

МЕТОД КОГЕРЕНТНОГО КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ГОЛОГРАММНЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Колочкин¹, Е.Ю. Злоказов², С.Б. Одинокоев¹, В.Е. Талалаев¹, И.К. Цыганов¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия,

Аннотация

Защитные голограммы применяются в качестве элементов, подтверждающих подлинность документов и различной продукции. Качество защитных голограмм в значительной степени зависит от глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов. Авторами статьи предлагается метод контроля качества защитных голограмм, основанный на непрямых измерениях параметров микрорельефа. В статью представлены результаты теоретических исследований предложенного метода.

Ключевые слова: голография, дифракционные решётки, теория дифракции, голографические оптические элементы, дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Колочкин, В.В. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В.В. Колочкин, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев, В.Е. Талалаев, И.К. Цыганов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 515-520. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-515-520.

Введение

Защитные голограммы находят широкое применение как защитные элементы ценных бумаг, документов, а также различных изделий. В связи с этим тиражи радужных голограмм – защитных голограмм (ЗГ) исчисляются сотнями тысяч. Для серийного производства ЗГ широко применяется технология горячего тиснения лавсановой бумаги при помощи никелевой мастер-матрицы. [1] Дефекты мастер-матрицы, связанные с её износом при тиражировании, в значительной степени сказываются на качестве производимых голограмм. При этом снижается точность отображения эффектов, заложенных в дизайн сцен ЗГ на стадии их разработки, искажаются скрытые изображения, частично или полностью пропадают микротексты и микроизображения. Поэтому перед нанесением ЗГ на продукцию возникает необходимость контроля тиража ЗГ.

В настоящее время нет единого мнения к подходу в оценке качества защитных голограмм. Поскольку радужная голограмма формирует изображение для наблюдения его человеком, то о качестве мастер-матриц и ЗГ можно судить на основе экспертной оценки формируемых ими изображений. Такой метод достаточно широко используется на практике. Недостатком этого метода является субъективность оценок качества.

Целью настоящей работы является разработка метода, позволяющего осуществлять объективную оценку качества ЗГ. Защитные голограммы состоят из набора голографических оптических элементов (ГОЭ) и дифракционных оптических элементов (ДОЭ), представляющих собой элементарные фазовые отражательные дифракционные решётки (ДР). О качестве защитных голограмм можно судить по соответствию значений параметров рельефа этих решёток эталонным. Под эталонными ДР можно понимать решётки, которые были заложены в дизайн мастер-матриц на стадии их разработки, или решётки, параметры кото-

рых были измерены на заведомо отобранных образцах мастер-матриц.

Качество конкретного образца ЗГ зависит от значений основных параметров ДР. Такими основными параметрами элементарной ДР – голопикселя являются:

- пространственная частота ν_x или период $T = 1/\nu_x$;
- глубина α фазового рельефа;
- количество N периодов в голопикселе;
- ориентация ϕ ДР.

Так как период решёток имеет значение порядка 1 мкм, то для контроля перечисленных параметров иногда применяют метод, основанный на прямом измерении с использованием микроскопов, в том числе конфокальных или атомно-силовых микроскопов [2]. Недостатками этого метода являются трудоёмкость и длительность проведения измерений параметров профиля, а также дороговизна измерительного оборудования.

Альтернативой методу прямых измерений является косвенный метод измерения, когда о параметрах ДР можно судить на основе анализа дифракционного распределения. В [3] предлагается методика контроля, в которой качество ЗГ оценивается вектором, составляющими которого являются: период дифракционной решётки, её ориентация, угловая селективность и дифракционная эффективность. В работе [3] не приведены количественные соотношения, характеризующие связь вектора с параметрами рельефа.

В настоящей статье приводятся результаты исследований, позволяющие по параметрам дифракционного распределения оценивать параметры поверхностного микрорельефа голографических и дифракционных оптических элементов.

Известно, что:

- при заданной длине волны λ и угле α падения волнового фронта на ДР распределение интенсивности по порядкам дифракции на фазовой отражающей ДР зависит от глубины α' фазового рельефа;
- при заданной длине волны λ и угле α падения волнового фронта на ДР значение углового рас-

пределения $\beta_{\pm 1}$ дифракционных порядков зависит от периода T (пространственной частоты ν_x);

- при нормальном падении волнового фронта на ДР ориентация плоскости, в которой находятся порядки дифракции, зависит от угловой ориентации ϕ ДР;

- угловой размер $\Delta\beta_{\pm 1}$ распределения интенсивности в порядках дифракции зависит от количества периодов N в голопикселе.

Следовательно, измерив значение дифракционной эффективности, а также направление и угловой размер дифракционных порядков, можно однозначно оценить параметры ДР. Наш метод определения глубины дифракционных решёток основан на многовариантном анализе зависимости значения распределения интенсивности от глубины рельефа.

1. Дифракция на отражающей дифракционной решётке

Известны математические выражения, описывающие в рамках скалярной теории процесс дифракции на отражающей фазовой дифракционной решётке (ФДР) [4, 5]. Рис. 1 поясняет возникновение фазового набега при дифракции на синусоидальной отражательной ФДР.

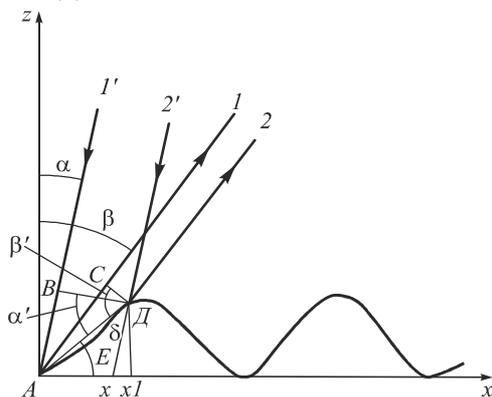


Рис. 1. Иллюстрация фазового набега при дифракции на синусоидальной отражательной фазовой дифракционной решётке

Уравнение поверхности ФДР можно представить в виде:

$$z = A \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{T} \right) = 2A \sin^2 \frac{\pi x}{T}, \quad (1)$$

где A и T – амплитуда и период синусоидального профиля соответственно.

В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля каждая точка падающего волнового фронта, становясь источником вторичных волн, создаёт в рассматриваемом направлении наблюдения волну, амплитуда которой равна

$$U = U_0 \int_0^{NT} e^{ik\Delta_x} dx, \quad (2)$$

где U_0 – амплитуда падающей плоской волны, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, Δ_x – оптическая разность хода между лучами 1 и 2, дифрагированными от рельефа ДР, N – число штрихов профиля.

Учитывая периодичность профиля, можно записать

$$\Delta_x = \Delta_{1x} + j\Delta_0, \quad (3)$$

где Δ_{1x} – значение оптической разности хода в пределах одного периода, Δ_0 – оптическая разность хода для точек профиля, отстоящих по оси X на величину, кратную периоду T . Тогда соотношение (2) примет вид:

$$U = U_0 \cdot \int_0^T e^{ik\Delta_{1x}} dx \cdot \sum_{j=0}^N e^{ikj\Delta_0}. \quad (4)$$

Выражение (4) можно представить в виде

$$U = U_0 \cdot U_1 \cdot U_2, \quad (5)$$

где

$$U_1 = \int_0^T e^{ik\Delta_{1x}} dx, \quad (6)$$

$$U_2 = \sum_{j=0}^N e^{ikj\Delta_0}, \quad (7)$$

$$\Delta_0 = T(\sin \alpha + \sin \beta). \quad (8)$$

Тогда распределение интенсивности в дифракционном распределении представим как

$$I = I_0 \cdot I_1 \cdot I_2, \quad (9)$$

где

$$I_1 = |U_1|^2, \quad (10)$$

$$I_2 = |U_2|^2 = \frac{\sin^2 \left(\pi \frac{N\Delta_0}{\lambda} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\pi\Delta_0}{\lambda} \right)}, \quad (11)$$

$$I_0 = |U_0|^2 - \text{интенсивность падающей волны.} \quad (12)$$

2. Результаты расчётов

На основе приведённых выше математических выражений, основанных на приближениях скалярной теории дифракции, была разработана программа и выполнены исследования зависимости перечисленных параметров дифракционного распределения от параметров ДР с гармоническим фазовым распределением. Результаты расчётов представлены в виде графиков.

На рис. 2 представлено угловое распределение составляющей интенсивности в порядках дифракции при периоде дифракционной решётки 1,5 мкм и длине волны излучения 600 нм.

На рис. 3 и 4 для различных длин волн излучения представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-м порядке дифракции излучения от глубины рельефа ДР при нормальном падении излучения. Зависимости представлены для излучения с длинами волн 400, 500, 600, 650, 700 нм.

На рис. 5 в качестве примера представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1-м порядке дифракции от глубины рельефа ДР при падении излучения под углом 39°. Зависимости представлены для излучения с длинами волн 400, 500, 600, 700 нм.

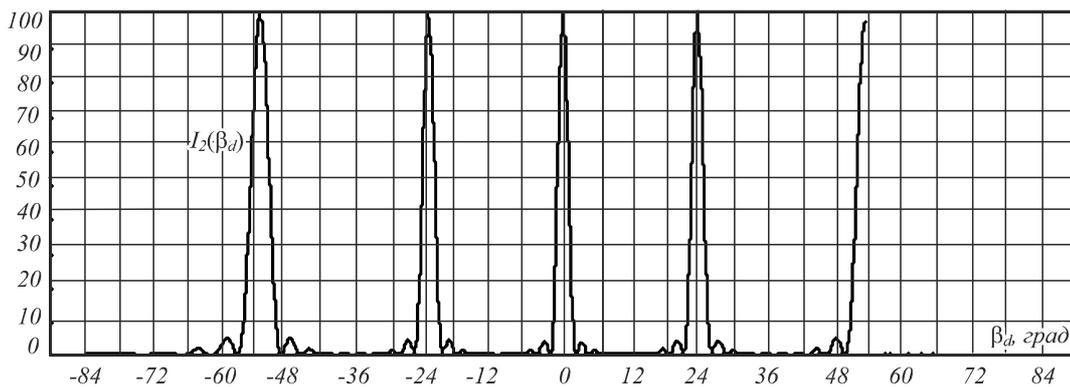


Рис. 2. Распределение составляющей интенсивности в порядках дифракции

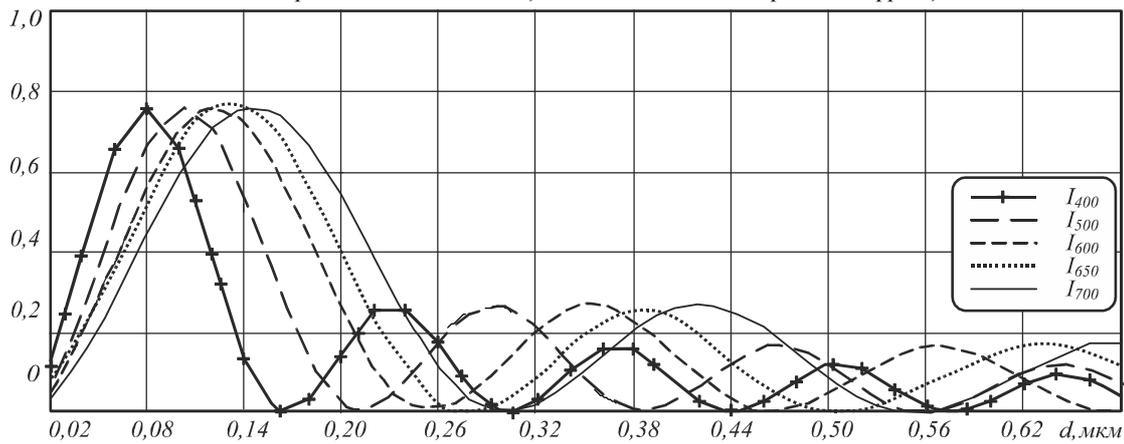


Рис. 3. Распределение интенсивности при T = 1,5 мкм

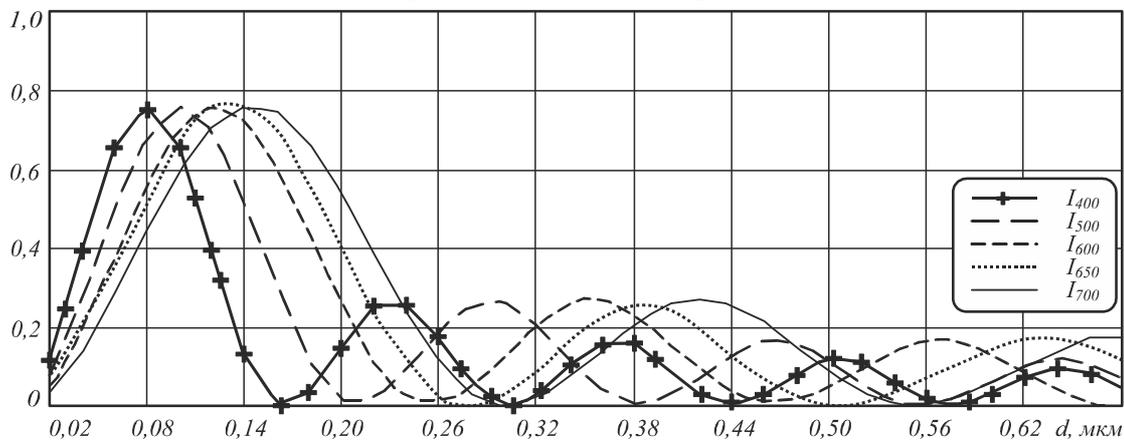


Рис. 4. Распределение интенсивности при T=1 мкм

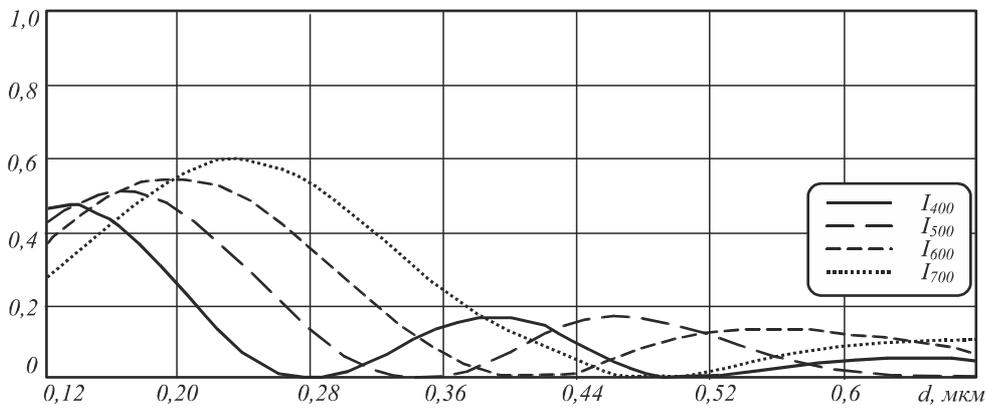


Рис. 5. Распределение интенсивности при T=1 мкм при угле падения 39°

На рис. 6 в качестве примера представлены графики зависимости распределения интенсивности в 1 и 2 порядках дифракции от глубины рельефа ДР при падении излучения под углом 60° . Зависимости представлены для излучения с длиной волны 405 нм.

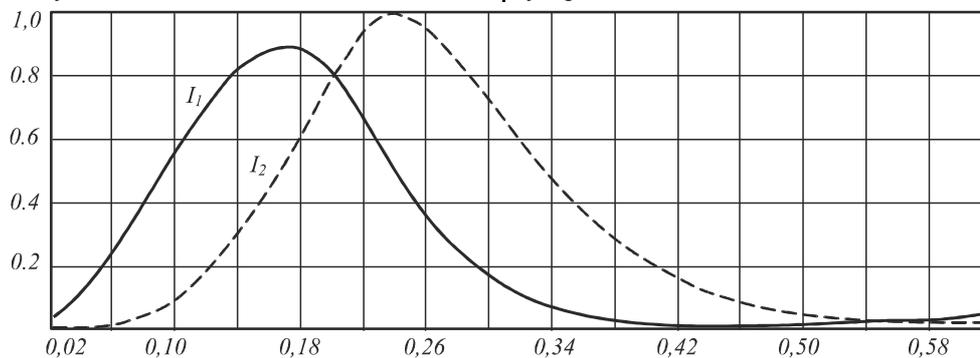


Рис. 6. Распределение интенсивности при $T=1$ мкм при угле падения 60°

Для повышения точности предлагаемого метода предлагается использовать отношение R распределения интенсивностей 1 и 2 порядков дифракции. График зависимости отношения распределения интенсивностей $R(d)$ от глубины рельефа представлен на рис. 7. Из графика можно видеть, что метод может быть использован для защитных голограмм с глубиной микрорельефа до 0,45 мкм.

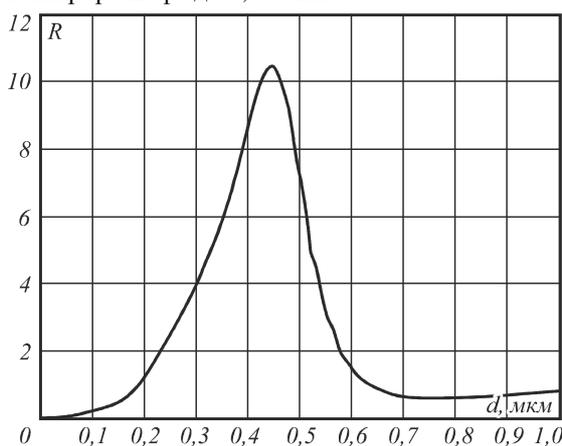


Рис. 7. Отношение распределений интенсивности 1-го и 2-го порядков дифракции

Функциональная схема устройства контроля глубины поверхностного микрорельефа защитных голограмм, основанного на предложенном методе, представлена на рис. 8.

Принцип действия устройства представляется следующим образом. Излучение от лазерного диода падает под углом α на контролируемый образец ДООЭ. Порядки дифракции регистрируются фотоприёмными устройствами (ФПУ).

Заключение

Проведённые теоретические исследования подтверждают возможность контроля качества защитных голограмм с использованием предложенного метода косвенного измерения параметров фазовых дифракционных решёток. Получены зависимости, устанавливающие связь между параметрами дифракционного

Зная теоретические расчёты зависимости, можно измерить глубину микрорельефа, зарегистрировав значение интенсивности излучения в 1 и 2 порядках дифракции с помощью фотоприёмного устройства.

распределения и параметрами поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов.

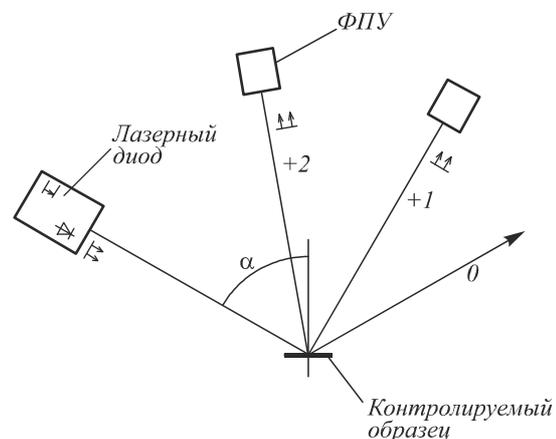


Рис. 8. Зависимость углового размера 1 порядка от угла падения α

Благодарности

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения проектной части государственного задания (проект № 3.1426.2014К).

Литература

1. **Kolyuchkin, V.V.** Correlation method for quality control of master matrix used for embossing security holograms / V.V. Kolyuchkin, A.Yu. Zherdev, E.Yu. Zlokazov, D.S. Lushnikov, S.B. Odinsonov, A.V. Smirnov // Holography: Advances and Modern Trends III, Proceedings of SPIE. – 2013. – Vol. 8776 – P. 87760A.
2. **Бессемельцев, В.П.** Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии / В.П. Бессемельцев // XI международная конференция Голоэкспо-2014: сборник научных трудов. – 2014. – С. 50-53.
3. **Беляцкий, М.А.** Устройство и алгоритм проверки подлинности защитных голограмм / М.А. Беляцкий, Ю.Д. Карякин, Р.В. Телятников, М.Л. Чиканова, И.П. Шумский // XI международная конференция Голоэкспо-2014: сборник научных трудов. – 2014. – С. 64-67.

4. **Хорохоров, А.М.** Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решёток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений / А.М. Хорохоров, А.М. Клишук, И.К. Цыганов, С.Б. Одинок, А.Ф. Ширанков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2005. – № 4. – С. 13-26.
5. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; под ред. Г.П. Мотулевич. – Изд. 2-е. – М.: Наука, 1973. – С. 341-362.
- [2] Bessmeltsev VP. Quality control reflecting holograms by confocal microscopy [In Russian]. XI International Conference Holoexpo-2014; 2014: 50-3.
- [3] Beliatski MA, Kariakin YD, Tsialiatnikau RU, Chykanava ML, Shumsky IP. Device and algorithm of the authenticity control of security holograms [In Russian]. XI International Conference Holoexpo-2014; 2014: 64-7.
- [4] Khorokhorov AM, Klishyuk AM, Tsiganov IK, Odinokov SB, Shirankov AF. Analysis of phase diffractive grating parameters influence on light distribution for creating color coded images [In Russian]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering; 2005; 4: 13-26.
- [5] Born M, Wolf E. Principles of Optics [In Russian], 2nd edition, ed by Motulevich GP. Moscow: "Science" Publisher; 1973: 341-62.

References

- [1] Kolyuchkin VV, Zherdev AYU, Zlokazov EYu, Lushnikov DS, Odinokov SB, Smirnov AV. Correlation method for quality control of master matrix used for embossing security holograms. Holography: Advances and Modern Trends III, Proc of SPIE 2013; Vol. 8776: 87760A.

A COHERENT MEASUREMENT METHOD FOR CHECKING THE SURFACE MICRORELIEF DEPTH IN HOLOGRAPHIC AND DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

V.V. Kolyuchkin¹, E.Yu. Zlokazov², S.B. Odinokov¹, V.Ye. Talalaev¹, I.K. Tsyganov¹

¹Bauman Moscow State Technical University,

²National Research Nuclear University MEPHI

Abstract

Security holograms have been widely used for document and product authenticity protection. The quality of security holograms and master-matrices significantly depends on the perfection of the diffraction grating. The authors introduce a method for checking the security hologram quality based on indirect measurements of diffraction grating parameters. Theoretical results concerned with the use of this method for microrelief quality control are discussed.

Keywords: holography, diffraction gratings, diffraction theory, holographic optical elements, diffractive optical elements.

Citation: Kolyuchkin VV, Zlokazov EYu, Odinokov SB, Talalaev VYe, Tsyganov IK. A coherent measurement method for checking the surface microrelief depth in holographic and diffractive optical elements. Computer Optics 2015; 39(4): 515-20. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-515-520.

Acknowledgments: The research was carried out at BMSTU with the financial support from the RF Ministry of Education and Science as part of the government order "Organization of scientific research" and project # 3.1426.2014K.

Сведения об авторах

Колочкин Василий Васильевич, 1988 года рождения, в 2012 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет около 15 научных работ в области оптико-электронной обработки информации и голографии. Специализируется в области оптической обработки информации и голографии.

E-mail: vkoluchkin@yandex.ru.

Vasily Vasilievich Kolyuchkin (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012. Post-graduate of Laser and Optical-Electronic Systems department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications in the field of design of optical and holographic systems. Specializes in the field of holography and optical processing of information.

Злоказов Евгений Юрьевич, 1983 года рождения, в 2006 году окончил НИЯУ МИФИ. Кандидат технических наук. Является научным сотрудником лаборатории оптической обработки информации кафедры лазерной физики. Имеет около 20 научных работ в области оптико-электронной обработки информации и голографии.

E-mail: ezlokazov@gmail.com.

Evgeny Yurievich Zlokazov (b. 1983) graduated from National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute in 2006. Ph. D. (Eng.); Optical Information Processing lab. Laser Physics. dept. Author of 20 publications in the field of holography and optoelectronic information processing.

Одинок Сергей Борисович, 1950 года рождения, в 1973 году окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доктор технических наук, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник научно-учебной лаборатории Оптико-голографических систем НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 175 научных работ в области оптико-голографических систем.

E-mail: odinokov@bmstu.ru .

Sergey Borisovich Odinkov (b. 1950) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), professor of Laser and Optical-and-Electronic Systems department, head of laboratory on optical and holographic systems of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 175 publications in the field of design of optical and holographic systems.

Талалаев Владимир Евгеньевич, 1985 года рождения, в 2008 году окончил Московский авиационный институт Национальный исследовательский университет, факультет прикладной математики и физики. Специализируется в области оптической обработки информации и голографии.

E-mail: talalve@gmail.com .

Vladimir Evgenievich Talalaev (b. 1985) graduated from Moscow Aviation Institute (National Research University) in 2008. Specializes in the field of holography and optical processing of information.

Цыганов Иван Константинович, 1978 года рождения, в 2002 году окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет около 20 научных работ в области оптико-электронной обработки информации и голографии. Специализируется в области оптической обработки информации и голографии.

E-mail: iv_ts@mail.ru .

Ivan Konstantinovich Tsyganov (b. 1978) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2002. Author of 20 publications in the field of design of optical and holographic systems. Specializes in the field of holography and optical processing of information.

*Поступила в редакцию 23 июня 2015 г.
Окончательный вариант – 29 сентября 2015 г.*