

КОРОТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ НУЛЕВОГО ПОРЯДКА МЕТОДАМИ ДИФРАКЦИОННОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ОПТИКИ

С.В. Карпеев^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Предложена оптическая система для генерации азимутально- и радиально-поляризованных лазерных пучков Бесселя нулевого порядка. Формирование пучка Бесселя нулевого порядка осуществляется амплитудным дифракционным аксиконом, а преобразование поляризации основано на интерференции в многослойной структуре. Экспериментально получен радиально-поляризованный пучок Бесселя нулевого порядка с использованием бинарного амплитудного аксикона.

Ключевые слова: амплитудный дифракционный аксикон, Бесселевы пучки, радиальная поляризация, интерференционный поляризатор.

Цитирование: Карпеев, С.В. Формирование радиально-поляризованных пучков Бесселя нулевого порядка методами дифракционной и поляризационной оптики / С.В. Карпеев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 583-587. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.

Введение

Азимутально- и радиально-поляризованные лазерные пучки на сегодняшний день имеют множество приложений [1], в частности, для оптической манипуляции [2]. Методы формирования цилиндрических векторных пучков различаются как по параметрам сформированных пучков, так и по свойствам формирующих систем. Одновременно с поляризационным состоянием формируется и амплитудно-фазовое распределение пучка, которое также играет важную роль. Например, радиально-поляризованные моды высоких порядков позволяют получить более острую фокусировку [3, 4] и тем самым добиться сверхразрешения. Для оптического захвата и манипуляции требуются либо модовые пучки сложной формы [5], либо вихревые пучки высоких порядков [6, 7]. Таким образом, с практической точки зрения было бы интересно формирование требуемых поляризационных состояний при заданном амплитудно-фазовом распределении пучка.

Универсальным средством решения этой задачи представляются жидкокристаллические модуляторы света [8], однако разрешение и энергетическая эффективность этих устройств всё ещё недостаточны для решения определённого круга задач.

Когерентная суперпозиция пары обычных мод Гаусса–Эрмита [9, 10] даёт радиально- либо азимутально-поляризованное распределение, амплитуда которого соответствует кольцевой моде R-TEM_(0,1). Другой вариант метода, основанный на суперпозиции вихревых пучков, даёт возможность управлять распределением комплексной амплитуды с помощью ДОЭ [11]. Основным недостатком интерферометров, используемых для сложения мод, является низкая стабильность, а основным достоинством – высокое качество формирования пучков.

Секторные пластинки [12, 13] позволяют преобразовывать поляризационное состояние пучков с произвольным осесимметричным распределением ампли-

туды, характеризуются высокой энергетической эффективностью (теоретически 100 %) и стабильностью. Однако качество формируемых пучков сильно зависит от качества изготовления пластинок, которые, по сути, всегда дискретны. В большинстве случаев такие пучки требуют дополнительной фильтрации, что снижает эффективность формирования и искажает распределение амплитуды.

Применение анизотропных материалов [14, 15] также даёт возможность управлять амплитудным распределением, если исходные пучки с вихревой фазой формируются при помощи ДОЭ [15]. Энергия исходного пучка делится между одновременно получаемыми пучками с радиальной и азимутальной поляризациями. Разделение этих двух пучков при помощи фильтрации, как и в случае секторных пластинок, может приводить к искажениям амплитудного распределения.

Поляризационное преобразование, происходящее при падении пучков на поверхность диэлектрика под углом Брюстера [16–18], также может применяться для генерации неоднородных поляризаций. Такие системы могут быть как внутри- [16, 17], так и внерезонаторными [18] и основаны на использовании конических волновых фронтов, сформированных соответствующими оптическими элементами. Наибольшей эффективностью обладают внутрирезонаторные системы, поскольку обеспечивают многократное прохождение Брюстеровских окон или призм. Брюстеровские окна [16], обеспечивающие радиальную либо азимутальную поляризацию, представляют сложности в изготовлении. Более простой является система Брюстеровских призм [17], состоящая из двух аксиконов. Для повышения коэффициента отражения азимутальной поляризации в [17] применялось многослойное диэлектрическое покрытие конической поверхности призмы Брюстера. Такая система производит только радиально-поляризованное распределение с амплитудой, соответствующей кольцевой моде R-TEM_(0,1).

Генерация цилиндрических векторных пучков с необходимым амплитудным распределением может осуществляться внрезонаторными системами с падением света под углом Брюстера, включающими ДОО, например [18]. Для увеличения степени поляризации прошедшего излучения в системе [18] использовалась стопа Столетова. Однако диаметр пучка после прохождения стопы Столетова сильно увеличился из-за большого значения угла Брюстера. Демонстрация радиальной поляризации осуществлялась по изображению на матовом экране, а коллимация пучка не осуществлялась. В работе [19] был предложен и теоретически обоснован метод уменьшения угла расходимости поляризованного излучения путём замены стопы Столетова на интерференционный поляризатор, имеющий меньшие рабочие углы.

В данной работе предложена оптическая система для генерации пучка Бесселя нулевого порядка, поляризованного либо азимутально, либо радиально. Система включает амплитудный бинарный аксикон для генерации пучка Бесселя и интерференционный поляризатор, дающий возможность генерации как азимутальной, так и радиальной поляризации.

Экспериментальное исследование

Пропускание многослойного интерференционного поляризующего покрытия отличается для p - и s -поляризации излучения при ненулевых углах падения. Можно рассчитать толщины слоёв так, что для заданной длины волны λ_0 при одном угле падения будет наблюдаться максимальное пропускание для p -поляризации и минимальное для s -поляризации, а при другом – наоборот. Интерференционный поляризатор состоял из 20 чередующихся слоёв Ta_2O_5/SiO_2 различной толщины, нанесённых на кварцевую подложку диаметром 12,7 мм и толщиной 5 мм. Поляризационные характеристики пропускания изготовленного поляризатора исследовались на спектральном эллипсометре J.A. Wollam V-VASE в диапазоне углов $0-45^\circ$ с шагом $0,2^\circ$. Длина волны зондирующего излучения устанавливалась равной 632,8 нм, ширина спектра – не более 1,2 нм. Для большей точности перед каждым измерением определялся уровень излучения спектрального блока эллипсометра (базовая линия), а результаты измерений усреднялись во времени по 10 точкам. Зависимости пропускания p - и s -поляризованного излучения от угла падения приведены на рис. 1. Из измеренных характеристик следует, что интерференционный поляризатор обеспечивает отношение коэффициентов пропускания азимутальной и радиальной компонент T_s/T_p около 100:1–140:1 для углов падения $27-30^\circ$. При этом пропускание для T_s около 70 %.

Расчёт показывает, что для получения таких углов дифракции кольцевая решётка аксикона должна иметь период 1,3–1,4 мкм. Для создания пучка Бесселя нулевого порядка в работе использовался амплитудный дифракционный аксикон с периодом 1,4 мкм и диаметром 10 мм, изготовленный на круговом лазерном записывающем устройстве CLWS-200S мето-

дом термохимического окисления маски хрома. Электронная фотография аксикона приведена на рис. 2.

Пучок, прошедший через интерференционный поляризатор, имеет меньшую расходимость, чем в работе [18] из-за значений рабочих углов меньших, чем угол Брюстера. Для получения изображения на ПЗС-камере в этом случае можно использовать изображающий высокоапертурный объектив 60 \times , который строит изображение на поверхности фотодетектора.

Пропускание, отн. ед.

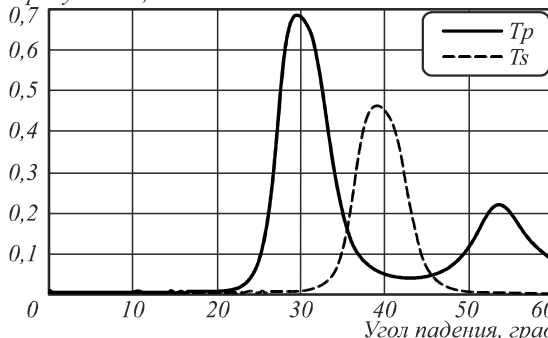


Рис. 1. Зависимости пропускания p - и s -поляризованного излучения от угла падения

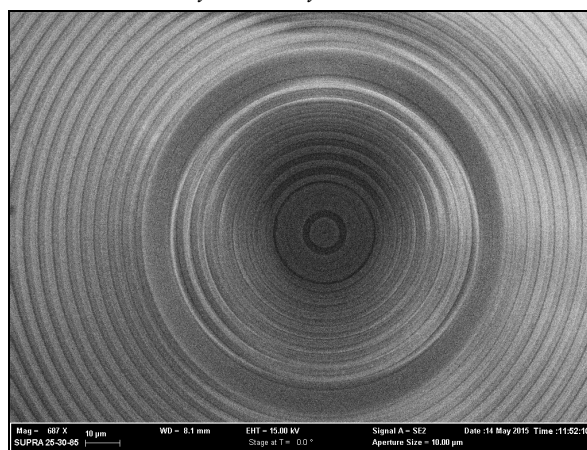


Рис. 2. Электронная фотография фрагмента дифракционного аксикона

Исследование формирования азимутально-поляризованного излучения на основе интерференционного поляризатора осуществлялось на оптической установке (рис. 3). Она включала: линейно-поляризованный гелий-неоновый лазер ЛГН-208А, пространственный фильтр – расширитель пучка, четвертьволновую пластину (WP), дифракционный аксикон (DA), интерференционный поляризатор (IP), изображающий высокоапертурный объектив 60 \times , плёночный поляризатор (P), видеокамеру DCM310 (CCD).

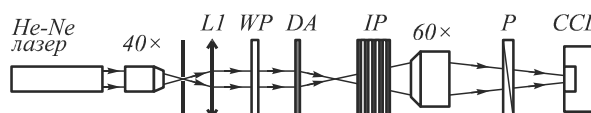


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для получения радиально-поляризованного пучка Бесселя нулевого порядка

На рис. 4 приведены полученные распределения интенсивности для различных положений оси поляризатора.

Из рис. 4 видно, что полученный пучок Бесселя нулевого порядка имеет радиальную поляризацию.

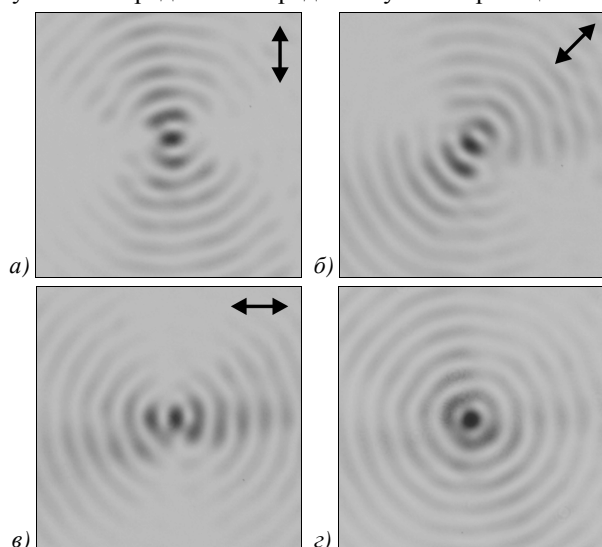


Рис. 4. Пучок Бесселя при различных положениях поляризатора: 0° (а), 45° (б), 90° (в), без поляризатора (г)

Заключение

Таким образом, предложена оптическая система для эффективного формирования радиально-поляризованного пучка Бесселя нулевого порядка, включающая бинарно-фазовый аксикон и интерференционный поляризатор. Система основана на преобразовании конического волнового фронта при прохождении через многослойную структуру. Формирование пучка Бесселя нулевого порядка с коническим волновым фронтом осуществлялось бинарным амплитудным дифракционным аксиконом, а изображение полученного неоднородно поляризованного пучка строилось при помощи высокоапертурного микрообъектива. Радиально-поляризованный пучок Бесселя нулевого порядка может применяться для оптической манипуляции.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, а также гранта РФФИ 14-02-97033р_поволжье_а.

Литература

1. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1, Issue 1. – P. 1-57. – DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
2. **Shvedov, V.** A long-range polarization-controlled optical tractor beam / V. Shvedov, A.R. Davoyan, C. Hnatovsky, N. Engheta, W. Krolikowski // *Nature Photonics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 846-850. – DOI: 10.1038/nphoton.2014.242.
3. **Khonina, S.N.** Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15(8). – 085704 (9pp). – DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
4. **Khonina, S.N.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order

laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 17. – P. 3223-3226. – DOI: 10.1364/OL.38.003223.

5. **Порфирьев, А.П.** Оптический захват и перемещение микрочастиц с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса / А.П. Порфирьев, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 152-157. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.
6. **Морозов, А.А.** Сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 68-75.
7. **Rykov, M.A.** Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap / M.A. Rykov, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53(2). – P. 156-164. – DOI: 10.1364/AO.53.000156.
8. **Čančula, M.** Generation of vector beams with liquid crystal disclination lines / Miha Čančula, Miha Ravnik, Slobodan Žumer // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 90. – 022503. – DOI: 10.1103/PhysRevE.90.022503.
9. **Khonina, S.N.** Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28, Issue 10. – P. 2115-2123. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
10. **Khonina, S.N.** Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49, Issue 10. – P. 1734-1738. – DOI: 10.1364/AO.49.001734.
11. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(12). – P. 2385-2387. – DOI: 10.1364/OL.37.002385.
12. **Алфёров, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
13. **Kawauchi, H.** Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate / H. Kawauchi, Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato, S. Kawakami // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33(4). – P. 399-401. – DOI: 10.1364/OL.33.000399.
14. **Machavariani, G.** Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel, N. Davidson // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46. – P. 3304-3310. – DOI: 10.1364/AO.46.003304.
15. **Khonina, S.N.** Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17, Issue 6. – 065001 (11p). – DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
16. **Tovar, A.A.** Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre–Gaussian laser beams / A.A. Tovar // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1998. – Vol. 15, Issue 10. – P. 2705-2711. – DOI: 10.1364/JOSAA.15.002705.
17. **Kozawa, Y.** Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism / Y. Kozawa, S. Sato // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30, Issue 22. – P. 3063-3065. – DOI: 10.1364/OL.30.003063.
18. **Скиданов, Р.В.** Дифракционные аксиконы для формирования радиально-поляризованного света на основе использования стопы Столетова / Р.В. Скиданов, А.В. Морозов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 614-618.
19. **Паранин, В.Д.** Расчёт формирования радиально-поляризованных пучков на основе рефракционных элементов с интерференционными поляризующими покрытиями / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 492-499. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.

Сведения об авторе

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; ведущий научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 22 августа 2016 г. Окончательный вариант – 29 августа 2016 г.

GENERATION OF RADIALLY POLARIZED ZERO-ORDER BESSEL BEAMS BY DIFFRACTIVE AND POLARIZATION OPTICS

S.V. Karpeev^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

²Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

An optical system for the generation of azimuthally and radially polarized zero-order Bessel beams is proposed. A zero-order Bessel beam is formed by an amplitude diffractive axicon, whereas the polarization conversion is based on the interference in a multilayer structure. A radially polarized zero-order Bessel beam is experimentally generated with the help of a binary-amplitude axicon.

Keywords: amplitude diffractive axicon, Bessel beams, radial polarization interference polarizer.

Citation: Karpeev SV. Generation of radially polarized zero-order Bessel beams by diffractive and polarization optics. *Computer Optics* 2016; 40(4): 583-587. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-583-587.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, and an RFBR grant 14-02-97033 r_povolzhnye_a.

References

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Advances in Optics and Photonics* 2009; 1(1): 1-57. DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
- [2] Shvedov V, Davoyan AR, Hnatovsky C, Engheta N, Krolikowski W. A long-range polarization-controlled optical tractor beam. *Nature Photonics* 2014; 8: 846-850. DOI: 10.1038/nphoton.2014.242.
- [3] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Savelyev DA, Laukkanen J, Turunen J. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams. *Journal of Optics* 2013; 15(8): 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
- [4] Khonina SN, Alferov SV, Karpeev SV. Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams. *Optics Letters* 2013; 38(17): 3223-3226. DOI: 10.1364/OL.38.003223.
- [5] Porfirev AP, Kovalev AA, Kotlyar VV. Optical trapping and moving of microparticles using asymmetrical Bessel-Gaussian beams. *Computer Optics* 2016; 40(2): 152-157. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.
- [6] Morozov AA, Skidanov RV. Complex vortex beams for of rotation of micromechanical elements. *Computer Optics* 2013; 37(1): 68-75.
- [7] Rykov MA, Skidanov RV. Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap. *Applied Optics* 2014; 53(2): 156-164. DOI: 10.1364/AO.53.000156.
- [8] Čančula M, Ravnik M, Zumer S. Generation of vector beams with liquid crystal disclination lines. *Phys Rev E* 2014; 90: 022503. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.022503.
- [9] Khonina SN, Karpeev SV. Generating inhomogeneously polarized higher-order laser beams by use of DOEs beams. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(10): 2115-2123. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002115.
- [10] Khonina SN, Karpeev SV. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams. *Appl Opt* 2010; 49(10): 1734-1738. DOI: 10.1364/AO.49.001734.
- [11] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Opt Lett* 2012; 37(12): 2385-7. DOI: 10.1364/OL.37.002385.
- [12] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64.
- [13] Kawauchi H, Kozawa Y, Sato S, Sato T, Kawakami S. Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate. *Optics Letters* 2008; 33(4): 399-401. DOI: 10.1364/OL.33.000399.
- [14] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel N, Davidson N. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes. *Applied Optics* 2007; 46: 3304-3310. DOI: 10.1364/AO.46.003304.
- [15] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Soifer VA. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals. *J Opt* 2015; 17(6): 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
- [16] Tovar AA. Production and propagation of cylindrically polarized Laguerre-Gaussian laser beams // *J Opt Soc Am A* 1998; 15(10): 2705-2711. DOI: 10.1364/JOSAA.15.002705.

- [17] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism. *Opt Lett* 2005; 30(22): 3063-3065. DOI: 10.1364/OL.30.003063.
- [18] Skidanov RV, Morozov AA. Diffractive optical elements for forming radially polarized light, based on the use stack of Stoletov. *Computer Optics* 2014; 38(4): 614-618.
- [19] Paragin VD, Karpeev SV, Khonina SN. Generation of radially polarized beams based on the refractive elements with interference polarizing coatings. *Computer Optics* 2015; 39(4): 492-499. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-492-499.

Author's information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@smr.ru.

Received August 22, 2016. The final version – August 29, 2016.
