

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДИФФУЗОРЫ С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ИНДИКАТРИСОЙ РАССЕЯНИЯ

Н.И. Петров¹¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

Аннотация

Рассматриваются оптические элементы для использования в системах подсветки различных экранов дисплеев, в том числе 3D-дисплеев, а также для формирования диаграммы излучения светодиодов. Исследована зависимость распределения интенсивности и индикатрисы рассеянного излучения от соотношения между дисперсией высоты и корреляционной длиной шероховатости поверхности, а также от радиуса когерентности падающего излучения и показателя преломления материала диффузора. Показано, что индикатриса рассеяния сужается при увеличении корреляционной длины шероховатости поверхности пленки и/или радиуса когерентности падающего излучения.

Ключевые слова: дифракция света, голографические диффузоры, индикатриса рассеяния, пространственная когерентность света.

Цитирование: Петров, Н.И. Голографические диффузоры с контролируемой индикатрисой рассеяния / Н.И. Петров // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 831-836. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-831-836.

Введение

Различные типы оптических элементов используются для формирования пучков света с определенной диаграммой рассеяния. Матовое стекло рассеивает свет во всех направлениях, но имеет низкую оптическую эффективность. Хотя экраны, основанные на структурах со случайной поверхностью (матовое стекло), доступны в промышленном масштабе благодаря низким ценам, область применения таких экранов очень ограничена из-за практической невозможности управлять их диффузионными характеристиками.

Для рассеяния света используются также периодические микролинзовые массивы, дифракционные элементы, голографические диффузионные экраны и т.д. [1, 2]. В [3] прозрачные анизотропные диффузоры были использованы при создании экрана 3D-дисплея. Новый класс формирователей пучка, таких как случайные микролинзовые массивы и диффузионные рельефные поверхности, имеет высокую пропускную способность, контролируемое угловое распределение и однородное распределение интенсивности света. Такие элементы не имеют дисперсионной зависимости от длины волны света и работают одинаково хорошо при освещении белым светом, монохроматическим, когерентным или некогерентным светом. При этом высокая оптическая пропускная эффективность > 90 % может быть достигнута для длин волн от 365 нм до 2000 нм. Дизайн и моделирование микрооптических систем по-прежнему является непростой задачей, поскольку классические методы, такие как трассировка лучей, не учитывают дифракционные и другие когерентные эффекты, проявляющиеся при прохождении света через массивы микрооптических элементов. С другой стороны, существуют строгие скалярные дифракционные методы для моделирования оптических систем. Но они также ограничены в своих приложениях, потому что они либо пренебрегают непараксиальными эффектами, либо вычислительное время слишком велико для практического применения.

В настоящей работе исследуется дифракция света на диффузионных экранах, полученных голографическим методом. Получены соотношения между параметрами, определяющими функциональные особенности таких оптических элементов (дисперсия высоты шероховатости и длина корреляции). Показана возможность управления диаграммой рассеяния с помощью изменения отношения дисперсии высоты к длине корреляции шероховатости поверхности. Исследовано также влияние пространственной когерентности источника света и показателя преломления материала на характеристики рассеянного излучения.

Постановка задачи

Частично-когерентный свет описывается с помощью функции когерентности [4, 5]:

$$\Gamma(r, r', z) = \langle E^*(r, z)E(r', z) \rangle, \quad (1)$$

где E – амплитуда электрического поля, угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю реализаций от произведения соответствующих компонент поля.

Распределение интенсивности поля за экраном с рельефной поверхностью описывается выражением [4, 5]:

$$I(r, z) = \langle |E(r, z)|^2 \rangle = A_0 \left(\frac{k}{2\pi z} \right)^2 \iint \Gamma_0(r_1', r_2') \times \\ \times \langle \exp i[\Phi(r_1') - \Phi(r_2')] \rangle G^*(r_1', r, z) \times \\ \times G(r_2', r, z) d^2 r_1' d^2 r_2', \quad (2)$$

где $\Gamma_0(r_1', r_2')$ – функция когерентности источника света в начальной плоскости, A_0 – нормировочная постоянная, $\Phi(r)$ – изменение фазы, обусловленное экраном, $\Phi(r) = k\Delta n h(x, y)$, $\Delta n = n_2 - n_1$, где n_1 – показатель преломления окружающей среды, n_2 – показатель преломления экрана, $h(x, y)$ – профиль поверхности, $G(r_1, r, z)$ – функция Грина, $r(x, y)$ – координата в поперечной плоскости, k – волновое число, z – продольная координата.

Излучение частично-когерентного источника света может быть описано с помощью модельного пучка Шелла – Гаусса [5, 6]

$$\Gamma(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = I_0 \exp \left\{ -\frac{\vec{r}_1^2 + \vec{r}_2^2}{a_0^2} - \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}{r_0^2} - \frac{i\pi}{\lambda R_f} (\vec{r}_2^2 - \vec{r}_1^2) \right\}, \quad (3)$$

где a_0 – радиус пучка, r_0 – радиус когерентности, R_f – радиус кривизны волнового фронта, $\vec{r}_1 \equiv (x_1, y_1)$, $\vec{r}_2 \equiv (x_2, y_2)$, λ – длина волны излучения.

Численный анализ дифракции света на основе уравнения (2) требует больших временных ресурсов, поэтому необходимо разработать быстрые алгоритмы для вычислений. В [2] был предложен метод, сочетающий распространение волн и процедуру трассировки лучей для анализа частично-когерентных пучков света, дифрагированных микролинзовым массивом. Это существенно ускоряет расчёты микрооптических систем. В [7] формализм матрицы плотности используется для рассмотрения распространения частично-когерентных световых пучков в неоднородной среде. При анализе влияния поверхностей со сложным профилем оказывается эффективным разложение поля пучка на поверхности по когерентным состояниям (КС), представляющим собой элементарные Гауссовы пучки [8]. Прохождение Гауссовых элементарных пучков (КС) через границу раздела двух сред в зависимости от угла падения определяется соответствующими коэффициентами Френеля. Обычно формулы Френеля получают для плоских волн. Однако эти формулы могут быть использованы также для локализованных волновых пучков с радиусом $a_0 > \lambda$ [9].

Для Гауссовой статистики случайной фазы $\Phi(r)$, характеризующей форму поверхности экрана, получаем

$$\langle \exp i[\Phi(r_1) - \Phi(r_2)] \rangle = \exp \left\{ -\sigma_\Phi^2 [1 - \gamma_\Phi(r_2 - r_1)] \right\}, \quad (4)$$

где $\Phi(r) = k\Delta n h(r)$, $\sigma_\Phi^2 = (k\Delta n)^2 \sigma_h^2$ – дисперсия,

$\gamma_\Phi(s) = \langle \Phi(r)\Phi(r+s) \rangle / \sigma_\Phi^2$ – коэффициент корреляции.

Рассмотрим экран, где рельеф поверхности описывается с помощью распределения высоты и автокорреляционной функции шероховатости Гауссовой формы. Такие поверхности представляют собой случайные микролинзовые массивы. Усредненные значения геометрических параметров элементов массива близки к параметрам микролинз в регулярном микролинзовом массиве [1, 10].

Для средних размеров элементов массива выполнены следующие соотношения: $a_0 \gg \bar{d} \gg \lambda$, где \bar{d} – средний диаметр раstra. Характерные геометрические размеры близки к параметрам микролинзового массива [1, 10]: $d \approx 20 - 100$ мкм. Фотографии реальных профилей поверхностей голографических диффузоров приводятся, например, в [11].

Шероховатость характеризуется дисперсией σ_h и корреляционной длиной L_c фазовых флуктуаций

$$\langle h(r_1)h(r_2) \rangle = \sigma_h^2 \exp \left[-(R/L_c)^2 \right], R = r_1 - r_2. \quad (5)$$

В случае падающего пучка с Гауссовым профилем распределения интенсивности и сильных флуктуаций $\sigma_\Phi^2 \gg 1$ интеграл (2) вычисляется аналитически. Показано, что контролируемый угол рассеяния можно получить путем изменения отношения дисперсии высоты шероховатости σ_h к длине корреляции L_c (чем меньше длина корреляции, тем больше угол расходимости). Для того чтобы получить угол рассеяния, превышающий 140° , необходимо, чтобы дисперсия высоты шероховатостей превышала корреляционную длину в 3–4 раза. Отметим, что в случае светодиодных источников при заданной длине корреляции требуемая дисперсия высоты шероховатости уменьшается. На индикатрису рассеяния влияет также степень когерентности (радиус когерентности r_0) падающего пучка света.

Результаты расчетов и экспериментов

На рис. 1 представлены распределения интенсивности в поперечной плоскости $z = 15$ мм и индикатрисы рассеяния для различных значений отношения σ_h/L_c .

Мощность падающего излучения (площадь под кривой интенсивности) нормирована на единицу, поэтому максимальные значения интенсивности уменьшаются с увеличением угла расходимости. На рис. 1в, г по оси ординат заданы значения интенсивностей на осевой линии диаграммы направленности. Из расчетов следует, что угол рассеяния увеличивается с увеличением σ_h/L_c . Это означает, что угол рассеяния уменьшается, когда длина корреляции L_c увеличивается или когда σ_h уменьшается.

В отличие от периодических микролинзовых массивов [10] неоднородности в распределении интенсивности отсутствуют.

На рис. 2 приведена зависимость угла расходимости пучка от отношения дисперсии высоты шероховатости к корреляционной длине для различных значений показателя преломления материала диффузора $\delta n = (n - 1)$. Значение угла расходимости рассчитывалось по уровню $1/e$ в распределении интенсивности в поперечной плоскости. Видно, что при увеличении показателя преломления угол расходимости пучка возрастает.

На рис. 3 представлены распределения интенсивности и индикатрисы рассеяния (расчет) в случае дифракции излучения лазерного диода микролинзовым массивом и голографическим диффузором.

Как видно из рисунка, случайный микролинзовый массив (голографический диффузор) позволяет полностью устранить резкие скачки в диаграмме излучения. Отметим, что голографический диффузор является более общим случаем «случайного микролинзового массива», где случайные изменения профиля поверхности коррелированы.

На рис. 4 представлены распределения интенсивности света в дальней зоне (эксперимент).

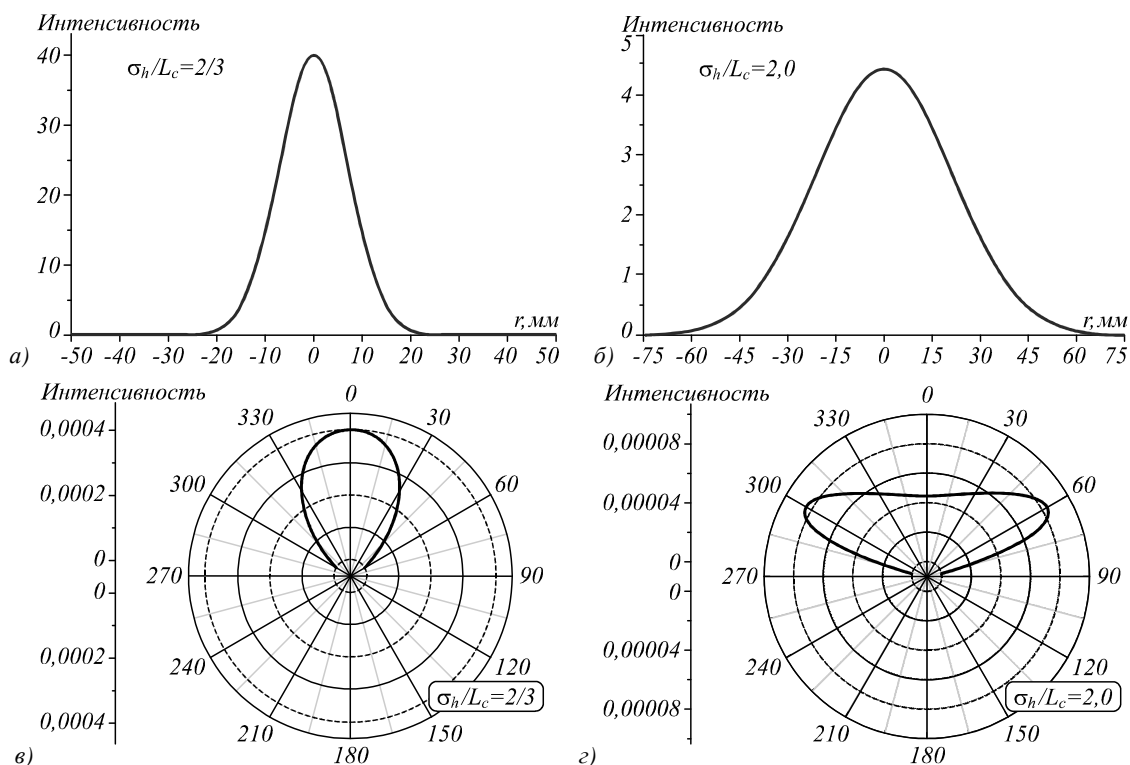


Рис. 1. Распределение интенсивности (а, б) и диаграммы рассеяния (в, г): $n_2 = 1,5$; $\lambda = 630$ нм

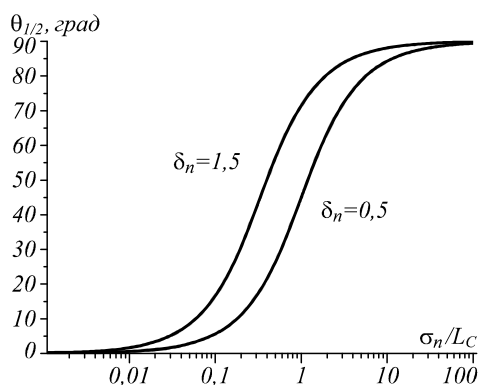


Рис. 2. Угол рассеяния в зависимости от σ_n/L_c для различных значений показателя преломления материала: $n = 1,5$ и $n = 2,5$

В измерениях использовались цилиндрический микролинзовый массив с диаметром раstra $d = 127$ мкм (200 lpi) и голографический диффузор фирмы Luminit [11] с индикатрисой рассеяния 20° . Как видно из рис. 3, периодическая структура ($L_c \rightarrow \infty$) и голографический диффузор по-разному рассеивают падающее на них излучение. В случае периодической структуры при $r_0 \gg d$ четко проявляется неоднородность в распределении интенсивности дифрагированного пучка (рис. 3а и рис. 4а).

Отметим, что в случае двумерной периодической структуры (микролинзового массива) излучение преобразуется в двумерный (дискретный) массив пятен.

Периодическая структура расщепляет падающий пучок на множество отдельных пучков (пятен), в то время как голографический диффузор создает равномерно расширяющийся пучок с заданной диаграммой

направленности. Расстояние между пятнами больше для растров с большим числом микролинз или с меньшим диаметром раstra d .

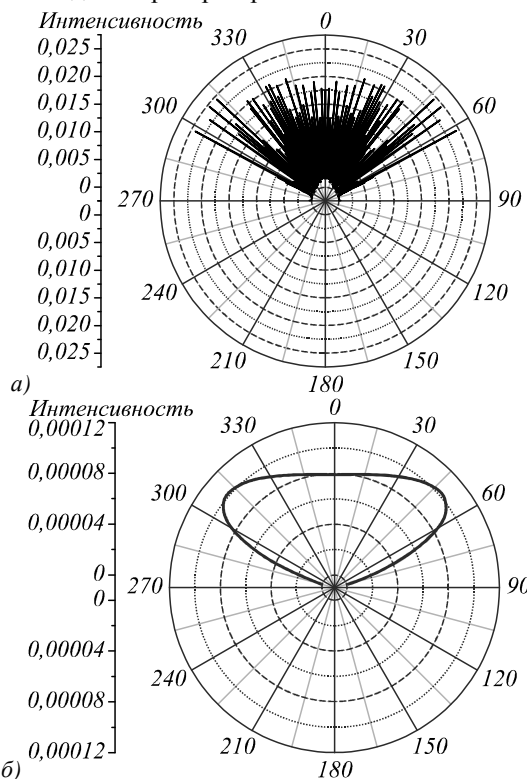


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния в случае дифракции излучения лазерного диода с $r_0 = 15$ см микролинзовым массивом при $z = 1,5$ мм (а) и голографическим диффузором с $\sigma_h/L_c = 3/2$ при $z = 15$ мм (б)

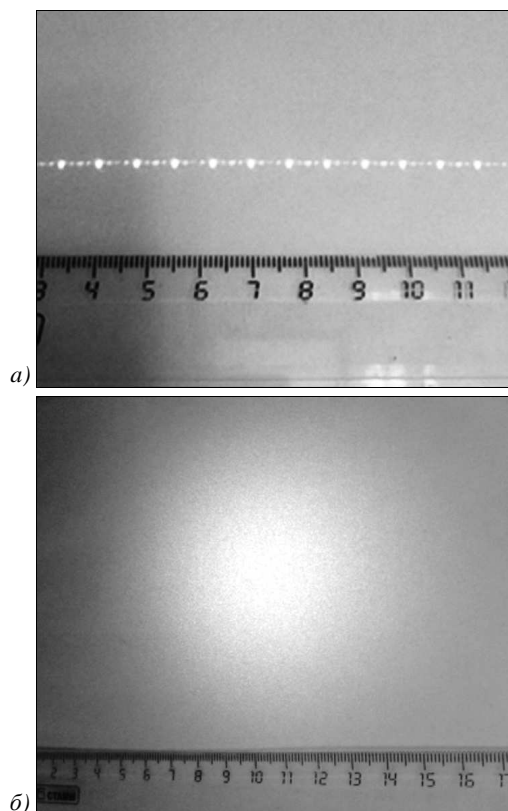


Рис. 4. Распределения интенсивности в случае дифракции излучения лазерного диода микролинзовым массивом (а) ($z = 1,45$ м, расстояние между пятнами $s = 7,5$ мм) и голографическим диффузором (б) с полным углом рассеяния 20° ($z = 15$ см)

Для синтеза диффузора голографическим методом в качестве объекта голографирования можно использовать оптический рассеиватель в виде матового стекла [12, 13]. Для записи голографического диффузора облучается рассеиватель, как правило, кусок матового стекла или другого подходящего диффузора с помощью лазерного луча с длиной волны λ_0 и шириной D . Записываемый материал (пленка) помещается на расстоянии R от рассеивателя и подвергается воздействию лазерной спекл-картины. Средний размер регистрируемых спеклов $\sim \lambda_0 R/D$ определяет величину углового расхождения света при подсветке экспонированной спекл-структуры (голографического диффузора) – чем меньше размер спекла, тем шире угловое расхождение рассеянного пучка. Длина корреляции L_c определяется спекл-структурой лазерного излучения, которая записывается на фоторезисте или пленке.

Отметим, что рассматриваемые голографические диффузоры обладают оптической эффективностью $> 85\%$ [11]. Эффективность же матовых стекол в видимом диапазоне обычно меньше 35% .

Для получения однородного распределения интенсивности света после прохождения микролинзового массива в системах подсветки дисплеев обычно используются источники с низкой когерентностью (светодиодные излучатели). Однако для повышения яркости и контрастности изображений лучше подхо-

дят лазерные источники излучения. В настоящей работе показано, что при использовании голографических диффузоров возможно получение однородного распределения интенсивности и при работе с когерентными источниками излучения.

Заключение

Таким образом, в работе исследована дифракция света на диффузионных экранах, полученных голографическим методом. Такие экраны представляют собой случайный микролинзовый массив, профиль поверхности которого описывается дополнительным параметром, задающим статистические свойства флуктуации высоты – длиной корреляции. Показано, что индикатриса рассеяния сужается с увеличением длины корреляции неоднородностей L_c . Получено, что при увеличении показателя преломления материала диффузора угол расходимости пучка возрастает. Голографические диффузоры могут быть использованы в 3D-дисплеях [14] для повышения яркости изображения и создания однородных зон просмотра.

Полученные результаты представляют практический интерес и могут быть использованы в системах подсветки различных экранов дисплеев, а также при разработке новых оптических элементов для формирования пучков света с заданной угловой расходимостью.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01461).

Литература

1. Sales, T.R.M. Structured microlens arrays for beam shaping / T.R.M. Sales // Optical Engineering. – 2003. – Vol. 42, Issue 11. – P. 3084-3085. – DOI: 10.1117/1.1618817.
2. Petrov, N.I. Effects of Light Coherence for Micro-Lens Arrays / N.I. Petrov // Proceedings of Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV. – 2008. – FThU3. – DOI: 10.1364/FIO.2008.FThU3.
3. Hong, J.Y. See-through multi-projection three-dimensional display using transparent anisotropic diffuser / J.Y. Hong, S.G. Park, C.K. Lee, S. Moon, S.J. Kim, J. Hong, Y. Kim, B. Lee // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, Issue 13. – P. 14138-14151. – DOI: 10.1364/OE.24.014138.
4. Мандель, Л. Оптическая когерентность и квантовая оптика / Л. Мандель, Э. Вольф: пер. с англ. – М.: Физматлит, 2000. – 896 с. – ISBN: 5-9221-0073-4.
5. Кривошлыков, С.Г. Пространственная когерентность оптических полей в продольно-неоднородных средах с квадратичным профилем показателя преломления / С.Г. Кривошлыков, Н.И. Петров, И.Н. Сисакян // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12, № 3. – С. 501-515.
6. Soifer V.A. Vortex beams in turbulent media: Review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
7. Krivoslykov, S.G. Density-matrix formalism for partially coherent optical fields propagating in slightly inhomogeneous media // S.G. Krivoslykov, N.I. Petrov, I.N. Sisakyan // Optical and Quantum Electronics. – 1986. – Vol. 18, Issue 4. – P. 253-264.

8. **Petrov, N.I.** Reflection and transmission of light beams at a curved interface: coherent state approach / N.I. Petrov // American Journal of Optics and Photonics. – 2015. – Vol. 3, Issue 2. – P. 30-33. – DOI: 10.11648/j.ajop.20150302.12.
9. **Petrov, N.I.** Reflection and transmission of strongly focused vector beams at a dielectric interface / N.I. Petrov // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, Issue 5. – P. 421-423. – DOI: 10.1364/OL.29.000421.
10. **Petrov, N.I.** Diffraction of partially-coherent light beams by microlens arrays // N.I. Petrov, G.N. Petrova // Optics Express. – 2017 – Vol. 25, Issue 19. – P. 22545-22564. – DOI: 10.1364/OE.25.022545.
11. Light shaping diffuser overview. – URL: <https://www.luminitco.com/products/light-shaping-diffusers> (date request 20.06.2017).
12. **Kim, S.I.** Holographic diffuser by use of a silver halide sensitized gelatin process / S.I. Kim, Y.S. Chi, Y.N. Ham, Gh.Y. Park, J.M. Kim // Applied Optics. – 2003. – Vol. 42, Issue 14. – P. 2482-2491. – DOI: 10.1364/AO.42.002482.
13. **Ганжерли, Н.М.** Создание оптических рассеивателей на галоидосеребряных фотоматериалах с помощью мультиплексных голограмм / Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 112-116.
14. **Petrov, N.I.** Integral imaging multi-view 3D display / N.I. Petrov, Y. Sokolov, M. Khromov, A. Storozheva // OSA Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS (FiO+LS 2017). – 2017. – JTU2A.107. – DOI: 10.1364/FIO.2017.JTU2A.107.

Сведения об авторе

Петров Николай Иванович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НТИЦ УП РАН. В 1979 году окончил физический факультет Казанского государственного университета, в 1986 году защитил кандидатскую диссертацию в Институте общей физики РАН, в 1997 году – докторскую диссертацию в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, электродинамика неоднородных сред, акустооптика, нанопотоника. E-mail: petrovni@mail.ru.

ГРПТИ: 29.31.15, 29.33.18, 47.37.29.

Поступила в редакцию 23 июня 2017 г. Окончательный вариант – 25 октября 2017 г.

HOLOGRAPHIC DIFFUSERS WITH CONTROLLED SCATTERING INDICATRIX

N.I. Petrov¹

¹ *Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, Russia*

Abstract

Optical elements for illumination systems in different display screens (including 3D displays) and generating the radiation patterns of LEDs are considered. It is analyzed in which way the intensity distribution and the light scattering indicatrix are affected by the ratio of the height dispersion and the correlation length of surface roughness, the coherence radius of incident light, and the refractive index of the diffuser material. It is shown that the light scattering indicatrix is narrowed with increasing correlation length of the film surface roughness and/or the radius of radiation coherence.

Keywords: diffraction of light, holographic diffusers, light scattering indicatrix, spatial coherence of light.

Citation: Petrov NI. Holographic diffusers with controlled scattering indicatrix. Computer Optics 2017; 41(6): 831-836. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-831-836.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation (project No. 17-19-01461).

References

- [1] Sales TRM. Structured microlens arrays for beam shaping. Opt Eng 2003; 42(11): 3084-3085. DOI: 10.1117/1.1618817.
- [2] Petrov NI. Effects of Light Coherence for Micro-Lens Arrays. Proc FIO 2008/Laser Science XXIV 2008: FThU3. DOI: 10.1364/FIO.2008.FThU3.
- [3] Hong JY, Park SG, Lee CK, Moon S, Kim SJ, Hong J, Kim Y, Lee B. See-through multi-projection three-dimensional display using transparent anisotropic diffuser. Opt Express 2016; 24(13): 14138-14151. DOI: 10.1364/OE.24.014138.
- [4] Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics. – N.Y.: Cambridge University Press; 1995. ISBN: 0-521-41711-2.
- [5] Krivoshlykov S.G., Petrov N.I., Sisakyan I.N. Spatial coherence of optical fields in longitudinally inhomogeneous media with the square-law refractive index profile. Sov J Quantum Electron 1985; 15(3): 330-338.
- [6] Soifer VA, O. Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: Review. Computer Optics 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [7] Krivoshlykov SG, Petrov NI, Sisakyan IN. Density-matrix formalism for partially coherent optical fields propagating in slightly inhomogeneous media. Opt Quantum Electron 1986; 18(4): 253-264.
- [8] Petrov NI. Reflection and transmission of light beams at a curved interface: coherent state approach. American Journal of Optics and Photonics 2015; 3(2): 30-33. DOI: 10.11648/j.ajop.20150302.12.

- [9] Petrov NI. Reflection and transmission of strongly focused vector beams at a dielectric interface. *Opt Lett* 2004; 29(5): 421-423. DOI: 10.1364/OL.29.000421.
- [10] Petrov NI, Petrova GN. Diffraction of partially-coherent light beams by microlens arrays. *Opt Express* 2017; 25(19): 22545-22564. DOI: 10.1364/OE.25.022545.
- [11] Light shaping diffuser overview. Source: (<https://www.luminitco.com/products/light-shaping-diffusers>).
- [12] Kim SI, Chi YS, Ham YN, Park GhY, Kim JM. Holographic diffuser by use of a silver halide sensitized gelatin process. *Appl Opt* 2003; 42(14): 2482-2491. DOI: 10.1364/AO.42.002482.
- [13] Ganzherli NM, Gulyaev SN, Maurer IA, Chernykh DF. Formation of optical scatterers on silver halide photo-materials using multiplex holograms. *Tech Phys* 2014; 59(12): 1849-1853.
- [14] Petrov NI, Sokolov Y, Khromov M, Storozheva A. Integral imaging multi-view 3D display. *FiO+LS* 2017: JTU2A.107. DOI: 10.1364/FIO.2017.JTu2A.107.

Author's information

Nikolai Ivanovich Petrov (b. 1957) graduated from Kazan State University in 1979, Doctor in Physics & Maths, Chief Researcher in STC UI RAS. Research interests: diffraction optics, electrodynamics of inhomogeneous media, acoustooptics, nanophotonics. E-mail: petrovni@mail.ru.

Received June 23, 2017. The final version – October 25, 2017.
