плазмы. Результаты моделирования ИЛА на основании предложенной модели качественно и количественно (при $T_c = 8000\text{K}$) согласуются с результатами экспериментов, при этом, отсутствует произвол в выборе коэффициента плазменного экранирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булгаков А., Булгакова Н. Тепловая модель импульсной лазерной абляции в условиях образования и нагрева плазмы, поглощающей излучение // Квантовая электроника. – 1999. – Vol. 27, № 2. – P. 154–158.
2. Peterlongo A., Miotello A., Kelly R. Laser-pulse sputtering of aluminum: Vaporisation, boiling, superheating, and gas-dynamic effects // Phys. Rev. E – Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. – 1995. – Vol. 74, № 25. – P. 5068–5071.
3. Gragossian A., Tavassoli S., Shokri B. Laser ablation of aluminum from normal evaporation to phase explosion // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105, № 10. – P. 0–7.
4. Bulushev E. et al. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser // Opt. Lasers Eng. Elsevier. – 2016. – Vol. 79. – P. 39–47.
5. Lutey A.H.A. An improved model for nanosecond pulsed laser ablation of metals // J. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 114, № 8. – P. 0–10.
6. Bulgakova N.M., Bulgakov A. V. Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion // Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. – 2001. – Vol. 73, № 2. – P. 199–208.
7. Zel'dovich Y.B. et al. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena, Vol. 1 // J. Appl. Mech. – 1967. – Vol. 34, № 4. – P. 1055.
8. Mazzi A., Gorrini F., Miotello A. Liquid nanodroplet formation through phase explosion mechanism in laser-irradiated metal targets // Phys. Rev. E – Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys. – 2015. – Vol. 92, № 3.
9. Morel V., Bultel A., Chéron B.G. The critical temperature of aluminum // Int. J. Thermophys. – 2009. – Vol. 30, № 6. – P. 1853–1863.
10. Stafe M. et al. Experimental Investigation of the Nanosecond Laser Ablation Rate of Aluminum // Rom. Reports Phys. – 2008. – Vol. 60, № 3. – P. 789–796.

© М. А. Гришин, Е. Д. Булушев, В. П. Бессмельцев, 2017

РЕЖИМ РЕЗОНАНСА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В ОПТИЧЕСКОМ ДИСКОВОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Анатолий Семенович Задорин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой радиоэлектроники и защиты информации, тел. (913)820-65-43, e-mail: Anatoly.Zadorin@rzi.tusur.ru

Анна Андреевна Лукина

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, аспирант кафедры радиоэлектроники и защиты информации, инженер АО НПФ «Микран», тел. (913)828-67-31, e-mail: anna-angel1987@mail.ru

Отмечается, что наилучшие технические характеристики микроволновых оптоэлектронных автогенераторов (ОЭАГ) достигаются в схемах с использованием высокодобротных оптических микрорезонаторов (ОМР), работающих в режиме резонанса бегущей волны (РБВ). Рассмотрена возможность использования для этой цели дисковых ОМР, возбуждаемых фундаментальными модами шепчущей галереи (МШГ). Исследованы многоэлементные устройства связи (УС) для таких резонаторов построенные на основе планарных оптических волноводов (ПОВ), расположенных над поверхностью дискового резонатора, в области внешней каустики МШГ. Предложены модели данного устройства. Приведены соответствующие расчетные данные.

Ключевые слова: оптоэлектронный автогенератор, оптический микрорезонатор, мода шепчущей галереи, резонанс бегущей волны.

RESONANCE MODE OF THE TRAVELING WAVE IN THE OPTICAL DISK MICRORESONATOR OF THE OPTOELECTRONIC OSCILLATOR

Anatoly S. Zadorin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Russia, Tomsk, 40 Lenina Prospect, D. Sc., Head of the Department of Radioelectronics and Data Protection, tel. (913)820-65-43, e-mail: Anatoly.Zadorin@rzi.tusur.ru

Anna A. Lukina

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Russia, Tomsk, 40 Lenina Prospect, graduate student of the Department of Radioelectronics and Data Protection, tel. (913)828-67-31, e-mail: anna-angel1987@mail.ru

It is noted that the best technical characteristics of microwave optoelectronic oscillators (OEAG) are reached in schemes employing the high-Q optical microresonators (OMR) working in the traveling wave mode (TWM). The possibility of use for this purpose of the disk OMR excited by the fundamental whispering gallery mode (WGM) has been considered. The multielement coupling devices (CD) for such resonators have been investigated. They are constructed on the basis of the planar optical wave guides (POWG) located over the surface of the disk resonator in the area of an external caustic of WGM. The models of this device have been proposed. The corresponding calculations have been provided.

Key words: optoelectronic microwave oscillator, “whispering gallery” wave, traveling wave, microresonator.

Известно, что чувствительность, скорость передачи информации, габариты и энергопотребление связных, радиолокационных и измерительных радиотехнических систем во многом зависят от уровня спектральной чистоты и частотной стабильности сигналов, формируемых задающими соответствующими системными автогенераторами (АГ). Важным количественным показателем такого рода является уровень фазовых шумов АГ, описываемый спектральной плотностью мощности его излучения $L(f)$ в одной боковой полосе при заданной отстройке f от несущей частоты f_0 в частотном интервале 1 Гц. [1]. Для автогенераторов, построенных на основе затягивания частоты формируемого сигнала высокочастотным резонатором в активной петле обратной связи (ОС), распространенным приближением зависимости $L(f)$ является степенная аппроксимация Лисона [2],

$$L(f) = 10 \log(GFkT / 2P ((f_0 / 2Q_n)^2 \cdot (f_a / f^3) + (f_0 / (2Q_n))^2 / (1 / f^2) + (f_a / f) + 1)), \quad (1)$$

где G, F – коэффициенты усиления и шума активного элемента АГ, P – номинальная мощность, подводимая к резонатору, Q_n – нагруженная добротность резонатора, f_a – параметр, характеризующий границу фликкер шумов активного элемента АГ, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Формула (1) указывает на определяющее воздействие параметра Q_n на уровень фазовых шумов АГ и хорошо соответствует экспериментальным данным для $L(f)$, классических схем АГ, в т.ч. оптоэлектронных (ОЭАГ), в которых за счет промежуточных преобразований энергии СВЧ колебаний в энергию световой волны реализуется возможность использования в качестве резонансной системы АГ высокочастотных оптических резонаторов [3, 4]. Схема такого устройства показана на рис. 1.

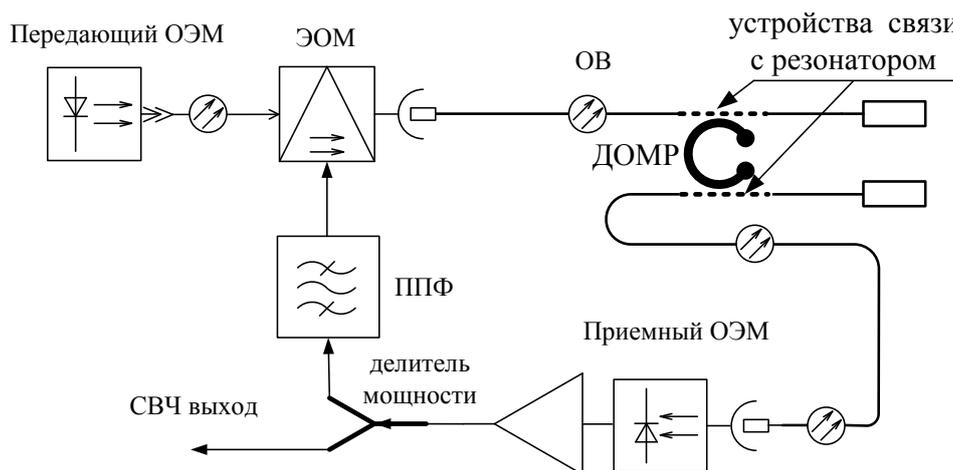


Рис. 1. Структурная схема ОЭГ на основе МР-МШГ:

передающий ОЭМ – лазерный диод в составе передающего оптоэлектронного модуля; ОВ – одномодовое оптическое волокно; ЭОМ – электрооптический модулятор; приемный ОЭМ – фотодиод, в составе приемного оптоэлектронного модуля

Наиболее высокие значения ненагруженной добротности Q_0 таких устройств в широком температурном диапазоне достигаются в оптических микрорезонаторах (ОМР), возбуждаемых гибридными модами EH_{mnk} , HE_{mnk} с большим азимутальным m но низкими радиальным и аксиальным индексами n и $k \sim 1$. В литературе данный тип фундаментальных мод ОМР называется модами «шепчущей галереи» (МШГ) [5]. Для любого материала резонатора величина собственной добротности ОМР Q_0 зависит также и от коэффициента связи β резонатора со структурой, соединяющей его с трактом АГ и, в общем случае, снижается с увеличением β [6]. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что указанные потери добротности Q_0 можно снизить за счет использования многоэлементных устройств связи ОЭГ с ОМР [6].

Еще одним важным показателем любого АГ является коэффициент использования мощности η , равный отношению мощностей СВЧ сигнала в нагрузке АГ и на выходе его активного элемента [7]. Величина η становится определяющей при оценке эффективности различных схемотехнических вариантов объединения усилителя, резонатора и УС в петле обратной связи (ОС) ОЭАГ, обеспечивающих при равных $L(f)$ одинаковый баланс усиления активного элемента и потерь сигнала на отражение от входа резонатора, потери на стабилизацию (тепловые потери), а также отбор мощности P_n в согласованную нагрузку [6,7]. Наилучшие значения этого показателя достигаются в схемах АГ, использующих ДДР в режиме резонанса бегущей волны (РБВ). Данный режим характеризуется минимальными отражениями сигнала от узлов ОЭАГ при его циркуляции в контуре ОС и обеспечивается направленным возбуждением резонатора, путем соответствующего подбора и оптимизации устройств связи (УС) с ОМР.

Целью настоящей работы является исследование возможности реализации режима резонанса бегущей волны в оптоэлектронном автогенераторе, с дисковым оптическим микрорезонатором (ДОМР), используемым в качестве резонансной системы.

Рассмотрим оптический дисковый диэлектрический микрорезонатор радиуса R_0 , высотой диска h и диэлектрической проницаемостью материала ϵ_r , входящий в состав ОЭАГ и возбуждаемый азимутальными модами высокого порядка. Форм-фактор (формат) $\Phi = R_0/h$ такого ДОМР определяется конструкцией соответствующих устройств связи с резонатором (УСР). В литературе наиболее подробно рассмотрены УСР в виде оптических волноводных структур, расположенных вблизи экваториальной плоскости ОМР [5, 8]. Функциональность этих устройств основана на принципах локализации и синхронизма, ставящих в соответствие каждой волноводной моде резонатора расстояние, на котором тангенциальная к поверхности ОМР скорость волны достигает скорости света в УСР. Именно в этой области обеспечивается возможность ее туннелирования в волноводную структуру устройства связи [5]. Трудности в практической реализации указанных принципов в оптическом диапазоне связаны с малой концентрацией поля МШГ вблизи границ резонатора, а также относительно небольшого числа полуволн N^* бегущей волны в УСР, способных эф-

фективно связываться МШГ ДОМР и которые можно рассматривать как отдельные элементы УСР.

Большая гибкость в реализации указанных принципов достигается в дисковых ОМР с большим значением $\Phi = R/h$. В данном случае поле возбуждаемой МШГ оказывается слабо локализованным, аналогично полю в тонких волноводных пленках с малой нормированной частотой V [9]. Это обстоятельство дает возможность располагать УСР над поверхностью дискового резонатора, в области внешней каустики МШГ как показано на рис. 2. Здесь показан результат моделирования в программном пакете электромагнитного моделирования СВЧ устройств CST Studio напряженности электрического поля рабочей моды $HE_{15,1,1}$ в модели кварцевого ДОМР с размерами $R = 5$ мкм, $h = 0,5$ мкм, работающего на частоте $\nu = 121,9$ ТГц ($\lambda_0 = 2,5$ мкм).

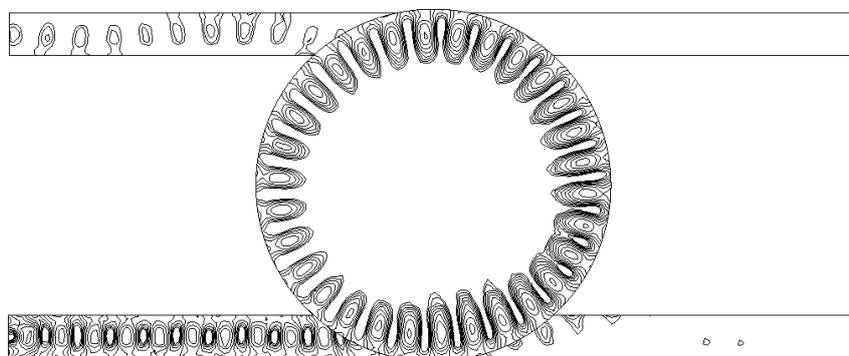


Рис. 2. Структура моды $HE_{15,1,1}$ кварцевого ДОМР, возбуждаемой на частоте $\nu = 121,9$ ТГц и УСР в виде оптических планарных волноводов

Из представленных данных видно, что область локализации рассматриваемой фундаментальной МШГ имеет кольцевую форму. Ограничивающие ее поверхности радиуса L_{out} и L_{in} являются внешней и внутренней каустиками МШГ [6]. Для фундаментальных мод ДДР с высоким азимутальным индексом m $L_{in} \rightarrow R_0$, однако, в данном случае, при $m = 15$, согласно рис. 2, поле моды локализовано слабо. Это дает возможность расположить устройства связи с $HE_{15,1,1}$ именно над поверхностью резонатора в области $(L_{out} - L_{in})$. При этом, как указывалось выше, основным требованием к данным устройствам является направленность возбуждения и съема энергии моды в ДОМР, обеспечивающая режим бегущей волны в контуре ОС АГ. Кроме этого, для снижения потерь добротности ДДР Q_0 за счет уровня связи β , УС желательно строить на основе многоэлементных структур.

В общем случае указанным требованиям может удовлетворить оптический направленный ответитель (ОНО) с малым отражением мод от участка распределенной связи с ДОМР. Пригодность такого устройства в качестве УС зависит от выполнения двух условий. Первое из них, условие синхронизма, требует со-

гласования фазовых скоростей МШГ и моды в линии УСР [5]. Во-вторых, эффективность энергообмена МШГ с модой УСР определяется скалярным произведением их векторов поляризации ($e_{wg} \cdot e_r$), [5]. Конструкция устройств связи с резонатором, очевидно, должна обеспечивать максимум указанной свертки, т. е. коллинеарность векторов e_{wg} и e_r .

Рассмотрим требование согласования фазовых скоростей мод УСР и ДОМР при использовании в качестве устройств связи планарных оптических волноводов (ПОВ).

Как известно, концентрация электромагнитного поля в рассматриваемых ПОВ зависит от нормированной частоты волновода V [9]. В рассматриваемой конструкции УСР параметр V выбран малым, за счет малой толщины пленки ПОВ в области ДОМР меньшей, чем длина волны λ_0 . В данных условиях локализация поля в волноводе слабая, следовательно, такая структура становится излучающей и, если ее расположить в области ($L_{out}-L_{in}$) над поверхностью резонатора, способной к энергообмену с МШГ.

Рассмотрим подробнее возможности реализации в указанной возбуждающей условия синхронизма. С этой целью обозначим через L_k длину сегмента дискового резонатора с радиусом R_0 , вдоль которого распространяется возбуждаемая МШГ, а через L_r длину хорды, отсекающей указанный сегмент от ДДР, вдоль которого распространяется мода УСР. Как отмечалось выше, распределение поля МШГ в плоскости резонатора по азимутальному углу $\sim \exp(-im\varphi)$. Соответствующее азимутальное волновое число k_{wg} моды можно установить, учитывая, что испытываемый модой на одном обороте вокруг оси резонатора на расстоянии R фазовый сдвиг составит $2\pi mR$. Отсюда следует, что $2\pi R \cdot k_{wg} = 2\pi m$, и $k_{wg} = m/R$. На этом основании условие фазового синхронизма мод ЭС и МШГ можно записать так [5]:

$$2\pi N_{эф} / \lambda_0 = m / R, \quad (2)$$

где $N_{эф}$ – эффективный показатель преломления волноводной структуры УСР, λ_0 – длина световой волны в свободном пространстве.

Из последней формулы следует, что радиальное расстояние R^* , на котором достигается синхронизм рассматриваемых волновых процессов, равно,

$$R^* = \lambda_0 m / 2\pi N_{эф}. \quad (3)$$

Строгое выполнение условий (2,3) требуется не всегда. Чаще всего в качестве числового критерия приближения к (3) используется относительный фазовый сдвиг ψ волн, взаимодействующих на длине L_r УСР. Выразим длину отрезка L_r волновода, замыкающего радиальный сектор ДДР с центральным углом φ , как

$$L_r = 2R \cdot \sin(\varphi / 2). \quad (4)$$

В результате получим выражение для зависимости фазового сдвига $\psi(\varphi)$,

(5)

Рассматривая далее число полуволен N^* бегущей волны в УСР, укладываемых на отрезке L_r^* ,

$$N^* = 2L_r^* / \lambda, \quad (6)$$

и переносящих энергию, которой данная мода обменивается с МШГ, как отдельные элементы УС, схему на рис. 2 можно рассматривать как распределенное многоэлементное устройство связи с ДДР. Из приведенных формул видно, что большее число эффективных возбуждающих центров N^* в УСР формируется, если $R \rightarrow R^*$. Эти выводы хорошо соответствуют полученным нами результатам расчетов поля ДДР в пакете CST Studio.

Изложенные результаты позволяют моделировать и рассчитывать устройства связи высокочастотных оптических дисковых микрорезонаторов работающих в режиме бегущих волн фундаментальных мод высокого азимутального порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities // IEEE Standard 1139-2008. – New York, 2009.
2. Leeson D. B. A simple model of the feedback oscillator noise spectrum// Proceedings of the IEEE – 1966. – Vol. 54. – P. 329–330.
3. X. Steve Yao and Lute Maleki. Optoelectronic microwave oscillator // Journal of the Optical Society of America B – August 1996. – Vol. 13, No. 8. – P. 1725–1735.
4. Paul Devgan. A Review of Optoelectronic Oscillators for High Speed Signal Processing Applications// ISRN Electronics– 2013 – Vol. 13. – 16 p.
5. Городецкий М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью : монография. – М. : Физматлит, 2011. – 415 с.
6. Царапкин Д. П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов : дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004.
7. Егоров В. Н. Микроволновые диэлектрические резонаторы в физических измерениях : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Иркутск, 2013.
8. Fei Lou, Lars Thylen, and Lech Wosinski. Experimental demonstration of silicon-based metallic whispering gallery mode disk resonators and their thermotuning // The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) – 2014.
9. Волноводная оптоэлектроника / под ред. Т. Тамир. – Мир, 1991. – 575 с.
10. Задорин А. С., Лукина А. А. Исследование моделей подавления паразитных мод оптоэлектронного СВЧ-автогенератора на основе инжекционной и многоконтурной схем // Доклады ТУСУРа. – 2016.– № 4 (19). – С. 81–84.

© А. С. Задорин, А. А. Лукина, 2017

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОГО САМОЛЕТА ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ МОНТАЖА СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Евгений Александрович Панков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры наносистем и оптотехники, тел. (903)076-49-33, e-mail: emailpankov@gmail.com

Татьяна Вячеславовна Ларина

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

Елена Юрьевна Кутенкова

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

В статье рассмотрен процесс повышения технологичности разработки транспортного самолета за счет внедрения электронного моделирования.

Ключевые слова: повышение технологичности, электронное моделирование.

PROCESSABILITY IMPROVEMENT OF TRANSPORT AIRCRAFT CONSTRUCTION

Evgeny A. Pankov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of Nanosystems and Optical Devices, tel. (383)361-07-45, e-mail: emailpankov@gmail.com

Tatiana V. Larina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of the Department of Metrology and Technologies of Optical Production, tel. (903)076-49-33, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Elena Yu. Kutenkova

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

The process of processability improvement of transport aircraft development due to the introduction of electronic simulation is described.

Key words: processability improvement, electronic simulation.

Задача обеспечения технологичности продукции является одной из важнейших и сложнейших, из тех которые приходится решать в процессе изготовления продукции [1]. В настоящее время, на производстве, стараются макси-

мально перейти к электронному документообороту и проектированию с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР), в том числе для того, чтобы обеспечивать отработку на технологичность.

Внедрение электронного моделирования позволит перейти на принципиально новый уровень проектирования, улучшить качество и повысить скорость разработок изделий. Вариантом применения информационных технологий является полный электронный макет изделия, который представляет собой взаимосвязанную совокупность трехмерных моделей деталей, узлов, агрегатов и систем. Трехмерное моделирование за счет возможности углубленной проработки проекта в целом открывает перспективу создания высококачественной продукции в сжатые сроки.

За счет использования электронного моделирования разработан монтаж системы воздушного охлаждения (СВО) в контейнере РЛС (рис. 1).

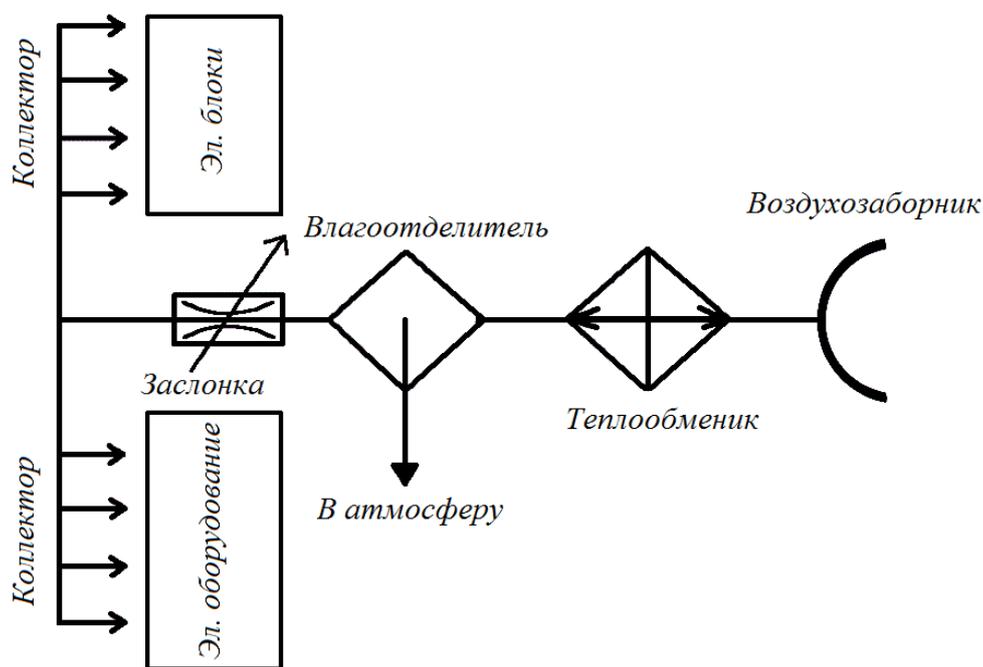


Рис. 1. Схема системы воздушного охлаждения

Использование электронного моделирования (ЭМ) позволяет значительным образом уменьшить затраты на опытно-конструкторскую разработку, за счет исключения этапа плазовой увязки; повысить скорость разработки и внедрения новых компонентов; на стадии моделирования быстро вносить необходимые изменения; на любой стадии видеть всю сборку в целом; произвести мгновенный расчет массы, центра тяжести, металлоемкости и др.; упростить газодинамический расчет в специальных программах; произвести прочностной расчет методом конечных элементов; и в конечном итоге уменьшить затраты на производство.

Работа подразумевает выполнение полноценной электронной сборки системы воздушного охлаждения электроники в контейнере РЛС, т. е. создание электронных моделей всей обстановки (теплообменника, трубопроводов, мелких деталей).

Электронная модель – информация в электронном виде (созданная и поддерживаемая средствами САПР), содержащая трехмерное геометрическое описание и другие данные, необходимые для изготовления и контроля изделия (детали, сборочной единицы). Электронная модель сборки – ЭМС, содержащая ЭМ входящих в ее состав сборочных единиц, деталей, покупных и стандартных изделий, составляющих конструкцию сборочной единицы, и другие данные, необходимые для сборки и контроля. Модернизация СВО выполняется в связи с планирующимся запуском на заводе-изготовителе перспективного контейнера радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

У опытного образца была изменена внутренняя компоновка, что потребовало переконструирования системы воздушного охлаждения. Электронный макет изделия используется для конструкторской проработки, для различных видов анализа, для технологической подготовки производства, и для самого производства. Это исключает всевозможные ошибки и неточности на любых стадиях жизненного цикла изделия и значительно повышает качество продукции.

В настоящее время, на производстве, стараются максимально перейти к электронному документообороту и проектированию с использованием САПР, что позволяет полностью отказаться от плазовой увязки сложных конструкций. Внедрение ЭМ позволит повысить качество и скорость работы. При серийном выпуске самолета, простой производства из-за неувязки деталей, влечет материальные убытки, срывы планов и невыполнения госзаказа.

Ранее, по результатам эксплуатации опытных контейнеров схожей конструкции, прошедших опытную эксплуатацию у заказчика, учитывая новые технологические и технические требования, а также новую элементную базу радио электронного оборудования и как следствие изменение начальной компоновки контейнера, встал вопрос о разработке новой СВО. Исполнители имеют полный доступ ко всем необходимым инструментам и документации. Проводилось множество опросов рабочих, сборщиков, технологов, что позволило выявить минусы конструкции и внести ясность в направление технологического усовершенствования.

В настоящее время существует два способа конструкторской разработки СВО: плазовая отработка и метод электронного моделирования.

Плазовая отработка подразумевает выполнение 2D чертежей на бумажном носителе или в компьютерной среде (AutoCAD, Компас 3D и т.п.). После выполнения чертежей, они отправляются в производство и там начинают выполнять опытные образцы изделий и сборок, одновременно находя все неувязки и возможные неточности. После этого, все замечания собираются и отправляются обратно, для повторной разработки 2D чертежей, с учетом всех замечаний и неувязок.

Метод электронного моделирования – электронный макет изделия становится эталоном хранения геометрической информации об изделии и используется как средство пространственной увязки сопрягаемых элементов конструкции. Формирование электронных макетов деталей и сборочных единиц осуществляется конструкторами с использованием объектно-ориентированных систем и баз данных типовых и стандартизованных элементов конструкции (подсечки, рифты, отверстия, вырезы, крепежные элементы и т. д.). В создании электронного макета изделия участвуют технологи, которые в режиме группового использования данных проводят отработку технологичности изделия и дают рекомендации по изменению его конструкции.

Для модернизации СВО использовался метод электронного моделирования. Этот метод использует два основных инструмента:

– TeamCenter Engineering (TcEng): Система типа PDM (Product Data Management), предназначенная для управления проектными данными и связанными с ними процессами, служащая единой средой управления данными об изделии в электронном виде (рис. 2).

– Siemens NX 8.1 – это интерактивная система, предназначенная для автоматизированного проектирования, изготовления и расчетов изделий. NX является системой трехмерного моделирования, в которой инженер может создавать изделия любой степени сложности.

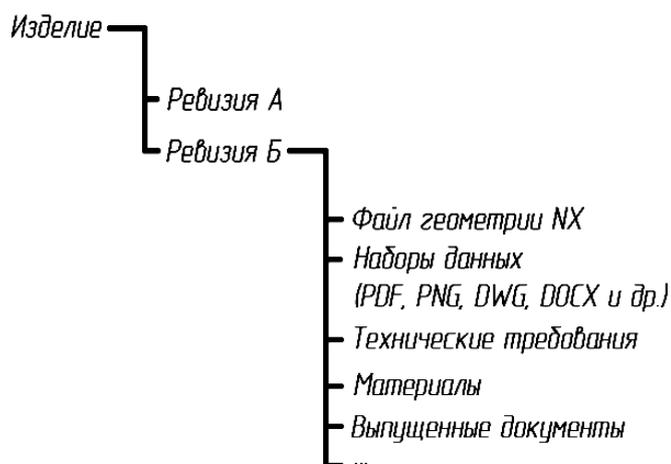


Рис. 2. Схема изделия в системе Team Center

В конструкцию воздушного охлаждения было решено ввести специальный испарительный теплообменник. Внутри корпуса находится кассета со множеством прокладок из специальной бумаги с отверстиями. Перед вылетом теплообменник наполняют водой, чтобы бумага набрала влагу, после чего жидкость сливается. При полете, через воздухозаборник, из внешней среды воздух попадает внутрь теплообменника и, проходя через множество слоев влажной бумаги охлаждается, далее идет через влагоотделитель по трубопроводам непосредственно к электрооборудованию. Одного «заряда» теплообменника хватает на

выполнение одного полета. Главный принцип разработки электронного макета конструкции состоит в том, что подлинником документации является электронный макет проектируемого изделия на всех стадиях его разработки и передачи в серийное производство.

В качестве отчетов по мере необходимости, генерируется упрощенный чертеж, на котором размещают один из видов ЭМ, наиболее подходящий для визуального представления и основную надпись. В таком случае «рабочим инструментом» служит не спецификация изделия, а его структура. Спецификация же, как и чертеж, является отчетной документацией только по конкретной конфигурации. При этом структура изделия содержит в себе все возможные конфигурации и варианты исполнения, модификации этого изделия. Именно со структурой изделия на всех стадиях его создания должны работать и конструктор, и технолог. Соответственно, изменения проводятся только на электронном макете, а чертежи, если они необходимы, просто распечатываются заново.

Трубопроводы используются для подвода охлажденного воздуха к потребителям. Ранее для изготовления подобных труб использовались шаблоны и ручной труд, что отнимало много ручного времени и имело низкую точность. В настоящее время в качестве эталона при производстве используется электронная модель. Разработка моделей труб ведется на основании сборки, созданной отделом электронной компоновки. В процессе конструирования, места закрепления электронных компонентов могут изменяться, соответственно меняются и трубопроводы охлаждения. Все изменения отображаются в общей сборке. Была разработана ЭМ СВО (рис. 3) с использованием ЭМ каркаса контейнера для увязки деталей. Возможное увеличение затрат на разработку ЭМ, относительно 2D чертежей, полностью компенсируется отсутствием необходимости плазовой увязки деталей и сборок на заводе-изготовителе.



Рис. 3. Итоговый результат модернизации СВО

Большинство рутинных операций будут выполняться быстрее, уменьшатся сроки выполнения работ, может быть изменен порядок выдачи заданий и согласований, а высвободившиеся сотрудники будут задействованы в других работах. Поменяется процедура обмена данными между специалистами – все изменения будут доступны в электронном виде для каждого участника проекта в режиме реального времени. При внедрении трехмерного проектирования от-

падет необходимость в части согласований. В конкретном случае, за счет внедрения электронного моделирования повысится как общая технологичность транспортного самолета, так и трудоемкость работы на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повышение технологичности конструкции транспортного самолета // Е. А. Панков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 100–104.

2. Петров П. В., Кутенкова Е. Ю. Отработка чертежей деталей на технологичность : учеб.-метод. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 151 с.

© Е. А. Панков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, 2017

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНО-ВОЛОКОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Александр Викторович Бритвин

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

Юрий Дмитриевич Коломников

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, кандидат физико-математических наук, инженер-технолог, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Никита Сергеевич Никитенко

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Виктор Федорович Плюснин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор химических наук, зав. лабораторией, тел. (383)333-23-85, e-mail: plusnin@kinetics.nsc.ru

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15б, доктор технических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru; ЗАО «СКБ», 630058, Новосибирск, пр. Плотинная, 8, директор, тел. (383)306-28-20, e-mail: skbpoll@mail.ru

Андрей Борисович Поллер

ЗАО «СКБ», 630058, Новосибирск, пр. Плотинная, 8, зам. директора, тел. (383)306-28-20, e-mail: skbpoll@mail.ru

Юрий Иванович Щетинин

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат технических наук, доцент, тел. (383)346-08-46, e-mail: schetinin@tiger.cs.nstu.ru

Приводятся некоторые характеристики полимерных планарных люминесцентных антенн. Показано влияние перепоглощения люминофора на спектр выходного сигнала.

Ключевые слова: планарно-волоконная антенна, система мониторинга.

EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF A PLANAR-FIBER CONVERTERS OF UV SIGNALS FOR THE LASER MONITORING SYSTEMS OF GROUND OBJECTS

Alexander V. Britvin

Institute of Laser Physic SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 15b Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D., researcher, tel. (383)330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Yuri D. Kolomnikov

Institute of Laser Physic SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 156 Akademik Lavrentiev Prospect, Ph. D, process engineer, tel. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Nikita S. Nikitenko

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx Prospect, graduate student, tel. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Victor F. Plyusnin

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya St., D. Sc., Head of Laboratory, tel. (383)333-23-85, e-mail: plyusnin@kinetics.nsc.ru

Boris V. Poller

Institute of Laser Physic SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 156 Akademik Lavrentiev Prospect, D. Sc., Head of Laboratory, tel. (383)330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru; ZAO «SKB», 630058, Russia, Novosibirsk, 8 Plotinnaya St., Director, tel. (383)306-28-20, e-mail: skbpol@mail.ru

Andrei B. Poller

ZAO «SKB», 630058, Russia, Novosibirsk, 8 Plotinnaya St., Deputy Director, tel. (383)306-28-20, e-mail: skbpol@mail.ru

Yuri I. Shchetinin

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, 20 K. Marx Prospect, Ph. D., associate Professor, tel. (383)346-08-46, e-mail: schetinin@tiger.cs.nstu.ru

Some characteristics of polymeric fluorescent planar antennas are presented. The effect of re-absorption phosphor on the spectrum of the output signal is shown.

Key words: planar fiber antenna, monitoring system.

Создание лазерных систем мониторинга наземных объектов с использованием ультрафиолетовых сигналов требует компактных помехоустойчивых приемных систем, которые могут располагаться в труднодоступных местах, размещаются на автономных воздушных аппаратах [1, 2]. Для этих целей нами исследуются свойства и экспериментальные характеристики преобразования ультрафиолетовых (УФ) сигналов в тонких полимерных пленках, в материал которых добавляются люминофоры, а излучение люминесценции (выходной сигнал) канализируется за счет эффекта полного внутреннего отражения к торцам пленки, где поступает на вход волоконных световодов [3–5].

Характеристики выходного сигнала зависят от ряда факторов: от квантового выхода люминофора; от показателя преломления материала волновода; типа и концентрации применяемого люминофора; от спектральных характеристик пропускания и чистоты полимера; качества полировки поверхностей; формы волноводов и их размеров; потерь света в материале планарного волновода (ПВ).

Мощность оптического сигнала с элемента торца ПВ на приемный фотодиод $P_{\phi\delta}$ описывается выражением:

$$P_{\phi\delta} = \int E_{ex}(\lambda) \cdot T_{\phi}(\lambda) \cdot \eta \cdot (1 - 10^{-C \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \Delta d}) \int_{S_{ВПС}} J_{ВПС} ds d\lambda,$$

где E_{ex} – энергетическая облученность волновода; $S_{ВПС}$ – площадь планарного волновода; C – концентрация люминофора; ε – коэффициент экстинкции люминофора; η – квантовая эффективность люминофора; Δd – толщина планарного волновода; $J_{ВПС}$ – передаточная характеристика волновода от облученного элемента до фотоприемника; $T_{\phi}(\lambda)$ – пропускание фильтра.

Передаточная характеристика определяется коэффициентом сбора (увеличения концентрации) фотонов на выходе ПВ пропорционально отношению площади ПВ- A_{np} к площади торцов – T_{np} .

В ПВ имеют место следующие потери: френелевское отражение от поверхности; поглощение падающего излучения и излучения люминесценции материалом волновода; поглощение излучения люминесценции люминофором за счет перекрытия спектров поглощения и люминесценции; потери при сборе излучения люминесценции волноводом.

Критический угол скольжения внутри волновода $\theta_c = \arccos(n_o/n_e)$, где n_e и n_o – показатели преломления материалов волновода и оболочки. Оболочка необходима для защиты ПВ от механических повреждений и внешних факторов, приводящих к потерям в волноводе (например, конденсации влаги на его поверхности). При увеличении θ_c эффективность сбора излучения люминесценции волноводом увеличивается, однако при этом ухудшаются временные характеристики и возникают потери при выходе излучения люминесценции из ПВ в последующие устройства. Потери невелики, если $\theta_c < 90^\circ - \arccos(n_{ny}/n_v)$, при $n_{ny} < n_e$, или $\theta_c < \arctg(n_{ny}/n_e)$, при $n_{ny} > n_e$, где n_{ny} – показатель преломления последующего устройства, n_e – показатель преломления волновода. В противном случае, часть излучения люминесценции (скользящие моды волновода) отражается от поверхности приемного устройства.

Поглощение в современных чистых оптических полимерах может быть менее 0,1 дБ/м, а размеры ПВ ограничены несколькими сантиметрами, поэтому потери на поглощение материалами волновода и оболочки могут быть незначительными при соответствующем выборе материалов.

Однако могут быть существенны потери, связанные с поглощением излучения люминесценции самим люминофором за счет перекрытия его спектров поглощения и люминесценции.

Расчеты показывают, что наибольшее поглощение люминофором излучения люминесценции испытывает на первых сантиметрах пути в ПВ. Потери сильно зависят от степени перекрытия спектров поглощения и люминесценции люминофора и могут достигать 10 дБ при $l = 1$ м. Поэтому для построения ПВ с большой площадью целесообразно выбирать люминофор с наименьшим перекрытием спектров поглощения и люминесценции.

Для оптимизации оптических характеристик полимерных планарных волноводов исследовались экспериментальные образцы пленок различной толщины от 50 до 500 мкм с добавлением различных люминофоров и чистых пленок без люминофоров для оценки уровней собственной люминесценции полимеров. Исследования проводились в соответствии с развиваемой аналитической моде-

люю переизлучения фотонов параллельными нанослями в полимере содержащими молекулы люминофоров. Для оценки эффективности люминофоров исследовалась их кинетика в полимерных матрицах.

Образцы облучались п/п излучателем с длиной волны 385 нм и интенсивностью в пятне около $0,8 \text{ Вт/м}^2$. Эксперименты с образцами волноводов без люминофоров показали, что паразитное боковое излучение в волноводе имеет сравнительно малую величину и быстро затухает.

На Рис.1 представлены спектральные распределения мощности принимаемого сигнала на торцах планарных приемников с люминофором Родамин 6g. При нормализации спектров выходного сигнала во верхней границе спектра мы наблюдаем значительное изменение формы спектра для ПВ с люминофором Родамин 6g. Данный эффект вызван значительным перекрытием спектров поглощения и люминесценции Родамин 6g.

Таким образом, для увеличения эффективной протяженности планарного приемника необходим подбор люминофора с минимальным перекрытием спектра поглощения и люминесценции.

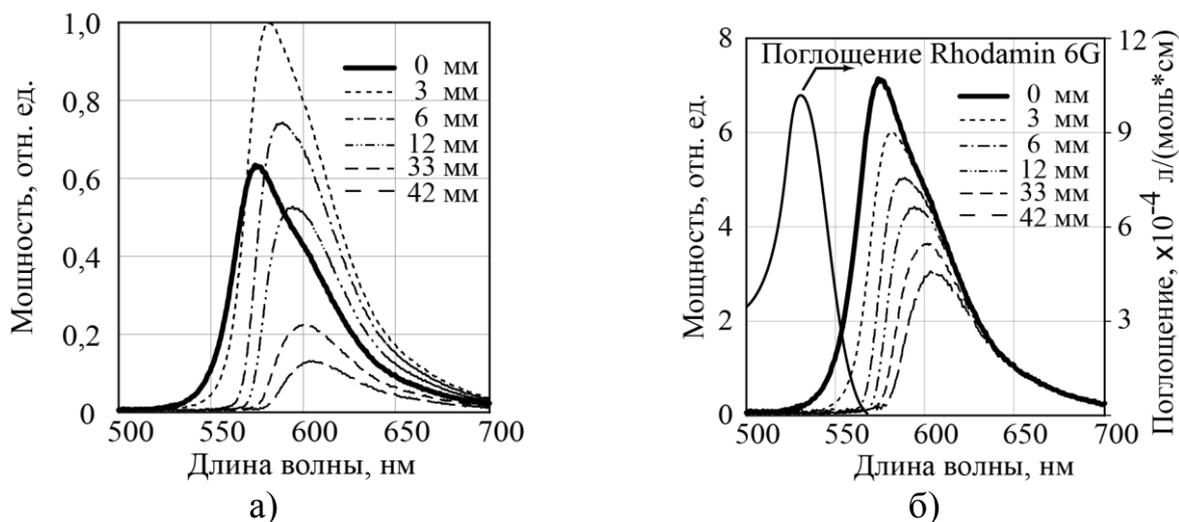


Рис. 1. Спектральное распределение мощности принимаемого сигнала с торца ПВ с люминофором Родамин 6g:

а) нормированный на максимум; б) нормированный по верхней границе спектра

Эффективность сбора фотонов зависит от длины поперечного пути фотонов, который тем больше, чем толще пленка. При применении зеркального отражающего слоя на внутренней стороне пленки (на подложке) длина пути падающего излучения увеличивается в два раза. В связи с нелинейным поглощением излучения в среде эффективность применения зеркальной поверхности уменьшается в зависимости от толщины волновода.

Расчет показывает, что зеркальное покрытие боковой поверхности повышает уровень поглощенной мощности для тонких пленок (менее 100 мкм) более чем на 50 %, однако для более толстых пленок (толщина более 300 мкм) при-

менение зеркальной поверхности малоэффективно так как к зеркальному слою подходит незначительная часть падающего излучения.

Анализ теоретических кривых показывает эффективность применения зеркальной поверхности на дальнем торце волновода более чем в 1,5 раза для волновода длиной менее 30 мм и малоэффективно при длине волновода более 70 мм.

Основные выводы:

1. Теоретико-экспериментальные исследования характеристик УФ люминофоров в пленках толщиной 100–350 мкм из поливинилового спирта, полиметилметакрилата показали, что наблюдается низкий квантовый выход, а быстрая кинетика свидетельствуют о том, что для молекул люминофоров реализуются большие константы скорости без излучательных процессов.

2. Исследования показывают, что наибольшее поглощение люминофором излучение люминесценции испытывает на первых сантиметрах пути в ПВ. Потери сильно зависят от степени перекрытия спектров поглощения и люминесценции люминофора и могут достигать 10 дБ при $l = 1$ м.

3. Использование зеркальных слоев на ПВ может существенно повысить эффективность сбора рассеянных фотонов за счет увеличения вероятности переизлучения фотонов люминофором на трассе распространения. Эффективность выше для пленок толщиной менее 300 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Структура и функциональные возможности лазерной информационно-сенсорной системы для дистанционного контроля объектов в труднодоступных зонах / А. В. Бритвин, Б. В. Поллер, А. Б. Поллер, Ю. И. Щетинин // Радиолокация, навигация, связь : сб. докл. 19-й Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 16–18 апр. 2013 г. – Воронеж : САКВОЕЕ, 2013. – Т. 1. – С. 178–184.

2. Вопросы построения и результаты экспериментальных исследований средств лазерно-радиоволновой наземно-космической связи и мониторинга / А. В. Бритвин, Г. С. Глушков, Н. С. Никитенко, А. В. Поважаев, Б. В. Поллер, А. Б. Поллер, Ю. И. Щетинин // III всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» г. Красноярск, 22–23 сентября, 2016.

3. Поллер Б. В., Коломников Ю. Д., Трушенко Д. Е. Исследование планарных полимерных антенн с люминофорами для лазерных информационных систем // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 4. – С. 176–180.

4. О свойствах полимерных планарных и волоконных оптических волноводов с микро-частицами и перетяжками / Б. В. Поллер, С. Г. Орлов, Д. Е. Трушенко, А. В. Бритвин, Д. В. Алексеев // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 4, ч. 2. – С. 22–26.

5. Характеристики пленочно-волоконных модулей для антенн наземно-космической лазерной связи / Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Б. Д. Борисов, В.Ф. Плюснин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013». Дифракционные и интерференционные системы и приборы : сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 77–80.

© А. В. Бритвин, Ю. Д. Коломников, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, Б. В. Поллер, А. Б. Поллер, Ю. И. Щетинин, 2017

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ

Галина Михайловна Жаркова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, тел. (383)330-38-96, e-mail: zharkova@itam.nsc.ru

Валентина Николаевна Коврижина

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-38-96, e-mail: kovrizh@itam.nsc.ru

Сергей Павлович Подъячев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)333-30-32, e-mail: sergpody@yandex.ru

В докладе приводится краткое описание и иллюстрация возможностей программного обеспечения для количественной диагностики пристеночных течений методом жидких кристаллов. Рассматривается случай применения пленочных покрытий на основе холестерических жидких кристаллов и эффекта селективного отражения света на их периодической структуре.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, оптический отклик, цветовые компоненты.

DIGITAL PROCESSING OF LIQUID CRYSTALS IMAGES OF TEMPERATURE AND SKIN FRICTION FIELDS

Galina M. Zharkova

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4/1 Institutskaya St., D. Sc., Professor, chief researcher, tel. (383)330-38-96, e-mail: zharkova@itam.nsc.ru

Valentina N. Kovrizhina

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4/1 Institutskaya St., Ph. D., senior researcher, tel. (383)330-38-96, e-mail: kovrizh@itam.nsc.ru

Sergey P. Podjachev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademik Koptug Prospect, Ph. D., junior researcher, tel. (383)333-30-32, e-mail: sergpody@yandex.ru

The report presents and illustrates the possibilities of software for quantitative diagnostics of near-wall flows by the method of liquid crystals. We consider the case of film coatings based on cholesteric liquid crystals and the effect of selective reflection of light on their periodic structure. Features of video data processing of experiments are described.

Key words: liquid crystals, optical response, color components.

Введение

Для диагностики пространственного распределения температуры и касательных напряжений на поверхности обтекаемой модели могут быть использованы жидкокристаллические (ЖК) покрытия чувствительные к этим параметрам [1–3]. Большой объем получаемой оптической информации существенно ограничивают применение метода, поэтому необходима автоматизация цифровой обработки зарегистрированных в эксперименте видеоизображений нестационарного оптического отклика жидких кристаллов (ЖК) на воздействие внешних факторов. В настоящей работе обсуждаются особенности и возможности разработанного нами программного обеспечения фундаментальных и прикладных исследований с ЖК применительно к задачам аэродинамического и теплофизического эксперимента. В этих исследованиях с целью количественной ЖК диагностики пристеночных течений задачи цифровой обработки подразделяются на 2 группы: задачи определения полей температур (ЖК термография) и задачи определения полей касательных напряжений τ . Разработанное программное обеспечение может быть также использовано для первичной обработки и калибровки ЖК покрытий.

Оптический отклик ЖК – это полноцветное (true-color) изображение, формируемое ЖК пленкой в оптическом диапазоне длин волн одной или несколькими видеокамерами с разных угловых положений. Выбор цветовых координат для цифровой обработки и анализа данных экспериментов определяется базовой колориметрической системой и его конечной целью.

1. Системы координат

При разработке программ цифровой обработки использовалась система пространственных координат, в которой ось Ox направлена по потоку, Oy – перпендикулярно поверхности, Oz – перпендикулярно плоскости HOy . Угловое положение источника света (обычно галогенной лампы) и регистрирующей камеры описывается углами θ (полярный угол – относительно вертикали к поверхности) и φ (угол азимута). За $\varphi = 0$ принимается направление, совпадающее с направлением потока (или вектора касательного напряжения). Соответственно, $\varphi = 180^\circ$ соответствует наблюдению против потока ($\varphi > 0$ – против часовой стрелки, $\varphi < 0$ – по часовой стрелке). Вследствие угловой зависимости селективного отражения от вектора касательного напряжения τ , длина волны максимума интенсивности отражения изменяется. Этот факт показан схематически на рис. 1, а для случая типичного ХЖК при нормальном освещении ($\theta_{\text{осв}} = 0$) параллельным пучком белого света, и наклонном наблюдении ($\theta_{\text{набл}} < 30^\circ$). В эксперименте также могут быть реализованы две других геометрии (наклонное освещение, наклонное наблюдение) и (нормальное освещение, нормальное наблюдение), однако, угловые чувствительности ЖК ($\Delta\lambda/\Delta\varphi$) и ($\Delta\lambda/\Delta\theta$) в этом случае будут другими.

В качестве базовой колориметрической системы, при анализе оптического отклика ХЖК применяется система цветowych координат HIS (цветовой тон, интенсивность, насыщенность). Колориметрическая координата цветовой тон (*hue*) H , измеряется в угловых градусах и с увеличением длины волн λ уменьшается (рис. 1, б). В наших измерениях цветковая координата H является основной, а интенсивность и насыщенность служат для дополнительного анализа при исключении бликов и т. п.

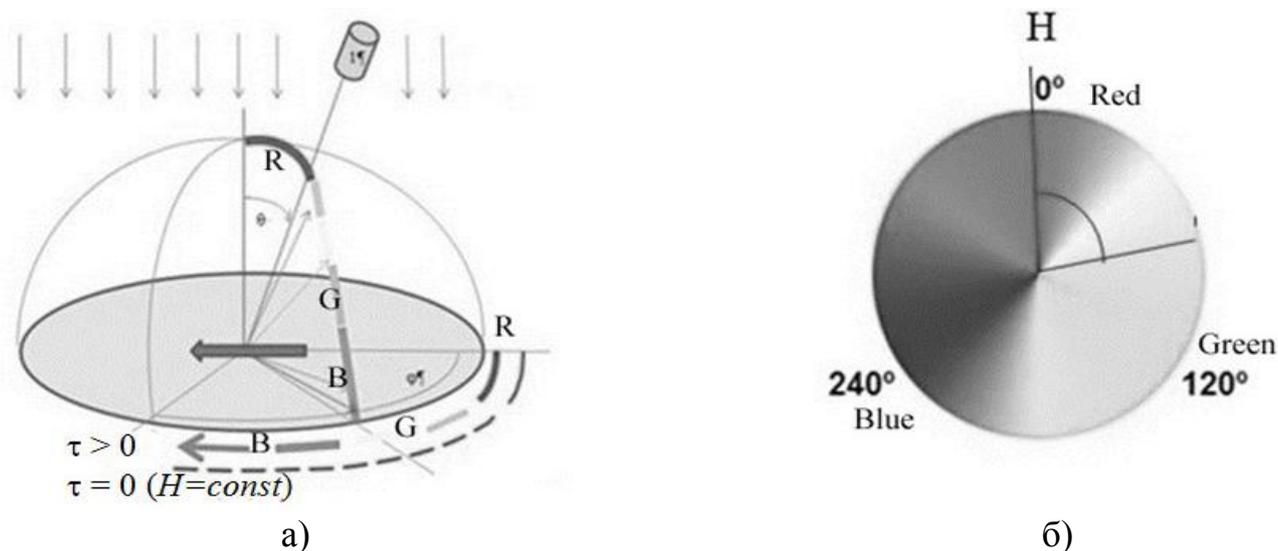


Рис. 1. Иллюстрация влияния углового положения камеры (θ, φ) на доминирующую длину волны селективного отражения $\lambda_{\max}(\tau)$ (а) и соотношение между цветом и цветковым тоном H (б)

2. Краткое описание программы обработки

Программное обеспечение экспериментов с ЖК покрытиями работает под управлением ОС Windows и может оперировать как файлами изображений, так и их временной последовательностью – видеофайлами. Для удобства из исходного текста собираются две программы, одна – для изображений (HFpic) и другая для видеофайлов – (HFV). Программа написана в открытой среде разработки Lazarus. Для работы с видеофайлами используются библиотеки видеопроигрывателя VLC с открытым исходным кодом от организации VideoLAN. Программа HFV позволяет осуществить просмотр исходных видеофайлов (рис. 2), выбрать кадры для построения временной серии значений и для построения пространственных графиков диаграмм. Кадры можно вращать и выбрать сечения или область в повернутом кадре для построения графиков и диаграмм. При этом видео кадры декодируются в память компьютера как матрицы целых значений содержащих три 8 битных цветковых компоненты красный (R), зеленый (G) и голубой (B), которые затем преобразуются в цветковые координаты (H, S, I).

Программа позволяет:

- построить графики изменения цветовых координат по осям x и z ;
- построить 2-мерный график (карту) значений цветовых координат с учетом фильтрации данных заданными условиями и в заданном диапазоне ($H_{\min} \div H_{\max}$);
- получить калибровочную зависимость и ввести ее в виде полинома или таблицы;
- используя калибровочную зависимость построить диаграммы физической величины;
- экспортировать полученные значения для дальнейшей обработки.

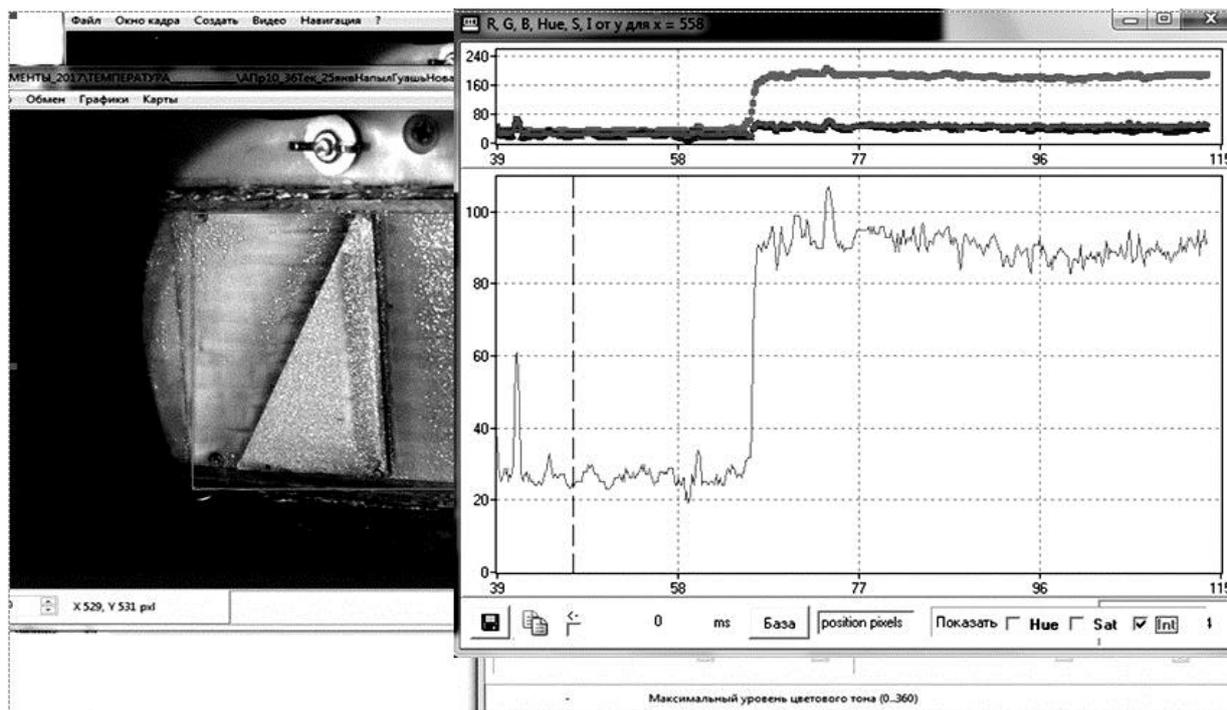


Рис. 2. Вид окна с видео программы NFM и окна с графиками $R, G, B, I(t)$

Межкадровая обработка видеофайла позволяет извлечь и построить график временной зависимости цветовых координат и локального модуля касательного напряжения при данном угле азимута на заданном временном интервале.

На рис. 3 показан вид панели с временными сериями исходных цветовых координат (R, G, B) и полученных в результате преобразования (H, S, I) для одного из экспериментов с ЖК при пятикратном включении потока. Обработка одного или двух кадров позволяет построить пространственное распределение физических величин, как в исходном виде, так и в нормированном или с вычитанием фонового изображения.

На рис. 4 показано окно программы для построения двухмерных диаграмм.

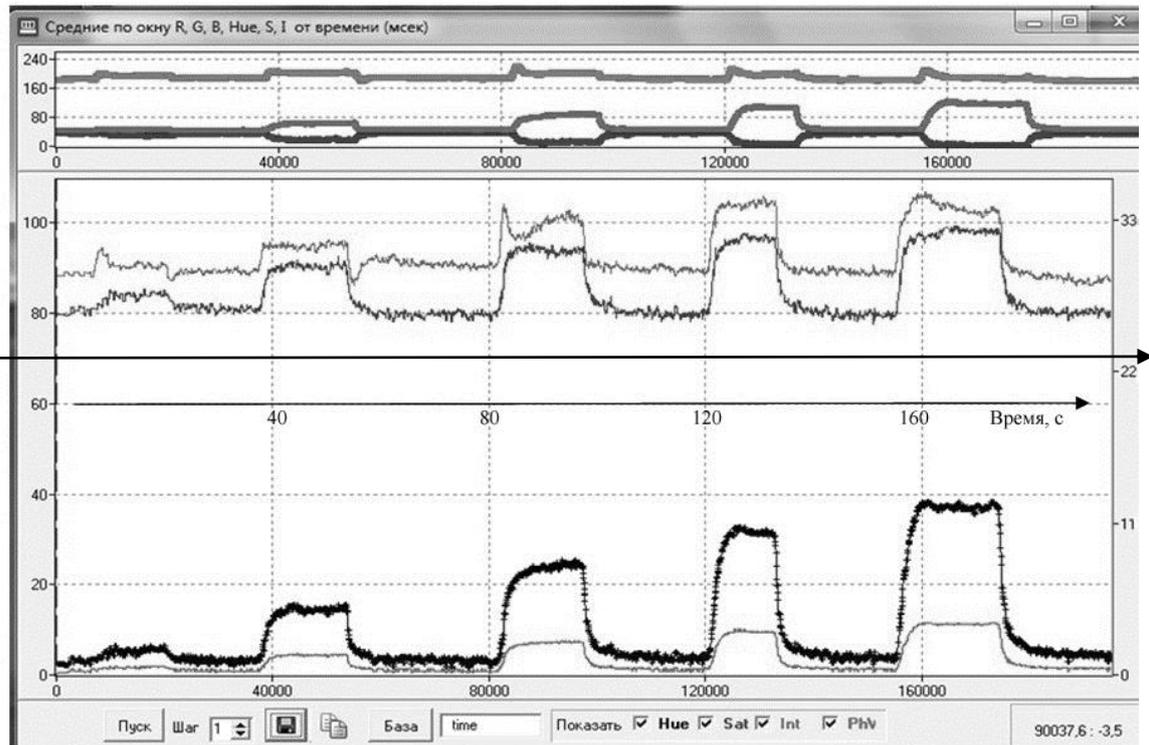


Рис. 3. Временные зависимости цветковых координат R, G, B, I, S, H (град) и касательного напряжения τ (Па, шкала справа) – сверху вниз

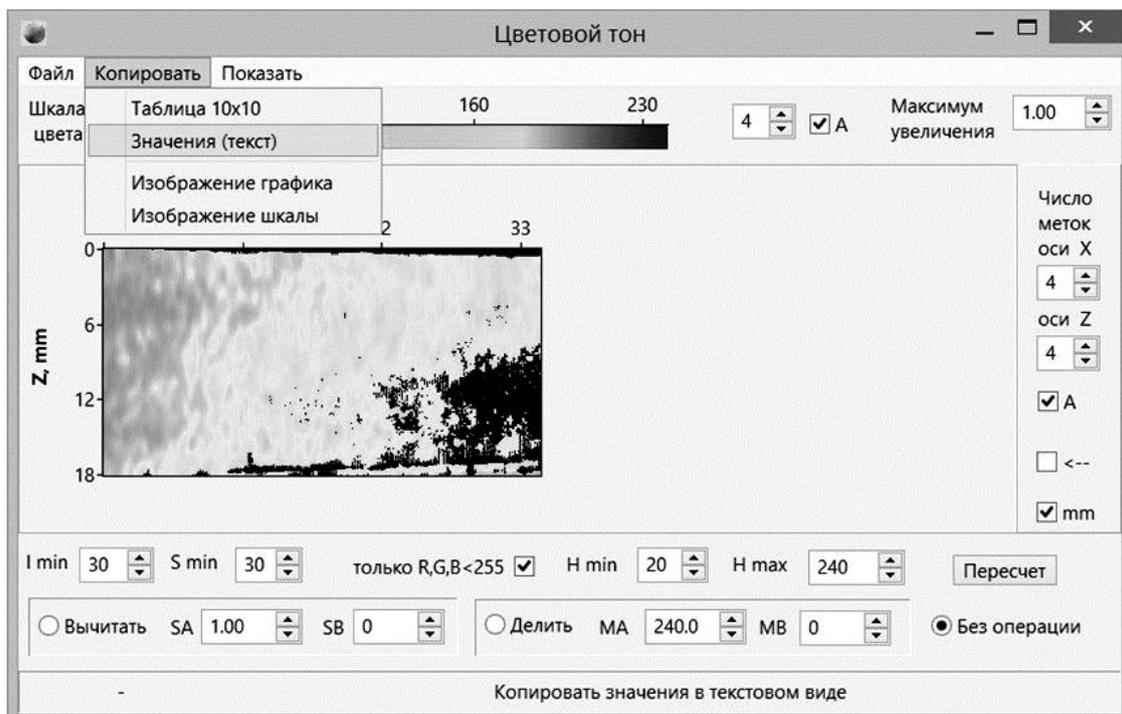


Рис. 4. Диаграмма цветкового тона, черным цветом показаны отфильтрованные области изображения

Так как для темных и/или почти серых областей величина цветового тона плохо определена, можно указать минимальное значение интенсивности и насыщенности цвета (I_{min} и S_{min}), начиная с которых, вычисляется значение цветового тона. Кроме этого, в силу ограниченности динамического диапазона R -, G - или B - компоненты могут «уйти в насыщение». Т.е. при максимально возможном значении (255) мы не можем сказать наверняка, что это реальное значение цветовой компоненты (R или G или B). Известно только что при этом ее величина >254 . Поэтому можно включить опцию, которая также исключает такие значения. По желанию можно указать H_{min} и H_{max} , которые будут отображаться и использоваться при вычислении физической величины. После изменения параметров фильтрации карта автоматически пересчитывается. В результате с помощью калибровочной зависимости можно вычислить значения модуля касательного напряжения и построить карту исследуемой физической величины и шкалу величин (см., например, [3]). Цветовой тон и результирующую физическую величину можно экспортировать в текстовом виде в файл или в буфер обмена.

Заключение

В докладе приводится краткое описание возможностей программ цифровой обработки видеоданных аэродинамического эксперимента с жидкими кристаллами холестерического типа. Текущая версия программного обеспечения позволяет повысить точность калибровки ЖК покрытий, получить панорамные распределения средних уровней температуры и/или касательного напряжения поверхностного трения, изучить их изменение в ходе эксперимента, что значительно повышает информативность диагностики методом жидких кристаллов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0323-2014-0011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-е, 1994. – 214 с.
2. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. Shear sensitive liquid crystals for diagnostics of boundary layer structure in aerodynamical experiment // Visualization of mechanical processes, 2013, 3(1) [Электронный ресурс]. – URL: <http://dl.begellhouse.com/journals/08456987543b9011,012ffe2e49678e34.html>
3. Панорамная диагностика касательных напряжений на стенке канала с выступом с помощью жидких кристаллов / Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, А. П. Петров, С.П. Подъячев // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6. – С. 865–873.

© Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, С. П. Подъячев, 2017

ГЕНЕРАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БЛИЖНЕМ И ДАЛЬНЕМ ИК ДИАПАЗОНАХ

Игорь Сергеевич Гибин

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационной оптики, e-mail: gibin@iae.nsk.su

Виктор Иванович Козик

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационной оптики, e-mail: kosik@iae.nsk.su

Евгений Семенович Нежевенко

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационной оптики, e-mail: nejevenko@iae.nsk.su.

При создании специализированных стендов контроля и оценки параметров информационных систем важное значение имеют устройства формирования тестовых полей. В отличие от стандартных статических тест-объектов в работе рассматриваются микрозеркальные модуляторы, способные генерировать динамические (перестраиваемые) изображения в реальном времени. Для применения таких модуляторов в инфракрасном диапазоне спектра была проведена их модернизация путем замены обычных защитных стекол модуляторов на материалы, прозрачные в ИК диапазоне вплоть до длины волны 14 мкм. Были разработаны соответствующая технология и специальное оборудование. В результате были созданы микрозеркальные модуляторы, способные работать в ИК области спектра. Приводятся результаты экспериментов. Доработанные модуляторы показали свою работоспособность в составе инфракрасных имитационно-моделирующих стендов и являются перспективными при разработке современных систем контроля и динамического тестирования инфракрасных фотоприемных устройств и систем.

Ключевые слова: инфракрасный диапазон, тепловизор, микрозеркальный модулятор, тестовые объекты, динамические тесты.

GENERATION OF DYNAMIC THERMOVISION IMAGES IN NEAR AND FAR IR RANGES

Igor S. Gibin

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, D. Sc., Professor, chief scientific of Laboratory of Information Optics, e-mail: gibin@iae.nsk.su

Victor I. Kozik

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptuyug Prospect, Ph. D., senior researcher of Laboratory of Information Optics, e-mail: kosik@iae.nsk.su.

Eugenij S. Nezhevenko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademik Koptug Prospect, D. Sc., leading researcher of Laboratory of Information Optics, e-mail: nedj@iae.nsk.su.

While creating specialized stands for control and evaluation of information systems parameters detecting fields forming devices are of great importance. Contrary to basic static test-objects, this work observes micro-mirror modulators which are able to produce dynamic (tunable) images in real time. For application of such modulators in the infrared spectrum range modernization was held: usual protective glasses of modulators were changed by materials that are transparent in IR range up to the wavelength of 14 mcm. Corresponding technology and special equipment have been worked out. As the result, micro-mirror modulators that are able to work in IR spectrum range have been created. The results of the experiments are presented. Updated modulators have demonstrated their efficiency as part of infrared stimulated-modelling stands and are now perspective for working out of modern systems of control and dynamic testing of infrared photoreceiving devices and systems.

Key words: infrared spectrum range, thermovision device, micro-mirror modulator, test objects, dynamic tests.

Одним из важнейших этапов при создании приборов ночного видения (ПНВ) является их всестороннее испытание. В настоящее время эти испытания в основном проводятся в статическом режиме с помощью медленно сменяемых мир, в лучшем случае – с помощью механически перемещаемых точечных объектов. В реальной же обстановке этим приборам приходится следить за быстро перемещающимися и изменяющимися целями, в этом режиме характеристики ПНВ могут существенно отличаться от характеристик, измеренных в статическом или квазистатическом режиме. Поэтому весьма актуальна задача разработки и создания принципов и систем для генерации динамических тестов для испытания ПНВ. Ключевыми элементами этих стендов являются преобразователи изображений, сформированных на компьютере, в инфракрасную область спектра, обеспечивающие формирование как статических тестовых изображений, так и приближающихся к реальным динамическим сцен. При формировании тепловизионного изображения необходимо учитывать два физических параметра, характеризующих тело, создающее это изображение: температуру тела, задающую спектральный состав излученного ИК потока и излучательную (отражательную) способность каждого участка тела. Известны имитационные системы, моделирующие температурное распределение [1]. Однако сочетать их с системами, имитирующими излучательную способность, чрезвычайно трудно. В то же время следует учесть, что любой тепловизор реагирует лишь на энергию принимаемого им излучения, так что достаточно правильной дозировки энергии, чтобы симитировать практически любое тепловое излучение тела. Мы считаем, что для этого наилучшим вариантом является микрозеркальный модулятор на основе DLP-технологий (digital light processing) [2].

Размерность изображений, генерируемых таким модулятором, может достигать 1800×1200 пикселей, частота смены кадров – 50–400 кадров/сек, выходное тепловизионное изображение формируется на основе входного цифро-

вого сигнала с разрешением до 16 бит. В настоящем докладе описываются макеты экспериментальных имитационно-моделирующих стендов, разработанных на основе DLP технологий для генерации изображений в диапазонах длин волн 3–5 мкм, и 9–12 мкм, а также приводятся результаты их экспериментальных исследований.

В 1987 году Dr. Larry J. Hornbeck изобрел цифровое микрозеркальное устройство (Digital Micromirror Device – DMD). Это изобретение завершило десятилетние исследования Texas Instruments в области микромеханических деформируемых зеркальных устройств. Суть открытия состояла в отказе от гибких зеркал в пользу матрицы жестких, имеющих два устойчивых положения.

По сути DMD это цифровой микро-опто-электромеханический пространственный модулятор света. В основе работы устройства заложена широтно-импульсная модуляция. В составе соответствующей оптической системы DMD может использоваться для модуляции амплитуды падающего светового пучка. Архитектурно DMD – это полупроводниковое устройство с электрическим входом и оптическим выходом с фиксированными состояниями. Эта архитектура делает DMD хорошо пригодным для использования в приложениях, в которых требуется обеспечить оптический выход под управлением компьютера [3].

Электрически DMD состоит из двумерного массива ячеек памяти CMOS на 1 бит, сгруппированных в виде прямоугольной сетки ячеек памяти. Оптически DMD состоит из управляемых в цифровой форме алюминиевых микрозеркал с высоким коэффициентом отражения, организованных также в виде аналогичного двумерного массива. Каждое индивидуальное микрозеркало установлено поверх соответствующей ячейки памяти CMOS. На рис. 1 приведена схема DMD модулятора в трактовке изготовителя – Texas Instruments.

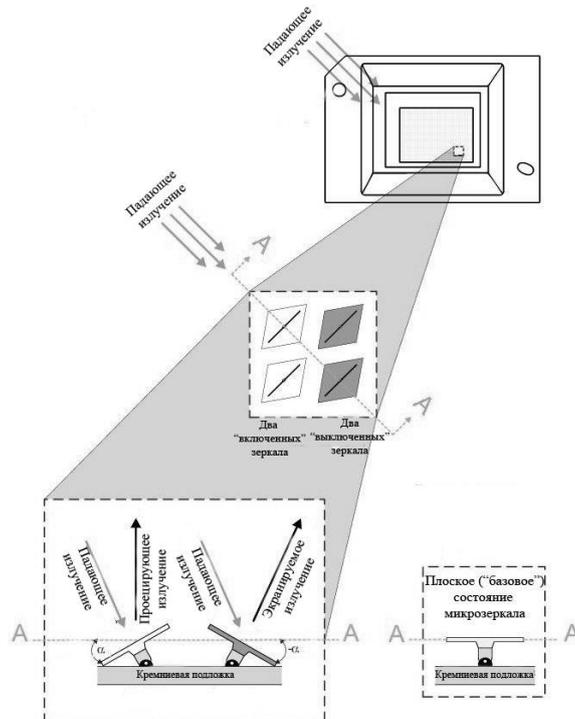
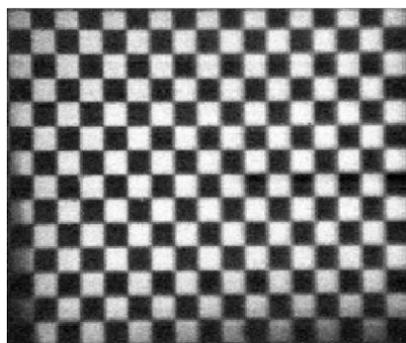


Рис. 1

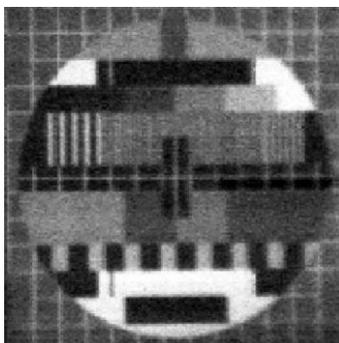
Микрозеркало крепится к жесткой подложке, которая соединяется с основанием матрицы. Под противоположными углами зеркал в направлении, перпендикулярном относительно диагонали массива элементов, размещены электроды, соединенные с ячейками памяти CMOS. Угловая позиция каждого микрозеркала определяется состоянием (логический 0 или 1) соответствующей ячейки памяти CMOS. Под действием электрического поля подложка с зеркалом благодаря ограничителям принимает одно из двух фиксированных положений. Запись логической 1 в ячейку памяти приведет к переключению соответствующего микрозеркала в состояние «Включено», при этом притягивается угол микрозеркала со стороны левого верхнего угла массива, а запись логического 0 – в состояние «Выключено» (притягивается угол со стороны правого нижнего угла).

Для создания генераторов инфракрасных изображений было выбрано два типа модуляторов: микросхема 8060-6439В (разрешение 1024×768 пикселей) и микросхема S8060-6408 (разрешение 800×600 пикселей).

Микрозеркало у 8060-6439В имеет размер приблизительно 11×11 мкм, у S8060-6408 – 13×13 мкм и переключаются между двумя дискретными угловыми позициями $+12^\circ$ и -12° . Угловые позиции определяются относительно 0° – «базовое состояние», которое параллельно плоскости массива (рис. 1). При модификации DLP проектора для диапазона длин волн 3–5 мкм DMD модулятор не дорабатывался, поскольку его защитное стекло было прозрачно в этом диапазоне на уровне 3–5 %, этого оказалось достаточно для получения как статических тестов, так и динамических. Так что доработка DLP проектора свелась к замене оптики (с видимого диапазона на инфракрасный) и источника излучения. Расположение источника для диапазона 3–5 мкм было таким же, как и для видимого, как показано на рис. 1 – в плоскости, проходящей через центр отражающей поверхности, перпендикулярной осям вращения зеркал под углом 24° к нормали к поверхности. Считывание изображений производилось тепловизором для соответствующей области длин волн, результаты его для статических тестов представлены на рис. 2, а, б, динамического (кадр телевизионного фильма) – на рис. 2, в.



а)



б)



в)

Рис. 2

Более сложные проблемы возникли при переходе к диапазону 9–12 мкм. Защитное стекло здесь оказалось совершенно непригодным, пришлось заменить его на пластину из ZnSe, прозрачную в диапазоне 0,5–16 мкм. Технологически это было сделать очень непросто: при съеме штатного стекла требовалось не допустить попадания на рабочую плоскость даже пылинки, а при наклейке новой пластины необходимо было обеспечить вакуум внутри микросхемы. После того, как все это было сделано, мы установили микросхему и соответствующий источник на их места, ожидая получить на выходе тепловизора размазанную картину: ведь размер зеркала (13 мкм) почти равен длине волны. Но ошиблись: при таком расположении тепловизора с оптикой и источника излучения свет в объектив тепловизора вообще не попадал. Тем не менее мы нашли положение источника, при котором изображение считывалось тепловизором, результат этого процесса представлен на рис. 3 а, б.

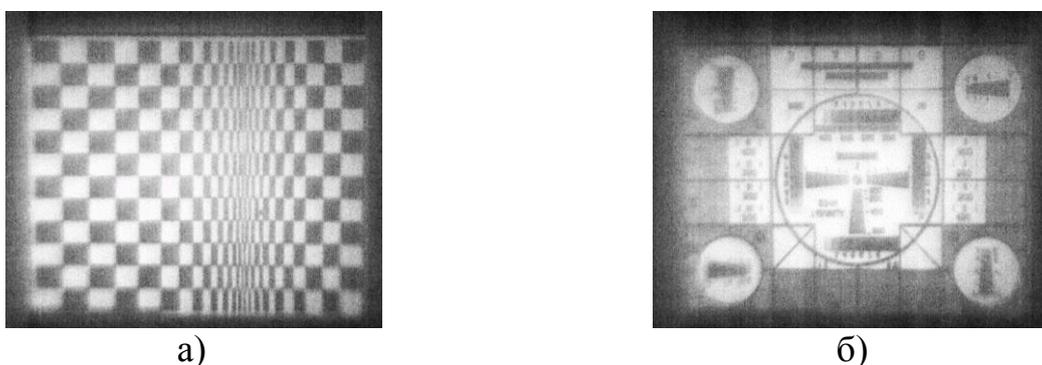


Рис. 3

Изменение положения источника мы связываем с тем, что набор микрозеркал в рабочем положении представляет собой пилообразную дифракционную решетку с шагом, близким длине волны, а отражение света такой решеткой весьма специфично.

Генерация тепловизионных изображений весьма эффективно производится с помощью микрозеркальных устройств. Разработана технология модернизации микрозеркальных модуляторов для работы в инфракрасном диапазоне спектра. Доработанные модуляторы показали свою работоспособность в составе инфракрасных стендов и являются перспективным при разработке современных систем контроля и тестировании инфракрасных фотоприемников и систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kevin Sparkman, Joe LaVeigne, Jim Oleson, Greg Franks, Steve McHugh, John Lannon, and Steve Solomon Performance improvements in large format resistive array (LFRA) infrared scene projectors (IRSP) // Proc. SPIE 6942, (2008).
2. Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. Макетирование и экспериментальное исследование систем генерации динамической сцены для тестирования тепловизионных приборов // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 80–86.
3. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp5500.pdf>

© И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко, 2017

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЗРАЧНОСТИ ЖИДКОЙ СРЕДЫ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ли Линь

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, аспирант кафедры промышленной и медицинской электроники

Алена Игоревна Блошкина

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, студент кафедры промышленной и медицинской электроники, тел. (960)974-18-81, e-mail: alenaigorevna@list.ru

Федор Александрович Губарев

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, доцент, зав. кафедрой промышленной и медицинской электроники; Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, научный сотрудник лаборатории нелинейно-оптических взаимодействий, тел. (382)241-98-69, e-mail: gubarevfa@tpu.ru

В данной работе представлены спекл изображения, полученные с помощью освещения контрольной плазмы когерентным светом, в процессе свертывания плазмы. Анализируя полученные изображения можно охарактеризовать процесс свертывания крови. В частности, можно определить начало и конец процесса, скорость реакции, протромбиновое время. В результате исследования выявлена возможность измерения параметров свертывания крови человека в реальном времени.

Ключевые слова: спекл интерферометрия, спекл, когерентное излучение, корреляция.

LIQUID TRANSPARENCY CHANGING DYNAMIC ESTIMATION BY MEANS OF DIGITAL SPECKLE CORRELATION

Li Lin

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenina Prospect, graduate student of the Department of Industrial and Medical Electronics

Alyona I. Bloskina

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenina Prospect, student of the Department of Industrial and Medical Electronics, tel. (960)974-18-81, e-mail: alenaigorevna@list.ru

Fedor A. Gubarev

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenina Prospect, associate Professor, Head of the Department of Industrial and Medical Electronics; V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634055, Russia, Tomsk, 1 Akademik Zuev Area, researcher the Laboratory of Nonlinear Optical Interactions, tel. (382)241-98-69, e-mail: gubarevfa@tpu.ru

The paper presents the speckle images produced by clotting plasma when illuminating with coherent light. By analyzing the changes of speckle images, it is possible to characterize the clotting process. In particular, the beginning, the end, the rate of the reaction, and the prothrombin time can

be identified. The results of study prognosticate the possibility to measure the clotting time of the human blood in a real time.

Key words: speckle images, laser beam, dynamics estimation.

1. Введение

Лазер является источником когерентного и монохроматического излучения, которое часто используется для наблюдения за изменениями объекта. Лазерные спеклы формируемые за счет суперпозиции волн в пространстве, образуют интерференционное пространство с различной яркостью. Фотографируя эту область в некоторой плоскости, мы получаем спекл-изображения. Исходя из того, что спекл-изображения формируются рассеянным когерентным светом, можно говорить о том, что изменение спекл-картины соответствует изменению свойств объекта.

В последние годы специалисты в различных областях изучают корреляцию спекл-изображений как один из оптических методов исследования. Данный метод основан на анализе спекл-изображений, создаваемых отраженным от объекта когерентным излучением, и дальнейшем получении параметров для описания динамики объекта. В работах [1–8] продемонстрирована возможность измерения динамики и перемещения объектов.

Спекл-изображение в процессе наблюдения за объектом меняет свою структуру, отображая изменения объекта. Данная особенность делает возможным исследование биологических жидкостей с помощью корреляционного анализа спекл-изображений. Хорошим примером может служить кровь человека, поскольку процессы, происходящие в ней, чрезвычайно важны. С помощью методики, представленной в данной работе, возможно оценить временные характеристики свертывания крови. Если свертывание крови происходит слишком быстро или слишком медленно, это может свидетельствовать о наличии каких-либо заболеваний. Разработка быстрого и простого метода для данных измерений является актуальной задачей.

В работах [9,10] авторы предлагают экспериментальную установку для получения спекл-картин, в обоих экспериментах используют реальную человеческую кровь с неизвестным временем свертывания.

В настоящей работе мы используем контрольную плазму с известным протромбиновым временем. Целью работы является сравнение статических параметров спекл-изображений, полученных методом лазерной спекл корреляции, с известными характеристиками реагента.

2. Техника эксперимента

Реагент состоит из двух частей: контрольная плазма и реагент «Техпластин» производства фирмы «Технология стандарт», Россия. Техпластин – это растворимый тромбопластин-кальциевый реагент из кадаверного мозга, стандартизированный по международному индексу чувствительности (МИЧ) – аналог кроличьего тромбопластина. Тест разработан для анализа протромбинового

времени контрольной плазмы, полученной из венозной крови. Определение времени свертывания используется для проверки протромбиновых факторов (II – протромбина, V, VII, X), а также мониторинга и лечения антикоагулянтами непрямого действия [11]. При добавлении в контрольную плазму техпластина, плазма начинает образовывать сгусток, этот процесс, согласно известным характеристикам, продолжается около 13–18 секунд.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Луч He-Ne-лазера направляется на объект с помощью поворотного зеркала. Сформированные спекл-изображения записываются цифровой камерой HiSpec FastCam 1. Размер анализируемого окна 1 : 1, т. е. рассматривается все изображение.

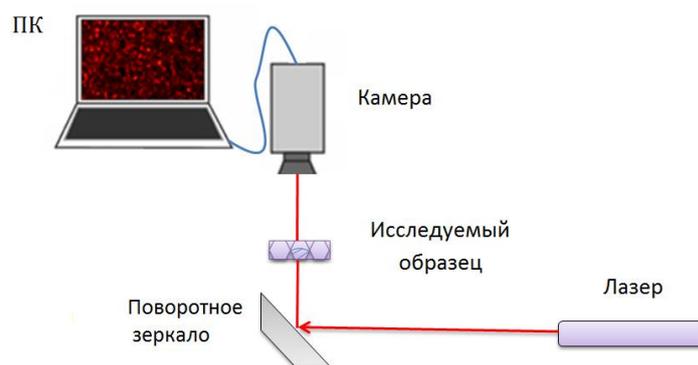


Рис. 1. Схема эксперимента

Реагенты до активации растворялись в дистиллированной воде и поддерживались при постоянной температуре. Процесс свертывания начинается при смешивании контрольной плазмы и Техпластина. Соотношение реагентов согласно рекомендации составляет 1 : 2. В экспериментах использовались 0.05 мл плазмы и 0.1 мл Техпластина.

3. Результаты

На рис. 2 показано спекл-изображение в процессе свертывания крови. В экспериментах камера записывала спекл-изображения с частотой 2 Гц.

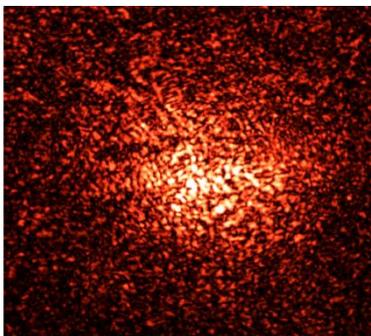


Рис. 2. Спекл-изображение во время процесса свертывания контрольной сыворотки

Анализируя изображения в программном обеспечении MatLab, получаем график процесса свертывания крови. В работе нами вычислялся коэффициент корреляции между текущим и предыдущим изображениями в серии спекл-изображений в момент процесса свертывания. Таким образом, определялась зависимость коэффициента корреляции от времени реакции. Алгоритм, по которому производился анализ изображений, описан в работах [7, 8].

Используя полученные диаграммы, можно определить время свертывания, а также момент его начала и окончания. На рис. 3 приведены кривые коэффициентов корреляции для описания процесса свертывания крови для четырех образцов одного раствора. Известно, что коэффициент корреляции отражает соотношение двух спекл-картин, следовательно, указывает скорость изменения спекл-изображений за определенный период. Чем быстрее меняются изображения, тем менее оптически плотным является объект.

В процессе коагуляции скорость изменения рассеяния света соответствует скорости процесса коагуляции. Например, хорошо видно, что на 13–18 секунде скорость изменения спекл-картины замедляется. После 18 секунд коэффициент корреляции становится больше 0.9 и стремится к 1. Это значит, в течение 13–18 секунд процесс коагуляции постепенно замедляется, а после 18 секунды почти останавливается. Результаты согласуются с известным временем свертывания (14-19 секунд), по инструкции [11], прилагаемой к реагентам, это говорит о том, что с помощью метода цифровой корреляции спекл-изображений возможно измерение времени свертывания с точностью, достаточной для применения в клинической практике.

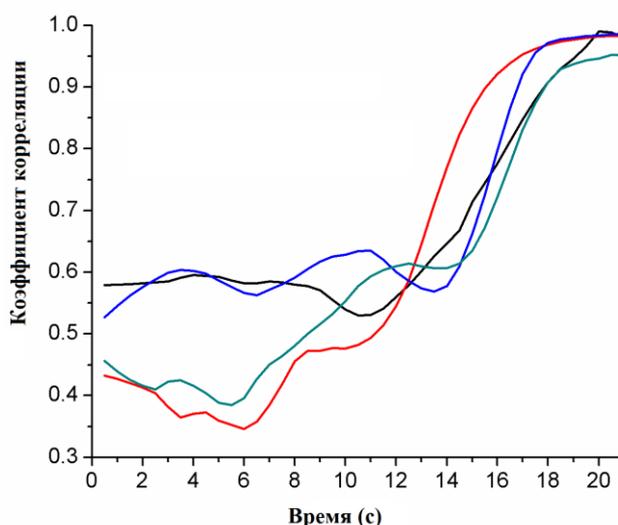


Рис. 3. Кривая зависимости коэффициента корреляции во времени

4. Заключение

В работе показано, что метод цифровой корреляции спекл-изображений может использоваться для измерения времени свертывания крови человека. Зависимость коэффициента корреляции от времени соответствует известному протромбиновому времени контрольной сыворотки, используемой в эксперименте.

В дальнейших исследованиях необходимо изучить параметры, влияющие на точность эксперимента: размер спекл-изображения, время экспозиции камеры, различные образцы крови и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Khaksari K., Kirkpatrick S. J. Laser speckle contrast imaging is sensitive to advective flux // *Journal of Biomedical Optics.*, Vol. 21, No. 7, 076001-1–076001-8, 2016.
2. In vivo dynamic light scattering imaging of blood coagulation / V. Kalchenko, A. Brill, M. Bayewitch, I. Fine, V. Zharov, E. Galanzha, V. Tuchin, A. Harmelin // *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 12, No. 5, 052002-1–052002-4, 2007.
3. Speckle-based configuration for simultaneous in vitro inspection of mechanical contractions of cardiac myocyte cells / M. Golberg, D. Fixleret A. Shainberg, S. Zlochiver, V. Micó, J. Garcia, Y. Beiderman, Z. Zalevskiy // *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 18, No. 10, 101310-1–101310-5, 2013.
4. “Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern / Z. Zalevsky, Y. Beiderman, I. Margalit, S. Gingold, M. Teicher, V. Mico, J. Garcia // *Optics express*, Vol. 17, No. 24, 21566-21580, 2009.
5. W.O. Wong, “Vibration analysis by laser speckle correlation,” *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 28, No. 4, 277-286, 1997.
6. Excellent reproducibility of laser speckle contrast imaging to assess skin microvascular reactivity / M. Roustit, C. Millet, S. Blaise, B. Dufournet, J. L. Cracowski // *Microvascular Research.*, Vol. 80, No. 3, 505–511, 2010.
7. Vibration measurement by means of digital speckle correlation / L. Li, F. A. Gubarev, M.S. Klenovskii, A.I. Bloshkina // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 7491753, 2016.
8. Speckle pattern processing by digital image correlation / F. Gubarev, L. Li, M. Klenovskii, A. Glotov // *MATEC Web of Conferences*, Vol. 48, 04003, 2016.
9. Evaluation of blood plasma coagulation dynamics by speckle analysis / Y. Piederrière, J. Cariou, Y. Guern, G.L. Brun, B.L. Jeune, J. Lotrian // *Journal of Biomedical Optics*, Vol. 9, No. 2, 408–412, 2004.
10. Blood Coagulation Measurements Using Dynamic Speckle Technique / M. M. Patiño-Velasco, C. Andrade-Eraso, J. Vásquez-López, M. Trivi, H. J. Rabal // *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB.*, Vol. 49, 91-94. 2014,
11. http://www.tehnologia-standart.ru/catalog/tekhplastin_test/tekhplastin_test_100_opr_.html

© Л. Линь, А. И. Блошкина, Ф. А. Губарев, 2017

ВЛИЯНИЕ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Галина Вячеславовна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

Ирина Николаевна Шарыпова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения тел. (383)361-07-45, e-mail: simgal@list.ru

В статье приведены результаты оценки влияния возникающих на поверхности узлов металлизации окисных пленок на результаты измерения переходных сопротивлений.

Ключевые слова: окисные пленки, переходные сопротивления, результаты измерения, погрешность.

INFLUENCE OF THE OXIDE LAYERS ON THE MEASUREMENT RESULTS OF TRANSIEN RESISTANCES

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate Professor of the Department of Metrology and Technologies in Optical Instrumentation Certification, tel. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list

Irina N. Sharipova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., undergraduate of the Department of Metrology and Technologies in Optical Instrumentation Certification, tel. (383)361-07-45, e-mail: simgal@list

The results the evaluation of the impact occurring on the surface the nodes of the metallization the oxide layers on the measurement results of the resistances given in the article.

Key words: the oxide layers, transient resistance, results of measurement, measurement uncertainty.

Требования к металлизации изделия и комплектующих элементов указываются в конструкторской и технологической документации в соответствии с учетом требований технического задания.

Величина переходных сопротивлений в определенных сочленениях экранировки и металлизации механических соединений деталей конструкции изделия и элементов оборудования должна соответствовать установленным нормам и строго соблюдаться, так как ненадежные контакты могут сами явиться источниками радиопомех, а также могут служить причиной местного нагрева от-

дельных узлов конструкции за счет больших токов, протекающих по корпусу изделия [1].

Контроль качества выполнения металлизации производится измерением переходных электрических сопротивлений на окончательно собранном изделии или на сборочных единицах в нормальных климатических условиях, при этом контролируется целостность перемычек металлизации и надежность их крепления.

Однако при контроле этих соединений возникает множество дополнительных факторов, которые зависят как от методики измерений, так и условий их проведения. Данная статья посвящена оценке влияния возникающих окисных пленок, на результаты этих измерений и выявление предельно допустимых значений временных интервалов между подготовкой поверхности и собственно измерениями для данного вида контроля.

Контроль переходных сопротивлений контактов и узлов металлизации производится приборами классом точности не ниже указанного при отключенном питании оборудования, например, ИКС [2].

Измерения проводились прибором ИКС–5 предназначенным для оперативного измерения низкого электрического сопротивления постоянному току, в том числе переходного сопротивления высоковольтных выключателей и разъединителей.

Диапазон измеряемого электрического сопротивления составляет 0...10 000 мкОм. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения: $\pm (0,2 + 0,01) \%$.

Результаты измерений переходного сопротивления и расчета среднеквадратичной погрешности для одного из образцов приведены в таблице.

Таблица

Временной интервал	$(t = 0)$, час		$(t = 1)$, час		$(t = 2)$, мкОм		Через $(t = 3)$, мкОм	
	R , мкОм	B , мкОм	R , мкОм		R , мкОм		R , мкОм	
№ 1	317	9	423	13	525	15	603	50
№ 2	310		445		535		634	
№ 3	322		447		560		675	
№ 4	337		438		521		705	
№ 5	345		436		512		714	

Измерения проводились непосредственно после подготовки поверхности узлов металлизации и далее через установленные интервалы времени на одних и тех же образцах в стандартных условиях измерений. Обработка результатов измерений проводилась по пяти измерениям на каждом образце для четырех временных интервалов.

Из приведенных результатов видно значительное изменение переходного сопротивления при увеличении времени от подготовки поверхности до проведения измерений, погрешность результатов измерений также существенно возрастает.

Зависимость результата измерений от временного интервала приведена на рис. 1, а погрешности результата измерений – на рис. 2.

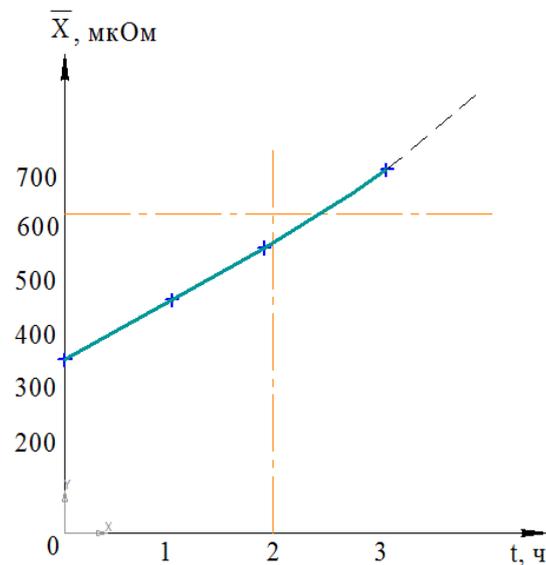


Рис. 1. График зависимости результатов измерения переходного сопротивления от временного интервала

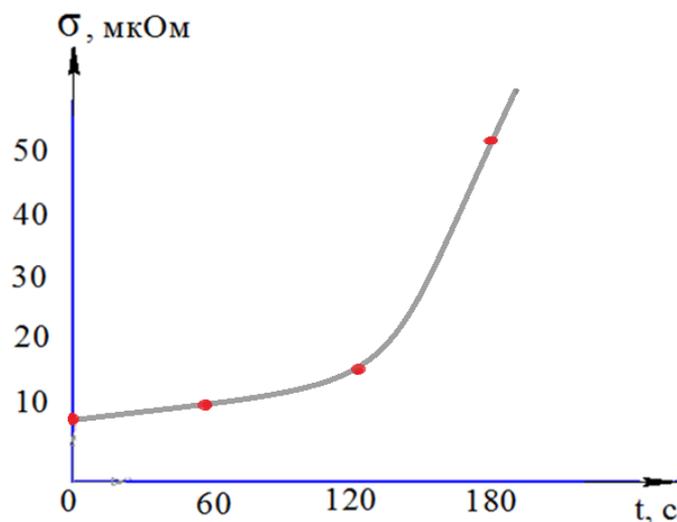


Рис. 2. График зависимости средней квадратичной погрешности результата измерений переходных сопротивлений от временного интервала

Анализ графика на рис. 1 показывает, что превышение переходного сопротивления значений установленных требований (в данном случае 600 мкОм)

обусловлен не ухудшением качества металлизации, а влиянием возникшей окисной пленки.

Следовательно, увеличение временного интервала между подготовкой поверхности и проведением измерений приводит к снижению достоверности измерительной информации и необоснованному отнесению изделий к несоответствующим требованиям технической документации.

Погрешность результата измерений при увеличении временного интервала также увеличивается и определяется скорее неоднозначностью характеристик окисной пленки, а не материала металлизации.

На основании полученных результатов следует вывод, что методика проведения измерений переходных сопротивлений существенно влияет на достоверность контрольных операций по оценке качества металлизации

Поэтому при проведении контроля переходных сопротивлений следует учитывать не только собственно процесс измерений, но и предварительную подготовку поверхности, а также соблюдение временных интервалов между подготовкой поверхности и измерением переходных сопротивлений, так как при несоблюдении этих условий результаты измерений соответствует не значениям сопротивления металлизации, а сопротивлению возникших окисных пленок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОСТ 1.42130–81. Металлизация переключкой агрегатов и блоков оборудования, приборов, баков и других узлов : отраслевой стандарт. – Введ. 01.07.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 10 с.
2. МП 25-233–2000 ГСИ. Переносной малогабаритный микроомметр ИКС-5. Методика поверки : руководство по эксплуатации. – Введ. 26.07.2000. – Челябинск : Изд-во стандартов, 2000. – 21 с.

© Г. В. Симонова, И. Н. Шарыпова, 2017

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМИТАТОРА-АНАЛИЗАТОРА УСИЛИТЕЛЕЙ И АВТОГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Светлана Владимировна Ромасько

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. (383)361-07-45

Владимир Анатольевич Литовченко

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, начальник учебной лаборатории кафедры разведки (специальной разведки и воздушно-десантной подготовки); Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)332-50-45, (923)100-89-86, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru

Статья посвящена математическому моделированию имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ. В ней осуществлен структурный синтез имитатора-анализатора и разработана его математическая модель.

Ключевые слова: имитатор-анализатор, математическая модель, комплексные коэффициенты отражения, перестраиваемый согласующий трансформатор, направленный мост.

MATHEMATICAL MODEL OF THE IMITATOR OF ANALYZER OF AMPLIFIERS AND AUTOGENERATORS MICROWAVE

Sergei V. Savelkaev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor of the Department of Special Devices and Technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Svetlana V. Romasko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., assistant of the Department of Metrology and Technologies in Optical Instrumentation Certification, tel. (383)361-07-45

Vladimir A. Litovchenko

Novosibirsk Higher Military Command School, 630117, Russia, Novosibirsk, 49 Ivanova St., head of the Laboratory of the Department of Educational Intelligence (Special Reconnaissance and Airborne Training); Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student of the Department Metrology and Optical Production Technology, tel. (383)332-50-45, (923)100-89-86, e-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru

The article is devoted to mathematical simulation of the simulator-analyzer of amplifiers and microwave oscillators. It carried out the structural synthesis of the simulator-analyzer and developed its mathematical model.

Key words: simulator-analyzer, mathematical model, complex reflection coefficients, tunable matching transformer, directional bridge.

Наиболее распространенная структурная схема одного двух идентичных измерительных каналов имитатора-анализатора (ИА) усилителей и авторов СВЧ [1–4] показана на рисунке.

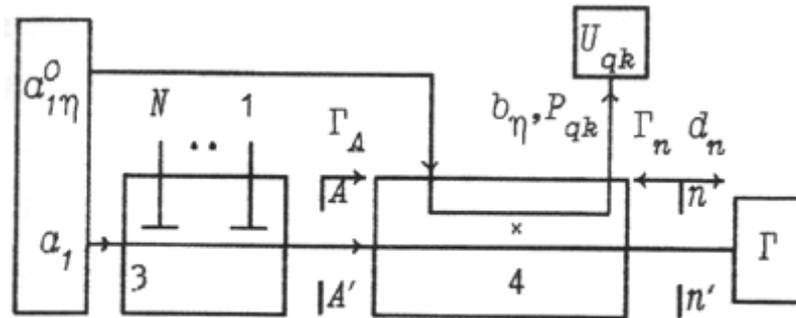


Рис. Структурная схема измерительного канала ИА

ИА содержит направленный мост 4, детектор, преобразующий мощность P_{qk} в напряжение U_{qk} , N – шлейфный перестраиваемый согласующий трансформатор (ПСТ) 3 и генератор зондирующего a_1 и опорного $a_{1\eta}^0$ сигналов.

Математическую модель измерительного канала ИА будем искать в виде составных физической и двух логических частей [5, 6]

$$\begin{aligned} P_{qk} &= F_{qk}(\Gamma); \quad q=1,2,\dots,5, \quad k=1,2,3 \\ p_q &= f_p(P_{qk}); \quad k=1,2,3, \quad q=1,2,\dots,5, \\ \Gamma^* &= f_{\Gamma q}(p_q); \quad q=1,2,\dots,5 \end{aligned} \quad (1)$$

где Γ^* и Γ – измеренный ККО исследуемой СВЧ цепи и его измеряемое значение при условии того, что в плоскости $n - n'$ ККО $\Gamma_n = \Gamma$, как показано на рисунке, а – Γ ; $q = 1, 2, \dots, 5$ и $k = 1, 2, 3$ – индексы состояний амплитуды $|a_{1\eta}^0|$ и фазы φ_{1k} опорного сигнала $a_{1\eta}^0$, первый из которых определяет поддиапазон измерения ККО Γ ; F_{qk} , f_p и f_{Γ} – шкалы физического и логического преобразований, подлежащие аналитическому определению; \tilde{p}_q и p_q – нормированный эквивалентный ККО и эквивалентный ККО измеряемого ККО Γ на q -м поддиапазоне измерения; P_{qk} – мощность

$$P_{qk} = \frac{1}{2} |b_{qk}|^2 \quad (2)$$

на выходном полюсе $2n$ -полюсника рассматриваемого ИА в q -м и k -м состояниях амплитуды $|a_{1\eta}^0|$ и фазы φ_{1k} опорного сигнала $a_{1\eta}^0$ [7].

Комплексную амплитуду сигнала на выходном полюсе $2n$ -полюсника ИА можно определить как

$$b_{\eta} = \sum_{m=1}^n \frac{A_m + B_m \Gamma}{1 + C\Gamma} a_{m\eta}, \quad (3)$$

где $a_{m\eta} = \{a_{1\eta}^0, a_1\}$ – вектор опорного $a_{1\eta}^0$ и зондирующего a_1 сигналов на $l = 2$ входных полюсах $2n$ -полюсника ИА; A_m , B_m , и C – эквивалентные комплексные константы его $2n$ -полюсника.

Подставив (3) в (2) с разложением по индекс – вектору $\eta = \{q, k\}$, получим уравнение физического преобразования ИА в виде

$$P_{qk} = E \left[1 + |p_q|^2 + 2|p_q| \cos(\varphi_p + \varphi_k) \right], \quad (4)$$

где φ_k – k -й дискретный сдвиг фазы φ_{1k}^0 опорного сигнала $a_{1\eta}^0$ относительно фазы φ_1 зондирующего сигнала a_1

$$\varphi_k = \pm \sum_k \theta_k; \quad (5)$$

$\theta_k = \varphi_1 - \varphi_{1k}^0$ фазовая метрика, характеризующая k -е дискретное приращение фазы φ_1^0 опорного сигнала $a_{1\eta}^0$ относительно фазы φ_1 зондирующего сигнала a_1 ; $|p_q|$ и φ_p – модуль и фаза эквивалентного ККО

$$p_q = C_1 \frac{1 + C_2 \Gamma}{1 + C_3 \Gamma} \chi_q \quad (6)$$

измеряемого ККО Γ ; $C_1 = (A_1/A_2) \exp \theta_0$, $C_2 = B_1/A_1$ и $C_3 = B_2/A_2$ – приведенные комплексные константы $2n$ -полюсника ИА; $\theta_0 = \varphi_1 - \varphi_1^0$ – неизвестный начальный сдвиг фазы φ_1^0 опорного сигнала $a_{1\eta}^0$ относительно фазы φ_1 зондирующего сигнала a_1 , подлежащий исключению; χ_q – амплитудная метрика

$$\chi_q = \left| \frac{a_1}{a_{1q}^0} \right| = \left| \frac{a_1}{a_1^0} \right| 10^{\alpha_q / 20} \quad (7)$$

q -го поддиапазона измерения, задающая посредством модуля $|p_q|$ эквивалентного ККО p_q (7) измеряемого ККО Γ динамический диапазон

$$\Delta = 10 \log \frac{1 + |p_q|^2 + 2|p_q|}{1 + |p_q|^2 - 2|p_q|} = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (8)$$

изменения мощности $P_{\min} \leq P_{qk} \leq P_{\max}$, – текущее отношение амплитуд зондирующего a_1 и опорного $a_{1\eta}^0$ сигналов на q -м поддиапазоне измерения и их неизвестное начальное отношение, подлежащее исключению; a_q – текущее ослабление начальной амплитуды $|a_1^0|$ опорного сигнала $a_{1\eta}^0$ на q -м поддиапазоне измерения; E – амплитудный коэффициент

$$E = \frac{1}{2} \left| A_2 a_1^0 \frac{1 + C_3 \Gamma}{1 + C\Gamma} \right|^2, \quad (9)$$

который при $\Gamma = 0$ принимает значение

$$E = k_2 P_0; \quad (10)$$

P_0 мощность опорного сигнала a_1^0

$$P_0 = \frac{1}{2} |a_1^0|^2; \quad (11)$$

$k_2 = |A_2|^2$ – коэффициент пропорциональности.

Уравнение (5) определяет шкалу физического преобразования ИА в виде

$$F_{qk} = F_{qk}(\xi, E, C_1, C_2, C_3, \chi_q, \varphi_k); q = 1, 2, \dots, 5, k = 1, 2, 3, \quad (12)$$

где ξ – случайный фактор средств измерения ИА. Оно в зависимости от приращения фазового сдвига φ_k (6) описывает интерференционную картину P мощности P_{1k} на $p = 1$ выходном полюсе $2n$ -полюсника ИА. При этом k -е дискретное приращение фазового сдвига φ_k , которое задается фазовой метрикой θ_k (6), эквивалентно дискретному перемещению интерференционной картины мощности P относительно неподвижной плоскости индикатора мощности P_{qk} , при котором эта мощность принимает дискретные значения P_{qk} .

Новые переменные:

$$x_1 = E \left[1 + |p_q|^2 \right], x_2 = E |p_q| \cos \varphi_p, x_3 = E |p_q| \sin \varphi_p, \quad (13)$$

связанные между собой уравнением

$$\sqrt{\left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2} = \frac{|p_q|}{1 + |p_q|^2}, \quad (14)$$

сводят (4) к виду

$$x_1 + a_{k2} x_2 + a_{k3} x_3 = a_{qk4}, k = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где $a_{qk4} = P_{qk}$, $a_{k2} = 2 \cos \varphi_k$, $a_{k3} = -2 \sin \varphi_k$.

Решение системы уравнений (15) относительно переменных x_1 , x_2 и x_3 (13) для $k = 1, 2, 3$ мощностей P_{qk} при $q = \text{const}$ позволяет определить модуль $|p_q|$ и фазу φ_p эквивалентного ККО p_q (7) измеряемого ККО Γ из (14) как:

$$|p_q| = \frac{1}{2\beta} \pm \sqrt{\frac{1}{4\beta^2} - 1}, \quad \varphi_p = \arctg\left(\frac{x_3}{x_2}\right),$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2}, \quad (16)$$

где знак $(-)$ выбирается для адаптации ИА сверху, а знак $(+)$ – его безусловной адаптации.

Согласно (15) и (16) шкалу f_p логического преобразования мощностей P_{qk} в эквивалентный ККО p_q можно записать как

$$f_p = f_p(\psi, \varphi_k; \quad k = 1, 2, 3), \quad (17)$$

где ψ – случайный фактор средств измерения ИА в целом при изменении ККО Γ .

Для определения измеренного ККО Γ^* через эквивалентный ККО p_q (17) исключим из (6) неизвестное начальное отношение амплитуд $|a_1 / a_1^0|$ зондирующего a_1 и опорного a_1^0 сигналов (7), а также их неизвестный начальный фазовый сдвиг θ_0 . Для этого применим к (6) нормировку вида $\tilde{p}_q = \frac{p_q}{p_{14}}$, в результате которой получим

$$\tilde{p}_q = \tilde{\chi}_q \frac{(G_1 + G_2\Gamma)}{1 + G_3\Gamma}, \quad (18)$$

где \tilde{p}_q и p_{14} – нормированный эквивалентный ККО измеряемого ККО Γ и нормирующий эквивалентный ККО, измеряемый при калибровке ИА короткозамкнутым эталоном с ККО $\Gamma = W_4 = -1$ на $q = 1$ поддиапазоне измерения; $\tilde{\chi}_q$ – нормированная амплитудная метрика

$$\tilde{\chi}_q = \chi_q / \chi_1 = 10^{(\alpha_q - \alpha_1)/20}; \quad (19)$$

χ_q – амплитудная метрика $q = 1$ поддиапазона измерения

$$\chi_1 = |a_1 / a_1^0| = |a_1 / a_1^0| 10^{\alpha_1/20}; \quad (20)$$

α_1 – начальное ослабление амплитуды $|a_1^0|$ опорного сигнала a_1^0 на $q = 1$ поддиапазоне; $G_1 = [(1 - C_3)/(1 - C_2)]$, $G_2 = C_2 [(1 - C_3)/(1 - C_2)]$, $G_3 = C_3$ – нормированные комплексные константы $2n$ -полюсника ИА, подлежащие определению при его калибровке.

Согласно (18) измеренный ККО Γ^* можно определить как

$$\Gamma^* = \frac{G_1 \tilde{\chi}_q - \tilde{p}_q}{G_3 \tilde{p}_q - G_2 \tilde{\chi}_q}. \quad (21)$$

В случае, когда в (20) текущее α_q ослабление амплитуды $|a_1^0|$ опорного сигнала неизвестно, нормированная амплитудная метрика $\tilde{\chi}_q$, входящая в (21) может быть определена из формулы

$$\tilde{\chi}_q = \left| \tilde{p}_{qq} \frac{1 + G_3 W_q}{G_1 + G_2 W_q} \right|, \quad (22)$$

где $\tilde{p}_q = \frac{p_{qq}}{p_{14}}$ – нормированное значение эквивалентного ККО p_{qq} , измеряемого при калибровке ИА эталоном с ККО $\Gamma = W_q$ на q -м поддиапазоне измерения.

Согласно (21) шкалу f_{Γ} логического преобразования нормированного эквивалентного ККО \tilde{p}_q в измеренный ККО Γ^* можно записать в виде

$$f_{\Gamma q} = f_{\Gamma q}(\psi, \xi, G_1, G_2, G_3, \chi_q); \quad q = 1, 2, \dots, 5, \quad (23)$$

где ξ – случайный фактор средств измерения ИА в целом при его калибровке.

Таким образом, аналитически определена математическая модель (1) ИА [8–10] в виде (4), (15), (16), (19), (21) и (22).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С. В. Математическое моделирование дискретных методов и средств измерения для систем автоматизированного проектирования СВЧ устройств : дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1997. – 137 с.
2. Петров В. П. Алгоритмические концепции в проектировании точных измерителей СВЧ цепей // Труды Третьей Международной НТК. – Новосибирск, 1996. – Т. 9. – С. 4–8.
3. Петров В. П., Каспер Г. Г., Симонюк А. Ф. Двухсигнальный метод измерения параметров радиочепей // Техника средств связи. Сер.: Радиоизмерительная техника. – 1989. – Вып. 1. – С. 15–20.
4. Савелькаев С. В. Теоретические основы построения адаптивных цифровых анализаторов СВЧ-цепей // Электронная техника. Сер.: Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 9. – С. 34–39.
5. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S-параметров // Метрология. – 2005. – № 4. – С. 19–28.
6. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров // 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. 2. – С. 164–171.

7. Савелькаев С. В., Айрапетян В. С., Литовченко В. А. Трехсекционная дейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером Шоттки // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, вып. 1. – С. 57–62.

8. Метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 224–228.

9. Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 1. – С. 63–74.

10. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Успехи современной радиотехники. – 2017. – Вып. 2. – С. 50–61.

© С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, 2017

О ПРИМЕНЕНИИ ПРОГРАММНОГО ИМИТАТОРА MODBIS24

Александр Сергеевич Толстиков

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

Артём Андреевич Карауш

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, научный сотрудник государственной службы времени и частоты, тел. (383)210-14-94, e-mail: karaush.a@mail.ru

Екатерина Андреевна Ханькова

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, научный сотрудник государственной службы времени и частоты, тел. (383)210-14-94, e-mail: hanikovak@mail.ru

В статье обсуждаются проблемы формирования эфемеридно-временного обеспечения отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС на основе беззапросных технологий траекторных измерений. Программный имитатор измерительной информации ModBis24, разработанный в ФГУП «СНИИМ», является инструментом для исследования метрологических характеристик эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Также в работе обсуждается применение программного имитатора ModBis24 в учебном процессе для студентов, обучающихся по специальности «Стандартизация и метрология», «Космическая геодезия и навигация».

Ключевые слова: ГЛОНАСС, беззапросные измерительные станции, координатно-временные определения, частотно-временные поправки, эфемеридно-временное обеспечение, траекторные измерения.

ABOUT APPLICATION OF SOFTWARE IMITATOR MODBIS24

Aleksandr S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor of the Department Metrology and Optical Production Technology, tel. (383)210-11-85, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Artem A. Karaush

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Prospect, Researcher at Time and Frequency Service, tel. (383)210-14-94, e-mail: karaush.a@mail.ru

Ekaterina A. Khanykova

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Prospect, Researcher at Time and Frequency Service, tel. (383)210-14-94, e-mail: hanikovak@mail.ru

The article discusses the problems of the formation of ephemeris-time provision for the domestic satellite navigation system GLONASS on the basis of zero-point technologies of trajectory measurements. The software simulator of the measuring information ModBis24, developed in FSUE «SNIIM», is a tool for investigating the metrological characteristics of the ephemeris-time

provision of GLONASS. ModBis24 in the educational process for students studying in the specialty «Standardization and metrology», «Space Geodesy and Navigation».

Key words: GLONASS, measuring stations, coordinate and time definition, time-frequency correction, ephemeris-time provision, trajectory measurements.

С 2002 г. модернизация отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС, в рамках федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» на 2002–2011 гг., проводилась по следующим направлениям.

Для формирования эфемеридно-временной информации системы стали использовать результаты *беззапросных кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений*.

Происходит смена старого поколения навигационных спутников ГЛОНАСС на *спутники нового поколения* ГЛОНАСС-М, ГЛОНАСС-К, ГЛОНАСС-К2, отличающихся принципиально новой компоновкой основных узлов аппарата.

Начинается *освоение межспутниковых измерительных радиолиний*, которые поддерживаются бортовой аппаратурой межспутниковых измерений (БАМИ).

В ФГУП «СНИИМ» для отработки новых технологий беззапросных траекторных измерений и для подготовки к летным испытаниям нового поколения навигационных спутников был разработан программный имитатор измерительной информации, поступающей от орбитальных группировок навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS [1].

Разработанный программный имитатор ModBis24 обеспечивает решение следующих задач.

1. Расчет орбитального движения навигационных спутников в условиях имитации действующих на спутник возмущений гравитационной природы и радиационного давления солнечного излучения.

2. Задание сети беззапросных измерительных станций в системах координат ПЗ 90.11 и WGS-84.

3. Расчет геометрических дальностей от навигационных спутников до беззапросных измерительных станций.

4. Расчет факторов различной природы, влияющих на точность траекторных измерений, включающих уходы бортовых и наземных часов, участвующих в измерениях, задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, факторы гравитационной и релятивистской природы, шумы измерений и другие факторы.

5. Имитацию кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений в соответствии с уравнениями [2, 3]

$$D = \rho(u_S, u_R) + \Delta T_S c + \Delta T_R c + \sum_{i=1}^9 p_i,$$

$$\varphi = \rho(u_S, u_R) + \Delta T_S c + \Delta T_R c + N\lambda + \sum_{i=1}^9 q_i.$$

Здесь $\rho(u_S, u_R)$ – геометрическая дальность, рассчитываемая из текущих значений координат навигационного спутника $u_S = [x_S, y_S, z_S]$ и положения беззапросной измерительной станции $u_R = [x_R, y_R, z_R]$; c – скорость распространения навигационного сигнала; ΔT_S и ΔT_R – уходы часов навигационного спутника и часов станции относительно момента шкалы времени Центрального синхронизатора системы [4, 5]; N – неоднозначность фазовых измерений; λ – длина волны несущей; $\sum_{i=1}^9 p_i, \sum_{i=1}^9 q_i$ – сумма факторов, влияющих на точность траекторных измерений (в их число включают задержку навигационного сигнала в тропосферном и ионосферном слоях атмосферы, смещения фазовых центров антенн излучающей и приемной аппаратуры, приливные эффекты, погрешности случайной природы и др.).

Для работы с имитатором ModBis24 разработан удобный пользовательский интерфейс (рисунок), позволяющий отображать текущее состояние орбитальной группировки навигационных спутников, задавать параметры движения навигационных спутников, параметры вращения Земли, параметры модели гравитационного поля Земли и другие условия проведения имитационного эксперимента.

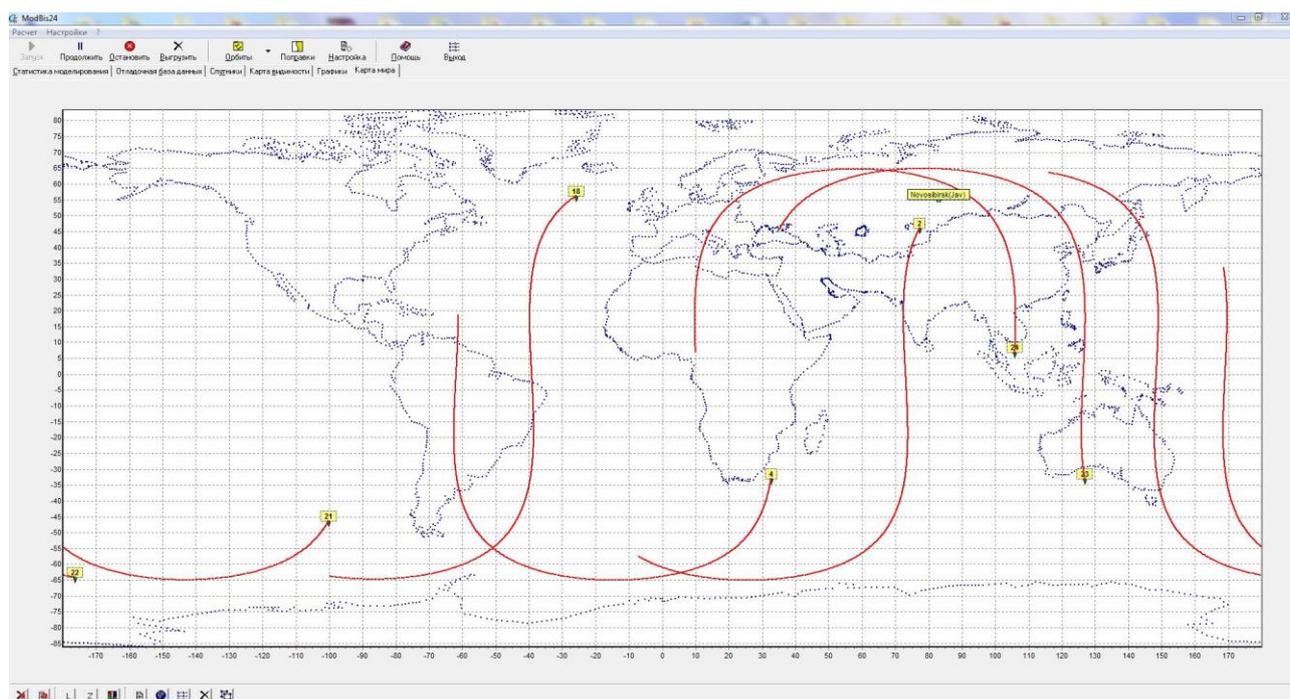


Рис. Построение движения навигационных спутников ГЛОНАСС с помощью программного имитатора ModBis24

Результаты имитационного эксперимента формируются в базы данных, содержащих информацию о геометрических дальностях от навигационных спутников до пунктов размещения наблюдений (Bis), значениях перечисленных

выше факторов, влияющих на точность псевдодальномерных кодовых и фазовых измерений, а также параметры движения навигационных спутников $x_S, y_S, z_S; V_{xS}, V_{yS}, V_{zS}$ заданной орбитальной группировки.

Имеется возможность последующей трансляции результатов имитационных экспериментов из базы данных в Excel для представления этих результатов в виде графиков и диаграмм и подготовки исходных данных для решения широкого круга задач координатно-временных определений на основе применения спутниковых навигационных технологий.

Перечисленные возможности программного имитатора ModBis24 делает его удобным средством для решения широкого круга исследовательских задач орбитальных методов космической геодезии [6].

В число таких задач входят:

- определение параметров движения навигационных спутников;
- исследование влияния факторов различной природы на точность результатов координатно-временных определений в условиях применения различных конфигураций в орбитальной группировки.

В режиме имитационного моделирования задач спутниковой навигационной системы возможно:

- решение задачи оценивания текущих значений бортовых шкал времени по данным траекторных измерений;
- решение задач координатно-временных определений в дифференциальном режиме;
- решение задач синхронизации пространственно-разнесенных часов на данным траекторных измерений.

Также программный имитатор ModBis24 используется в учебном процессе для дисциплин «Общая теория измерений», «Планирование и организация эксперимента» по специальности «Стандартизация и сертификация». Программный имитатор измерительной информации ModBis24 позволяет отрабатывать методики проведения траекторных измерений, обосновывать выбор математических моделей влияющих факторов, а также определять метрологические характеристики алгоритмов и методик оценивания параметров движения и текущих навигационных параметров навигационных спутников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимиров В. М., Гречкосеев А. К., Толстиков А. С. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 12–14.
2. Толстиков А. С., Ханькова Е. А., Карауш А. А. Оценивание эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС // 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. 2. – С. 8–13.
3. О метрологических характеристиках частотно-временной основы ГЛОНАСС / Е. А. Ханькова, А. С. Толстиков, А. С. Томилов, А. А. Карауш // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 211–215.

4. О влиянии нестабильности часов на точность координатно-временных определений спутниковых навигационных технологиях / А. С. Толстиков, А. С. Томилов, А. Р. Безродных, Э. О. Непомнящая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 36–40.

5. Толстиков А. С., Ханькова Е. А., Закорючкина Н. В. Оценивание уходов бортовых часов по данным траекторных измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 229–232.

6. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии. – М. : Недра, 1981. – 256 с.

© А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова, 2017

РОЛЬ ТРЕНДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПВЗ НА ТОЧНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, тел. (913)458-07-81, e-mail: tissen@ksn.ru

Галина Вячеславовна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

Александр Александрович Вараксин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии и технологии оптического производства, e-mail: aleksvaraksin1991@yandex.ru

В настоящей статье рассматриваются особенности изменений трех основных параметров вращения Земли (ПВЗ), к которым относятся координаты текущего положения Северного полюса: x_p , y_p и всемирное время $UT 1$.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, моделирование, погрешность, всемирное время, линия тренда.

THP TREND CHANGES AND THEIR IMPACT ON THE ACCURACY BUILD PREDICTIVE MODELS

Victor M. Tissen

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Prospect, Ph. D., tel. (913)458-07-81, e-mail: tissen@ksn.ru

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate Professor of the Department of Metrology and Technologies in Optical Instrumentation Certification, tel. (913)724-67-47, 361-07-45, e-mail: simgal@list

Alexander A. Varaksin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., graduate student of the Department of Metrology and Technologies of Optical Production, e-mail: aleksvaraksin1991@yandex.ru

This article discusses the features of change the three main parameters of the Earth's rotation (SLR), which include coordinates of the North pole:, and amendment of hours submitted in the form of a difference: where the world uneven time associated with the rotation of the Earth;. $UT 1$ the world uneven time.

Key words: rotation parameters of the Earth, modeling, accuracy, universal time, the trend line.

Интерес к данным ПВЗ всегда существовал во многих фундаментальных и прикладных науках о Земле. С появлением с середины 80-х годов прошлого столетия глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) потребность в точных данных ПВЗ еще больше возросла. Поэтому, создание высокоточных моделей вращения Земли для целей повышения точности КВО является важной и актуальной задачей.

Из трех ПВЗ наиболее трудно прогнозируемым параметром традиционно считается всемирное время. Это связано с тем, что наблюдаемые нерегулярные изменения всемирного времени за последние столетия существенно больше циклических вариаций, представленных сезонными и приливными колебаниями.

На рис. 1 приведен график изменений всемирного времени относительно динамического времени TT за период с 1656 по 2017 гг. Данные для построения графика взяты с сайтов IERS: http://maia.usno.navy.mil/ser7/historic_deltat.data и <http://maia.usno.navy.mil/>.

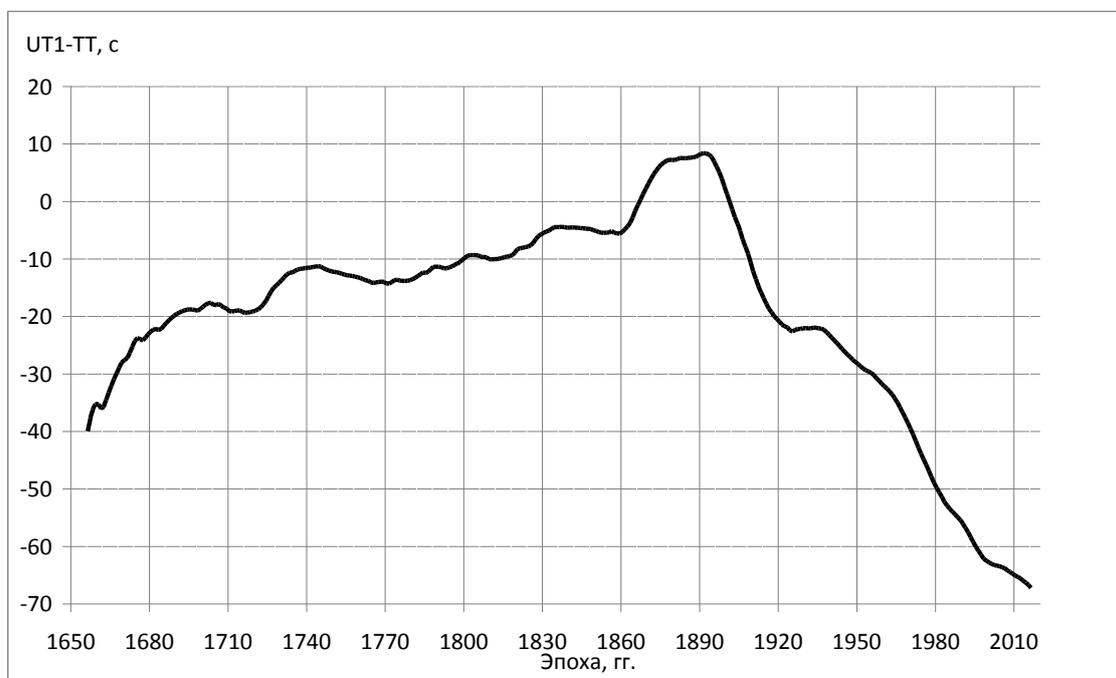


Рис. 1. Изменения всемирного времени за 360 лет

Анализируя график на рис. 1 можно отметить, что в период от начала истории астрономических наблюдений до конца 19 века скорость вращения Земли постепенно увеличивалась. Затем происходило ее резкое замедление, которое в виде волнообразных вариаций длительностями порядка 10–15 лет продолжается до настоящего времени. За последние 110 лет наблюдается не менее шести таких вариаций различной величины и направленности, которые, как и менее продолжительные длительностью в 1–2 года в настоящее время считаются непредсказуемыми изменениями тренда.

На рис. 2 приведены известные значения всемирного времени (красная линия) с января 2000 по 10 марта 2017 гг.

Черной линией показана линия тренда, полученная после вычитания из исходных данных всех периодических и квазипериодических колебаний длительностью менее 6 лет. Для наглядности линия тренда сдвинута по оси y на 1 сек. вверх. Часть линии тренда, выходящей за пределы интервала известных значений $dUT1$ является прогнозной.

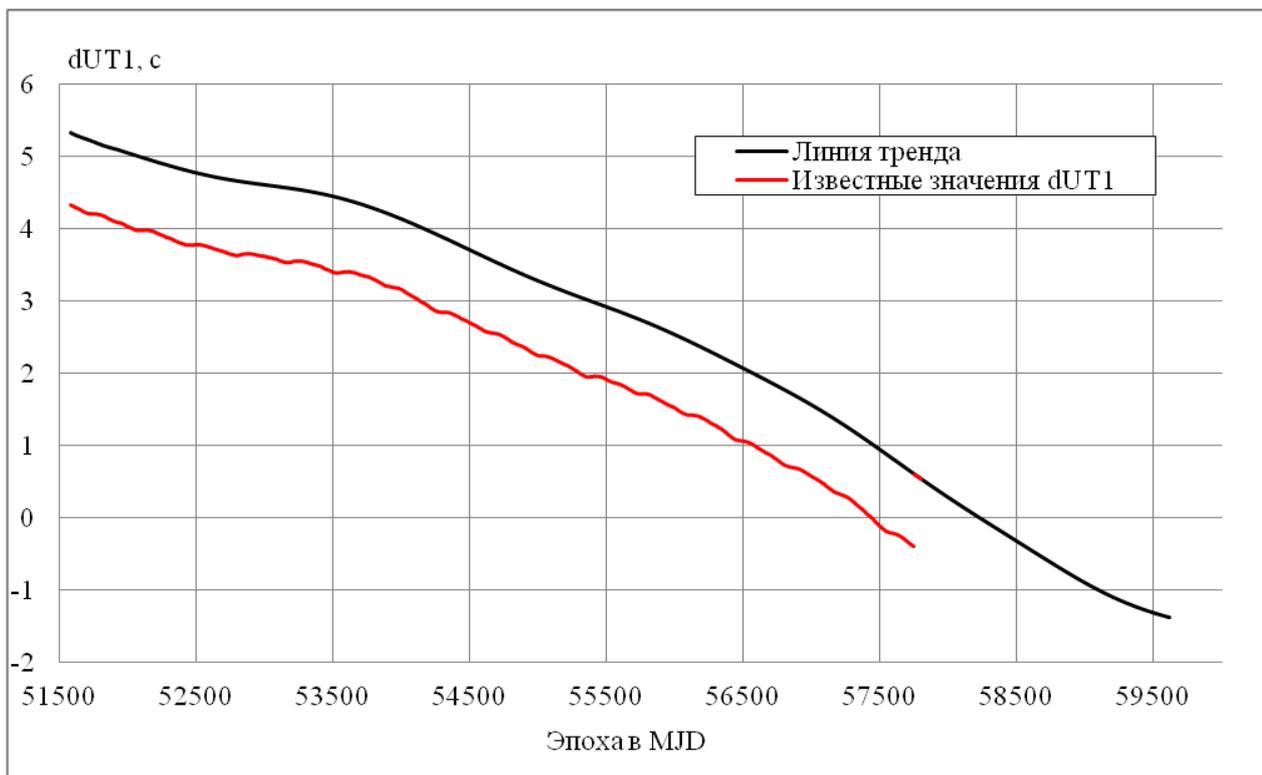


Рис. 2. Изменения всемирного времени с января 2000 г. по март 2017 г.

Анализируя график на рис. 2 следует отметить, что в сравнении с годовыми колебаниями изменения всемирного времени, вызываемые неустойчивостью параметров тренда значительно существеннее. При визуальной оценке общей картины, изменения тренда похожи на регулярные и создают впечатление, что могут быть предсказуемы. Но анализ результатов прогнозирования полученных разными методами показывает, что наибольшие ошибки прогнозов, возникают на участках где наблюдаются изменения наклона линии тренда. Тем не менее, использование интервалов большой длительности от нескольких десятилетий до 100 лет и более дает более правильный долгосрочный прогноз (от 1 года до 5 лет) любого ПВЗ. Показанный на рис. 2 прогноз тренда до 2022 г., получен нами с помощью полигармонической модели, параметры которой оценивались по известным значениям всемирного времени с 1900 по 2016 гг. Соответствующая методика приведена в [1].

В движении полюсов Земли в отличие от всемирного времени вариации тренда значительно менее заметны в сравнении с периодическими и квазипериодическими колебаниями. Это наглядно показано на рис. 3, на котором приведена картина изменений координат текущего полюса Земли x_p , относительно положения среднего полюса с 2000 по 2017 гг. Жирными линиями показана линия тренда и ее прогноз на 10 лет.

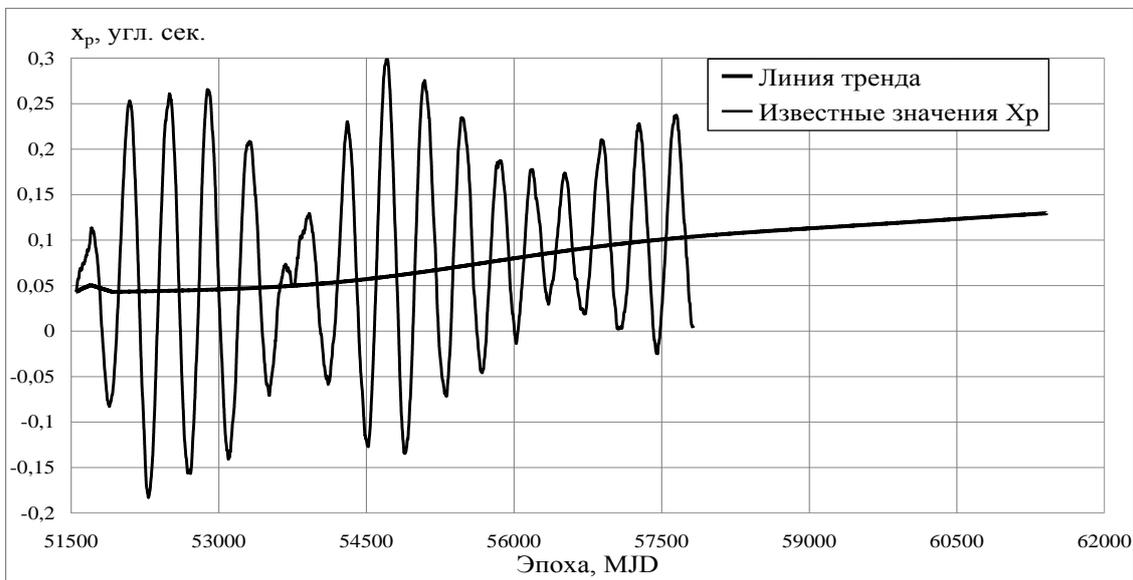


Рис. 3. Линия тренда координаты полюса x_p с прогнозом на 10 лет

Следует отметить, что показанный на рис. 3 прогноз тренда x_p получен комбинированным путем с помощью МНК при различных начальных условиях. При этом, для получения параметров тренда из полной модели отключались и подключались по определенному алгоритму отдельные группы гармонических компонент. Полученный прогноз тренда далее использовался для аппроксимации квазипериодических и периодических составляющих изменений координаты полюса x_p .

На рис. 4 показаны квазипериодические изменения координаты x_p на фоне ее известных значений, а также прогноз этих изменений до 2027 г.

Анализируя график на рис. 4 можно общий характер квазипериодических колебаний в пределах известных данных и в прогнозной части.

На рис. 5 показан прогноз координаты x_p (синим цветом) с 10 марта 2017 на 10 лет, полученный с применением полной гармонической модели. Коричневым цветом обозначены известные значения x_p .

Следует отметить, показанный на рис. 5 прогноз x_p получен также с применением МНК и его модификаций. Поэтому, он не может претендовать на абсолютную достоверность, поскольку получен эмпирическим путем. Тем не ме-

нее, в пределах обозначенного интервала можно ожидать хорошей сходимости результатов моделирования изменений x_p .

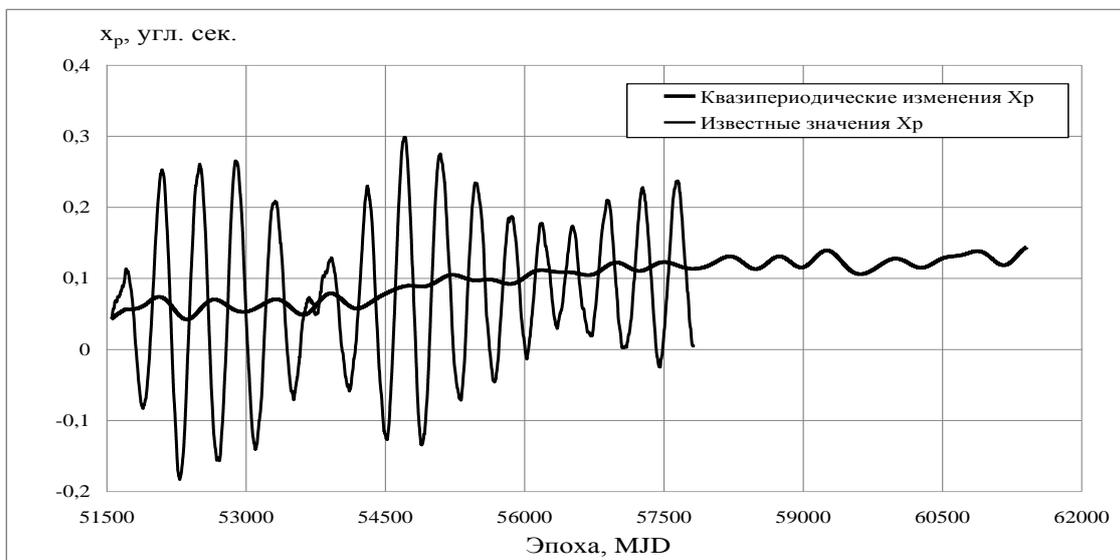


Рис. 4. Квазипериодические изменения координаты полюса x_p и ее известные значения с января 2000 по март 2017 гг. с прогнозом до 2027 г.

При моделировании движения полюса на интервалах данных различной длины нами установлено, что основной Чандлеровский период 1,191 года разделяется на две составляющие с периодами близкими 1,183 и 1,216 года и амплитудами порядка 130 и 50 мс. дуги соответственно. Кроме этого, выявлены колебания с периодами: 1,23 (27 мс.), 1,31 (18 мс.); 1,15 (15 мс.).

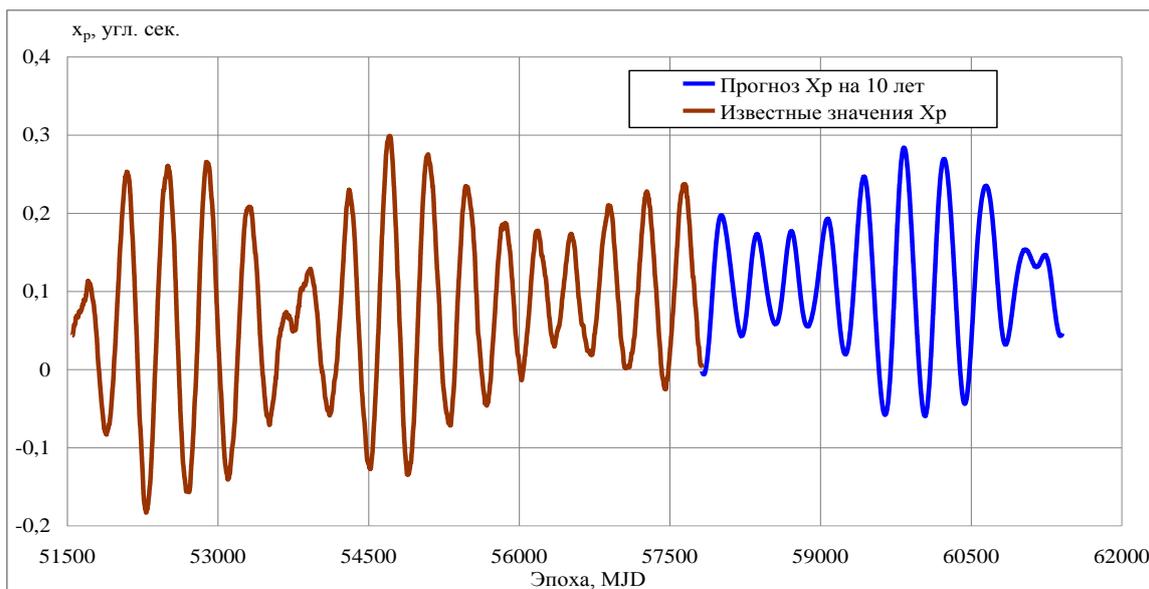


Рис. 5. Известные значения прогноз координаты полюса x_p до 2027 г.

В изменениях всемирного времени в отличие от координат полюса наблюдается значительно большее влияние долго периодических составляющих, среди которых наиболее заметны колебания с периодами около 70, 30, 20, 13 и 6 лет. Кроме этого, заметны циклы с периодами кратными основному Чандлеровскому колебанию полюса: 2,4; 3,6 и 4,8 года. Возможно, что эти периоды связаны с теми же природными факторами, которые вызывают перемещения земных полюсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокоточное прогнозирование всемирного времени по 100-летним данным / В. М. Тиссен, А. С. Толстикова, А. Ю. Балахненко, З. М. Малкин // Измерительная техника. – 2009. – № 12. – С. 3–6.

© В. М. Тиссен, Г. В. Симонова, А. А. Вараксин, 2017

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

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: prof.minin@gmail.com

Олег 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: prof.minin@gmail.com

Геннадий Владимирович Шувалов

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, директор, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Галина Вячеславовна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

Светлана Владимировна Ромасько

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. (383)361-07-45

В статье проведен анализ возможности создания акустической линзы с субдифракционным разрешением.

Ключевые слова: оптика, акустика, линза, дифракция.

ACOUSTIC LENS

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor of the Department of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor of the Department of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

Gennady V. Shuvalov

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Prospect, Ph. D., Director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., associate Professor of the Department of Metrology and Optical Instrumentation Technology, tel. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

Svetlana V. Romasko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., assistant of the Department of Metrology and Optical Instrumentation Technology, tel. (383)361-07-45

The article analyzes the possibility of creating an acoustic lens with subdi-fractional resolution.

Key words: optics, acoustics, lens, diffraction.

Задачей акустической линзы является сфокусировать звуковую волну в определенной точке пространства и не допустить рассеивание звука. Акустическая линза похожа по форме на оптическую линзу, однако выполнена из другого материала и наделена иными свойствами. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена обширным кругом задач, решаемых с помощью этого технического устройства, однако, недостатком известных акустических линз является большие габариты, относительный диаметр D/λ более 10–15, низкое пространственное разрешение, не превышающее дифракционного предела.

Для снижения потерь при прохождении звуковой волны через линзу используют различные формы изменения профиля (плавное, зональное, канальное). Изменение фокусного расстояния линзы может быть получено при использовании податливого материала. Изменение радиуса кривизны в этом случае формируется изменением давления внутри оболочки.

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/a)^2}$$

где a – радиус кривизны, r – расстояние от центра или оси линзы.

Известны различные акустические линзы для фокусировки упругих волн, материалом которых могут быть жидкие, твердые и газообразные вещества, при этом линзы могут иметь плоско-выпуклую поверхность, плоско-вогнутую, двояковыпуклую, двояковогнутую и выпукло-вогнутую поверхности [1], например, акустическая линза, содержащая тонкую звукопроницаемую оболочку, заполненную жидкой средой с двояковыпуклой или двояковогнутой поверхностью [1, 2] и жидкостная звуковая линза [3], выполненная из искусственного материала с переменным коэффициентом преломления, представляющая собой набор цилиндров в звукопроницаемой оболочке, заполненных рабочей жидкостью с диаметром сечения менее половины длины волны и расстоянием между цилиндрами менее длины волны.

Известна также надувная акустическая линза в тонкой резиновой оболочке наполненная углекислым газом с относительным диаметром $D/\lambda = 13.6$ на ча-

стоте 10 000 Гц в воздухе, при этом скорость звука в рабочей среде линзы меньше, чем скорость звука в окружающей среде [4].

В качестве объекта исследования выбрана акустическая линза, описанная в патенте РФ № 2192235, выполненная в виде оболочки из податливого материала с плосковогнутыми рабочими поверхностями, заполненной жидкостью, или оболочки с плосковыпуклыми рабочими поверхностями, заполненной углекислым газом. Такая акустическая линза позволяет осуществить фокусировку акустического излучения в жидкости или газе, однако имеет значительные габариты, определяемые, в основном, фокусным расстоянием акустической линзы и ее диаметром, при этом пространственное разрешение, не превышает дифракционного предела для заданных длины волны излучения, диаметра и фокусного расстояния линзы.

В статье рассматривается возможность устранения указанных недостатков, а именно значительное снижение габаритов акустической линзы при повышении пространственного разрешения.

Указанная задача решена благодаря тому, что в акустической линзе, содержащей оболочку из податливого материала, заполненной жидкостью, или оболочки, заполненной газом, предлагается выполнить оболочку устройства в форме кубика с размером ребра не менее $\lambda/2$ или в виде сферы с диаметром не менее λ , где λ длина волны излучения в окружающем пространстве линзы, а вещество, заполняющее оболочку имеет скорость звука относительно скорости звука в окружающей среде лежащего в диапазоне от 0.5 до 0.83.

Предлагаемая акустическая линза, обеспечивает также актуальное расширение приборного арсенала современных акустических устройств фокусировки излучения с субволновыми размерами.

На рисунке показаны результаты моделирования газовой акустической линзы в виде куба в воздухе с относительной скоростью звука в материале линзы равного 0.68 и сферической жидкостной акустической линзы в воде с относительной скоростью звука в материале линзы равного 0.68.

На рисунке видно, «фотонная струя» [5–6] возникает в области теневой поверхности мезомасштабной линзы, непосредственно у границы раздела материалов с различной скоростью звука и характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью акустического сигнала в области фокусировки, при этом достижимо пространственное разрешение ниже дифракционного предела.

Достоинством предложенной акустической линзы является возможность фокусировки акустического излучения в газе или жидкости с поперечными размерами порядка $\lambda/3$ непосредственно за устройством формирующего «фотонную струю» и протяженностью 2–10 λ .

В результате проведенных исследований было установлено, что локализация поля типа «фотонная струя» у кубика начинается с размера грани 0.5 длины волны используемого излучения. В то время как у сферы при таком диаметре на одной поляризации локализация поля еще не выделена. При этом максимальная интенсивность поля на оси у кубика выше, чем у сферы в 1.4 раза.

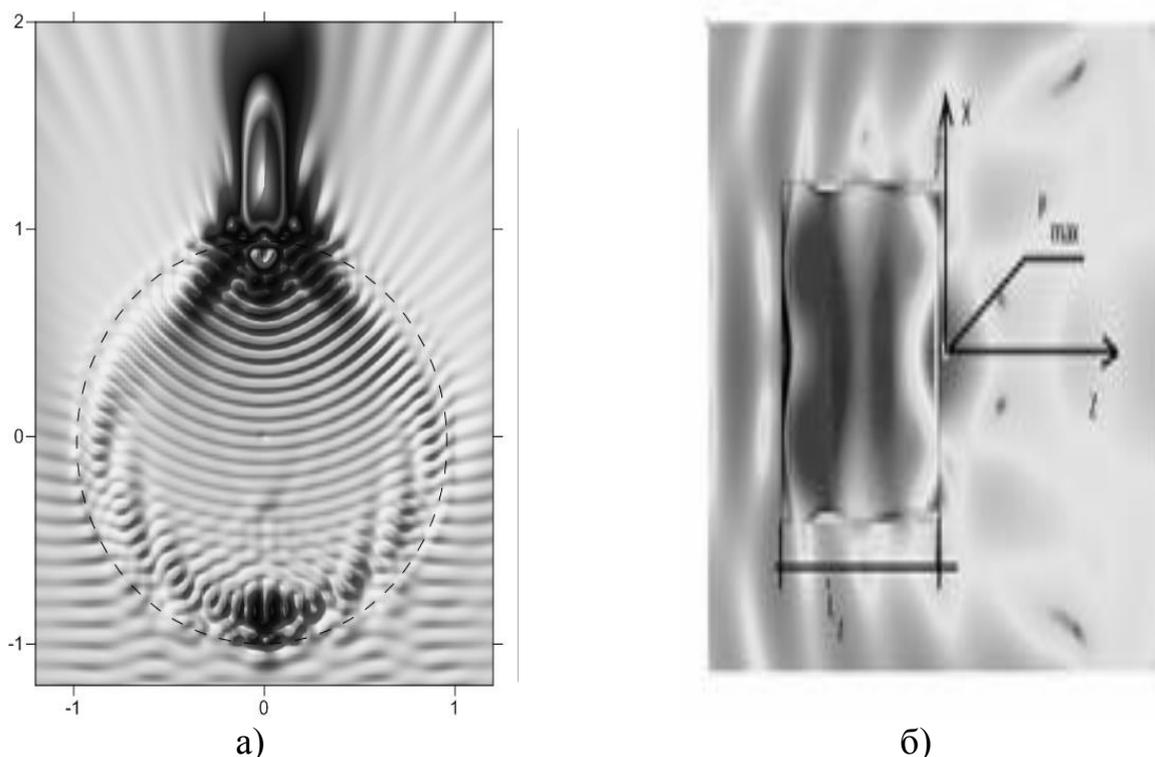


Рис. Результаты моделирования газовой акустической линзы в виде:
 а) куба в воздухе на различных материалах с относительной скоростью звука в материале линзы равного 0.68; б) сферической жидкостной акустической линзы в воде с относительной скоростью звука в материале линзы равного 0.68

Для характерных размеров кубика и сферы менее $\lambda/2$ «фотонная струя» не формируется.

При относительной скорости звука в рабочем веществе линзы менее 0.83, формируемая «фотонная струя» не обеспечивает эффективной концентрации акустического излучения и примерно более 0.5, «фотонная струя» формируется внутри линзы.

Для акустической линзы предназначенной для работы, например, в воздухе при 0 °С (скорость звука 331 м/с), в качестве рабочей среды можно использовать:

- хлор (скорость звука 206 м/с) относительная скорость звука 0.62;
- пары эфира (скорость звука 179 м/с) относительная скорость звука 0.54;
- пары спирта (скорость звука 230 м/с) относительная скорость звука 0.69;
- оксид углерода (скорость звука 260 м/с) относительная скорость звука 0.785 и т. д.

Для акустической линзы предназначенной для работы в жидкости, например, в воде при 25 °С (скорость звука 1490 м/с), в качестве рабочей среды можно использовать:

- метиловый спирт (скорость звука 1143 м/с) относительная скорость звука 0.767;

– четыреххлористый углерод (скорость звука 926 м/с) относительная скорость звука 0.62;

– эфир (скорость звука 985 м/с) относительная скорость звука 0.66, этиловый спирт (скорость звука 1180 м/с) относительная скорость звука 0.79,

Для твердых сред может использоваться звукопроводящий диэлектрик рексолит (скорость звука 2311 м/с) относительная скорость звука 0.645 и т. д.

В качества материала оболочки может использоваться, например, латексная резина.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каневский И. Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. – М. : Наука, 1977. – С. 3–36.

2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – С. 176–178.

3. Патент РФ № 441976.

4. Cleon E. Dean and Kendez Parker A ray model of sound focusing with a balloon lens: An experiment for high school students // J. Acoust. Soc. Am. 131 (3), Pt. 2, March 2012, pp. 2459–2462.

5. Chen Z., Taflove A., Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visiblelight ultramicroscopy technique // Optics Express, 12, № 7, 2004, pp. 1214–1220.

6. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.

© И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, Г. В. Симонова, С. В. Ромасько, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>А. А. Зубов, Е. А. Елкин, А. А. Майоров.</i> Проблемы использования оптико-электронных систем измерения параметров движения для создания спортивных обучающих программ	3
2. <i>А. И. Пеньковский, М. В. Фаттахова.</i> Экспрессные методы измерения показателя преломления и дисперсии моторных топлив.....	8
3. <i>С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов.</i> Быстродействующий неохлаждаемый тепловой приемник ИК-излучения	13
4. <i>М. П. Егоренко, В. С. Ефремов, И. А. Катков.</i> Перспективы применения технологии 3D печати в разработке оптических систем видеокамер нанодронов	19
5. <i>Г. А. Сырецкий.</i> Робототехника и автоматизация производства: современное состояние.....	24
6. <i>И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов.</i> Пороги цветоразличения в модели RGB с глубиной цвета 8 бит	30
7. <i>А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилор.</i> Возможности интерферометрического исследования термодформаций зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» в условиях термобарокамеры на основе применения асферо-голограммного пробного стекла из церодура.....	36
8. <i>А. В. Макеев, В. С. Айрапетян.</i> Спекл-эллипсометрия шероховатых поверхностей с применением вейвлет-анализа.....	41
9. <i>Д. Г. Макарова, А. А. Болотин.</i> Адаптивная жидкостная оптическая система терагерцового диапазона спектра для медицинской аппаратуры	46
10. <i>И. Н. Куропятник.</i> Использование лазерного радара для определения координат центра масс изделий	53
11. <i>Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов, В. Э. Карлин, Д. Р. Хакимов, М. С. Кравченко, В. В. Уржумов.</i> Высокопроизводительный метод контроля боковой поверхности цилиндрических объектов с определением глубины дефектов	58
12. <i>Г. М. Жаркова, С. А. Стрельцов.</i> Формирование дифракционных решеток в полимерно-жидкокристаллических композитах методом поляризационной голографии	66
13. <i>Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков.</i> Высокопроизводительный контроль глубины поверхностных дефектов методами низкокогерентной интерферометрии.....	72

14. <i>В. С. Ефремов, Д. Г. Макарова, В. Б. Шлишевский.</i> Вариообъектив с жидколинзовой системой изменения фокусного расстояния	77
15. <i>А. П. Гурьев, А. Г. Бедрин, И. С. Миронов.</i> Источники света для теплофизических исследований материалов	82
16. <i>М. А. Гришин, Е. Д. Булушев, В. П. Бессмельцев.</i> Моделирование импульсной лазерной абляции алюминия в условиях образования и нагрева плазмы	89
17. <i>А. С. Задорин, А. А. Лукина.</i> Режим резонанса бегущей волны в оптическом дисковом микрорезонаторе оптоэлектронного автогенератора	94
18. <i>Е. А. Панков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова.</i> Повышение технологичности конструкции транспортного самолета за счет модернизации монтажа системы воздушного охлаждения с использованием системы электронного моделирования	100
19. <i>А. В. Бритвин, Ю. Д. Коломников, Н. С. Никитенко, В. Ф. Плюснин, Б. В. Поллер, А. Б. Поллер, Ю. И. Щетинин.</i> Экспериментальные характеристики планарно-волоконных преобразователей ультрафиолетовых сигналов для лазерных систем мониторинга наземных объектов	106
20. <i>Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, С. П. Подъячев.</i> Цифровая обработка жидкокристаллических изображений полей температур и поверхностного трения	111
21. <i>И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко.</i> Генерация динамических тепловизионных изображений в ближнем и дальнем ИК диапазонах	117
22. <i>Линь Ли, А. И. Блошкина, Ф. А. Губарев.</i> Анализ динамики прозрачности жидкой среды методом цифровой корреляции спекл-изображений	122
23. <i>Г. В. Симонова, И. Н. Шарыпова.</i> Влияние окисных пленок на результаты измерений переходных сопротивлений	127
24. <i>С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко.</i> Математическая модель имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ	131
25. <i>А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова.</i> О применении программного имитатора ModBis24	138
26. <i>В. М. Тиссен, Г. В. Симонова, А. А. Вараксин.</i> Роль трендовых изменений ПВЗ на точность построения прогностических моделей	143
27. <i>И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, Г. В. Симонова, С. В. Ромасько.</i> Оценка параметров акустической волны	149

CONTENTS

1. <i>A. A. Zubov, E. A. Yolkin, A. A. Mayorov.</i> Problems In Using of Electronic Optical Sitems to Measure Motion Parametr for Creating Sports Training Programms.....	3
2. <i>A. I. Penkovsky, M. V. Fattakhova.</i> Express Methods of Measuring Index of Refraction and Dispersion of Motor Fuels	8
3. <i>S. D. Ivanov, E. G. Kostsov.</i> Fast Response Uncooled Thermal Ir-Radiation Detector.....	13
4. <i>M. P. Egorenko, V. S. Efremov, I. A. Katkov.</i> Perspectives of Technology 3D Printing in the Development of Optical Systems Camera Nanodrons.....	19
5. <i>G. A. Syretsky.</i> Robotechnics and Automation of Manufacturing: Modern State	24
6. <i>I.G. Palchikova, E. S. Smirnov.</i> Discrimination Thresholds of the RGB Model with Depth of 8 Bit Colour	30
7. <i>A. V. Lukin, A. N. Melnikov, A. F. Skochilov.</i> Interferometric Study's Features of Thermal Deformation of «Millimetron» Telescope's Convergent Mirror Using the Aspheric and Holographic Test Glass Made of Zerodur Under Thermal Vacuum Chamber.....	36
8. <i>A. V. Makeev, V. S. Hayrapetyan.</i> Speckle Ellipsometry of Rough Surfaces Using the Wavelet Analysis	41
9. <i>D. G. Makarova, A. A. Bolotin.</i> Adaptive Optical Liquid System of Spectrum Terahertz Range for Medical Devices	46
10. <i>I. N. Kuropyatnik.</i> Application of Laser Radar for Determination of the Mass Center Coordinates of Products.....	53
11. <i>L. V. Finogenov, P. S. Zavyalov, V. E. Karlin, D. R. Khakimov, M. S. Kravchenko, V. V. Urzhumov.</i> A High-Performance Inspection Method of Cylindrical Object Lateral Surface with Defect Depth Determination.....	58
12. <i>G. M. Zharkova, S. A. Streltsov.</i> Generation of the Diffraction Gratings in Polymer-Liquid Crystal Composites by the Polarization Holography Method.....	66
13. <i>E. V. Sysoev, I. A. Vykhristyuk, R. V. Kulikov, V. V. Shirokov.</i> High-Performance Inspection of Surface Defects Depth Using the Low Coherence Interferometry Methods	72
14. <i>V. S. Efremov, D. G. Makarova, V. B. Shlishevsky.</i> Variolens with the Liquid System of Focus Distance Change	77
15. <i>A. P. Guriev, A. G. Bedrin, I. S. Mironov.</i> Light Sources for Thermophysical Research of Materials.....	82

16. <i>M. A. Grishin, E. D. Bulushev, V. P. Bessmeltsev.</i> Modeling of Pulsed Laser Ablation of Aluminum in Conditions of Both Plasmas Formation and Heating.....	89
17. <i>A. S. Zadorin, A. A. Lukina.</i> Resonance Mode of the Traveling Wave in the Optical Disk Microresonator of the Optoelectronic Oscillator.....	94
18. <i>E. A. Pankov, T. V. Larina, E. Yu. Kutenkova.</i> Processability Improvement of Transport Aircraft Construction.....	100
19. <i>A. V. Britvin, Yu. D. Kolomnikov, N. S. Nikitenko, V. F. Plyusnin, B. V. Poller, A. B. Poller, Yu. I. Shchetinin.</i> Experimental Characteristics of a Planar-Fiber Converters of UV Signals for the Laser Monitoring Systems of Ground Objects	106
20. <i>G. M. Zharkova, V. N. Kovrizhina, S. P. Podjachev.</i> Digital Processing of Liquid Crystals Images of Temperature and Skin Friction Fields.....	111
21. <i>I. S. Gibin, V. I. Kozik, E. S. Nezhevenko.</i> Generation of Dynamic Thermovision Images in Near and Far Ir Ranges	117
22. <i>Lin Li, A. I. Bloshkina, F. A. Gubarev.</i> Liquid Transparency Changing Dynamic Sestimation by Means of Digital Speckle Correlation	122
23. <i>G. V. Simonova, I. N. Sharipova.</i> Influence of the Oxide Layers on the Measurement Results of Transien Resistances	127
24. <i>S. V. Savelkaev, S. V. Romasko, V. A. Litovchenko.</i> Mathematical Model of the Imitator of Analyzer of Amplifiers and Autogenerators Microwave.....	131
25. <i>A. S. Tolstikov, A. A. Karaush, E. A. Khanykova.</i> About Application of Software Imitator ModBis24	138
26. <i>V. M. Tissen, G. V. Simonova, A. A. Varaksin.</i> Thp Trend Changes and Their Impact on the Accuracy Build Predictive Models	143
27. <i>I. V. Minin, O. V. Minin, G. V. Shuvalov, G. V. Simonova, S. V. Romasko.</i> Acoustic Lens.....	149

Научное издание

XIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017

Международная научная конференция

СибОптика-2017

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Е. М. Федяевой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 09.06.2017. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 9,2. Тираж 100 экз. Заказ .

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

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