

УДК 535.42

## УПРАВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ КРИСТАЛЛА $\text{CaCO}_3$ В ЗАДАЧАХ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ ПУТЁМ НАГРЕВА\*

В. Д. Паранин<sup>1</sup>, С. Н. Хонина<sup>1,2</sup>, С. В. Карпеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королёва,  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН,  
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151  
E-mail: vparanin@mail.ru

Экспериментально исследовано преобразование пучков Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок Бесселя второго порядка в  $s$ -срезе кристалла  $\text{CaCO}_3$ . Показана возможность управления преобразованием пучка внутри кристалла при его нагреве. Обосновано влияние термооптического эффекта и эффекта теплового линейного расширения кристалла на преобразование пучка Бесселя.

*Ключевые слова:* лазерные вихревые пучки Бесселя, одноосный кристалл, термооптический эффект, тепловое расширение.

DOI: 10.15372/AUT20160210

**Введение.** Лазерные пучки Бесселя широко применяются в научных исследованиях и оптических системах перспективных технологических комплексов. На основе пучков нулевого порядка осуществляется лазерная обработка материалов [1], литография высокого разрешения [2]. С использованием пучков более высоких порядков производится оптический захват и перемещение атомов [3], микрочастиц [4], микробиологических объектов [5]. Дальнейшее развитие оптической техники и технологии требует создания приборов и методов формирования пучков Бесселя с вихревой фазой. Одним из путей решения этой задачи является использование анизотропных кристаллов. Теоретические исследования [5–9] показали, что в одноосных кристаллах происходит периодическое преобразование непараксиально распространяющегося вдоль  $s$ -оси (оптической оси кристалла) пучка Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок Бесселя второго порядка. В экспериментальных работах [10, 11] отмечено повышение эффективности преобразования и уменьшение его пространственного периода с ростом числовой апертуры пучка и двулучепреломления кристалла.

Как было показано в [9], период  $p$  повторения формы пучка в кристалле зависит от показателей преломления кристалла и числовой апертуры ( $NA$ ) аксикона. Причём для аксиконов с  $NA = 0,15–0,50$  период составляет десятки микрометров. Следовательно, для формирования заданного пучка толщина кристалла должна выдерживаться с микронными допусками, что осложняется высокой трудоёмкостью изготовления и вариацией свойств кристаллов.

Всё это заставляет искать методы подстройки оптических параметров уже изготовленных кристаллов для управляемого преобразования пучков Бесселя. Осуществлять управление могут различные физические эффекты, изменяющие показатели преломления и/или толщину кристалла: термооптический, электрооптический, тензооптический, фотореф-

\*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-00114).

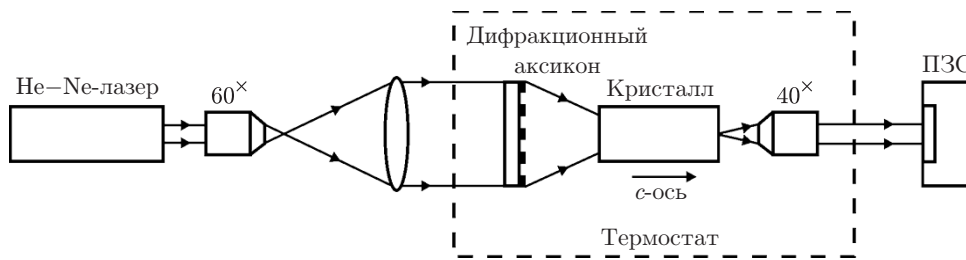


Рис. 1

рактивный, температурное расширение кристалла и т. д. Так, в [12] проведено теоретическое исследование электрического управления орбитальным и угловым моментами моды Гаусса — Бесселя, распространяющейся в электрооптическом кристалле  $\text{LiNbO}_3$ . В [13] рассмотрено электрооптическое преобразование мод Лагерра — Гаусса с правой и левой круговой поляризацией.

Цель данной работы — исследование управления преобразованием пучков Бесселя нулевого порядка, формируемых дифракционным аксиконом, в вихревой пучок Бесселя второго порядка в  $s$ -срезе кристалла  $\text{CaCO}_3$ . В качестве управляющего воздействия выбрана вариация температуры, изменяющая показатели преломления и толщину кристалла. Используемый метод управления не обладает высоким быстродействием, свойственным электрооптическому эффекту, однако он пригоден для разработки лабораторных устройств.

**Экспериментальное исследование.** Для изучения термооптического преобразования пучка Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок второго порядка была создана оптическая установка, схема которой показана на рис. 1. Термостатируемая оптико-механическая часть содержит дифракционный аксикон,  $s$ -срез кристалла  $\text{CaCO}_3$  и микробъектив, установленные на координатные и угловые оправы.

Для формирования пучка Бесселя нулевого порядка был изготовлен амплитудный дифракционный аксикон диаметром 40 мм на стеклянной подложке с периодом колец 4 мкм, что для длины волны  $\lambda = 0,6328$  мкм соответствует угловой апертуре  $\alpha = 0,159$  (рис. 2). В центральной части аксикона присутствуют два кольца с увеличенной шириной. Радиус внешнего широкого кольца хрома не превосходит 50 мкм, и вносимое им искажение пучка Бесселя наблюдается на расстояниях до 350 мкм при апертуре  $\alpha = 0,159$ . Поскольку кристалл отстоит на удалении 5 мм от аксикона, а диаметр освещенной части аксикона составляет 15 мм, наличие подобных дефектов не влияет на результаты экспериментов.

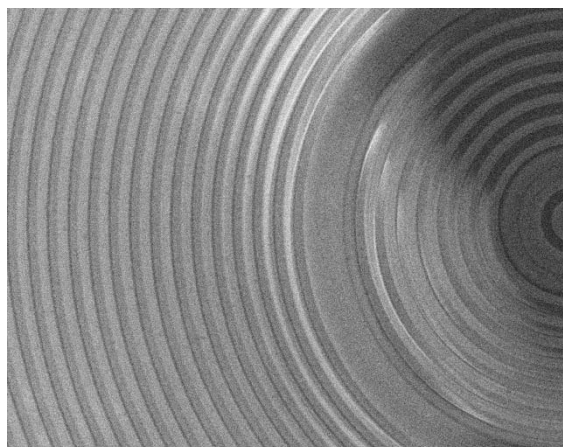


Рис. 2

Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГН-207А с линейно поляризованным излучением. Расширение лазерного пучка производилось объективом  $60\times$  и плоско-выпуклой линзой диаметром 20 мм с фокусным расстоянием 150 мм. В качестве анизотропной среды использовался одноосный кристалл  $\text{CaCO}_3$  размерами  $8 \times 8 \times 15$  мм. Параллельно оптической оси схемы ориентировалась  $c$ -ось кристалла. Точное сведение обыкновенного и необыкновенного пучков обеспечивалось двумерной угловой оправой. Увеличение размеров выходного пучка осуществлялось объективом  $40\times$  с  $NA = 0,65$ , превосходящей числовую апертуру аксикона. Распределение интенсивности выходного пучка фиксировалось чёрно-белой USB-видеокамерой DCM 310 с разрешением 3 Мпиксел и разрядностью аналого-цифрового преобразователя 8 бит.

Аксикон, кристалл и объектив помещались в регулируемый термостат. Управление нагревателем термостата производилось измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ 251. Датчик температуры имел номинальную статическую характеристику 100 М, погрешность измерения составляла до  $\pm 0,7$  °С в исследуемом диапазоне температур 20–70 °С. Система управления позволяла поддерживать заданную температуру с отклонением не более  $\pm 0,1$  °С от измеряемой величины. Температура изменялась с шагом около 25 °С, что занимало 15–20 мин. Для полного прогрева оптико-механическая часть выдерживалась в термостате 1 ч при каждом измерении.

Было отмечено медленное координатно-угловое смещение пучка в плоскости матрицы видеокамеры (около 0,05 мм/°С), что обусловлено обратимой температурной деформацией конструкции. Выдержка при заданной температуре останавливала это смещение. Возникающее расхождение сведённых ранее обыкновенного и необыкновенного пучков устранялось ручной юстировкой при установившейся температуре.

Кроме этого фиксировались мерцание и хаотичное пространственное перемещение пучка с амплитудой до 0,1 мм при температурах более 25–30 °С. Такие явления были вызваны восходящими тепловыми потоками от нагревательного элемента, расположенного в нижней части термостата. Для снижения их влияния увеличивалось время достижения заданной температуры, что уменьшало скорость восходящих тепловых потоков, вертикальный градиент температуры и оптическую неоднородность воздуха.

На рис. 3 показаны экспериментальные результаты преобразования пучка Бесселя, наблюдаемого на выходе кристалла  $\text{CaCO}_3$ , при температурах 21,1 (а), 45,7 (b) и 70,5 °С (c). Рис. 4 иллюстрирует радиальное распределение интенсивности пучков, представленных на рис. 3. Из полученных результатов следует, что изменение температуры с 21,1 до 70,5 °С привело к существенному снижению интенсивности центральной части пучка.

Наличие именно вихревого пучка Бесселя второго порядка на выходе  $c$ -среза кристалла доказывается интерферограммой (рис. 5), на которой совмещены входной и выходной

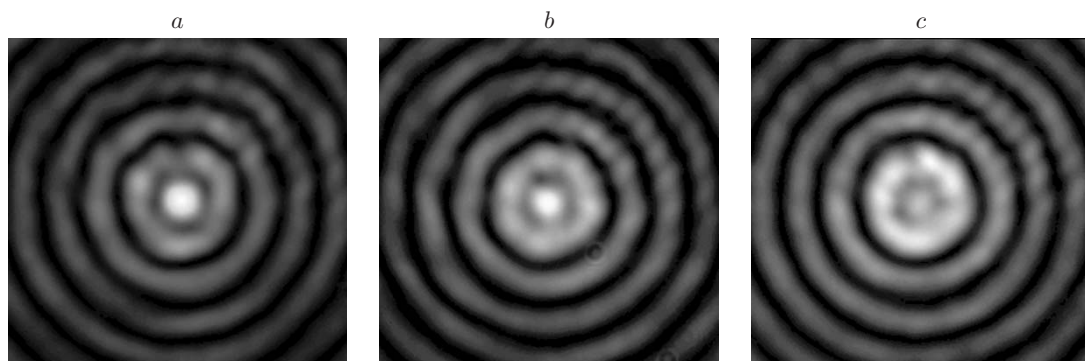


Рис. 3

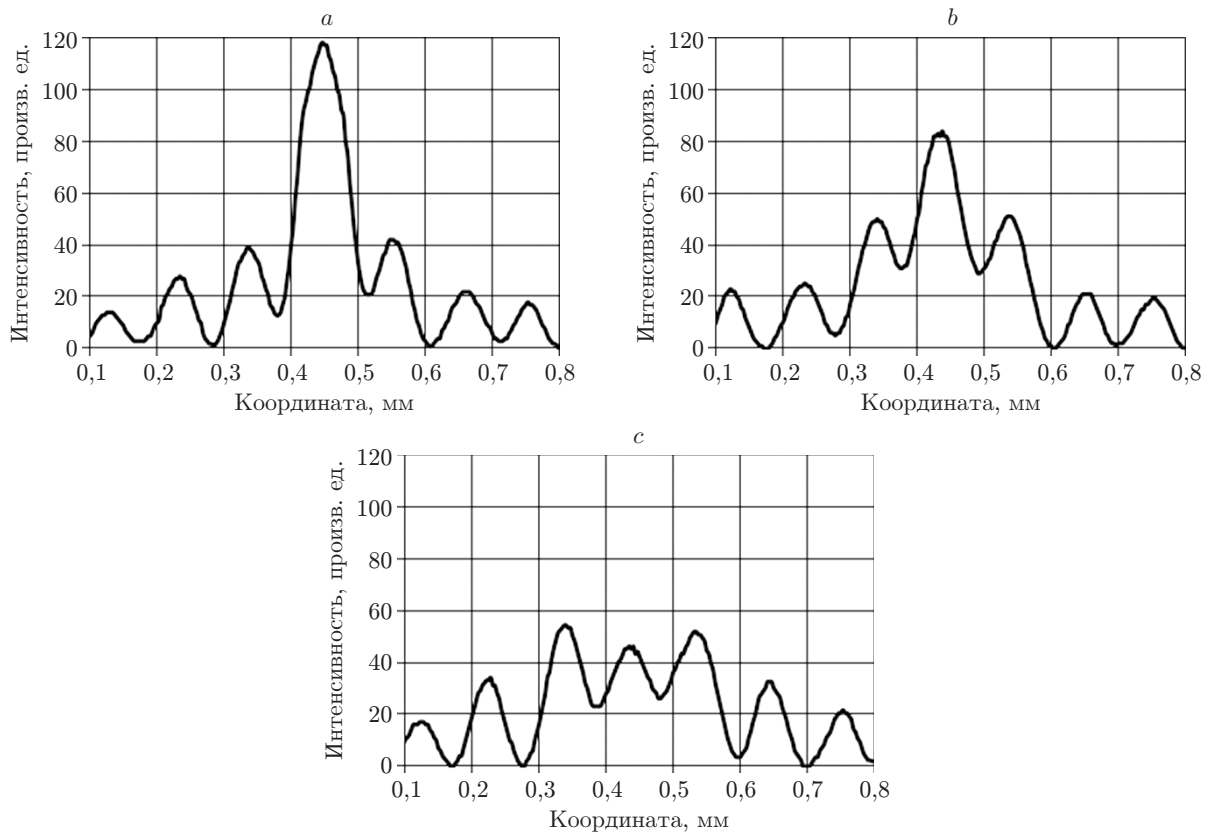


Рис. 4

пучки. В центральной части хорошо видно разделение вертикальной интерференционной полосы, соответствующее вихревой фазе пучка.

Динамические механизмы рассмотренного управления преобразованием пучка состоят в термическом расширении кристалла вдоль  $s$ -оси и термооптическом изменении показателей преломления и двулучепреломления кристалла. Для выявления степени влияния каждого из указанных динамических механизмов проведём их анализ, основанный на математических моделях [9–11].

**Теоретический анализ.** Для расчёта распределения интенсивности пучка Бесселя на выходе  $s$ -среза одноосного кристалла  $I(x, y)$ , освещаемого дифракционным аксиконом,

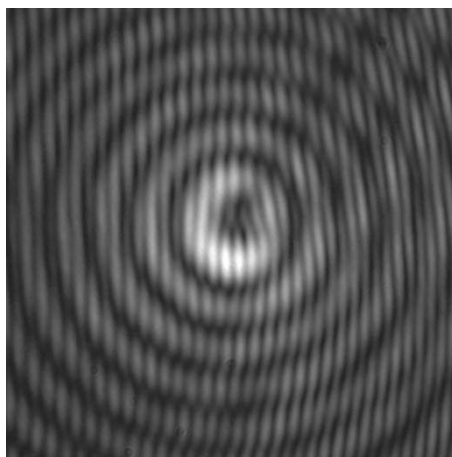


Рис. 5

в работе [9] была получена формула

$$I(x, y) \approx \frac{1}{2} |C|^2 J_0^2(k\alpha\sqrt{x^2 + y^2}) + \frac{1}{2} |S|^2 J_2^2(k\alpha\sqrt{x^2 + y^2}), \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновой вектор;  $\alpha$  — пространственная частота аксикона;  $J_0, J_2$  — функции Бесселя нулевого и второго порядков;  $C, S$  — условные величины:

$$C = \exp(jkz\gamma_o) + \exp(jkz\gamma_e); \quad S = \exp(jkz\gamma_o) - \exp(jkz\gamma_e). \quad (2)$$

Здесь  $z$  — толщина кристалла;  $\gamma_o, \gamma_e$  — величины, определяющие направление распространения обыкновенного и необыкновенного пучков:

$$\gamma_o = \sqrt{n_o^2 - \alpha^2}; \quad \gamma_e = \sqrt{n_o^2 - \alpha^2 n_o^2 / n_e^2}, \quad (3)$$

где  $n_o, n_e$  — обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла.

Из формул (1)–(3) следует, что при заданных значениях  $\lambda, \alpha, n_o, n_e$  вид пучка Бесселя определяется характеристическим отношением  $h/p$ . Причём дробная часть этого отношения обуславливает вид выходного пучка, а его полное значение — чувствительность к температурному изменению оптических характеристик кристалла и его толщины.

Дробная часть  $h/p$  может быть вычислена для каждой температуры на основе экспериментальных данных, приведённых на рис. 4. Для этого необходимо варьировать толщину кристалла  $h$ , выраженную в долях  $p$ , в формуле (2) до совпадения расчётного и измеренного распределений интенсивности  $I(x, y)$ . Определение периода пространственного преобразования пучков  $p$ , отсчитываемого вдоль  $c$ -оси кристалла, проводится по формуле [9]

$$p = \frac{\lambda}{2(\gamma_o - \gamma_e)}. \quad (4)$$

Отношение  $h/p$  при начальной температуре 21,1 °С вычислялось по измеренной микрометром МКЦ-25 толщине кристалла  $h = 15,007 \pm 2$  мкм и формуле (4). Значения  $h/p$  при температурах 45,7 и 70,5 °С находились по совпадению расчётного и измеренного распределений интенсивности пучка на основе (1)–(4). Такой комбинированный подход наиболее удачен, поскольку позволяет точно определить начальную рабочую точку температурной характеристики  $I(t, x, y)$ , вычислить целую и дробную части  $h/p$ .

При расчётах длина волны лазера  $\lambda = 0,6328$  мкм, пространственная частота  $\alpha = 0,159$ , показатели преломления  $n_o = 1,6557, n_e = 1,4852$ . Средний коэффициент теплового расширения кристалла  $\text{CaCO}_3$  вдоль  $c$ -оси принимался  $(1/h)(dh/dt) = 26,3 \cdot 10^{-6}$  1/град в диапазоне 0–80 °С [14], а термооптические коэффициенты —  $dn_o/dt = 0,9 \cdot 10^{-6}$  1/град,  $dn_e/dt = 10,8 \cdot 10^{-6}$  1/град [15].

Обработка экспериментальных данных показала, что для температур 21,1, 45,7 и 70,5 °С отношение  $h/p$  составило 87,48, 87,39 и 87,28 соответственно. Таким образом, увеличение температуры на 49,4 °С внесло регистрируемое изменение в 0,20 $p$ . При этом ожидаемое изменение, вычисленное на основе термооптических коэффициентов и коэффициента линейного расширения, составляет 0,19 $p$  ( $h/p = 87,48, 87,39, 87,29$ ). Полученное расхождение в 5 % может быть обусловлено погрешностью измерения температуры, отличием свойств механически зажатого кристалла от справочных, формой и стабильностью освещающего лазерного пучка. Лазерные пучки, рассчитанные по (1)–(4) для температур 21,1, 45,7, 70,5 °С, показаны на рис. 6,  $a$ – $c$ . Они практически совпадают с измеренными пучками на рис. 3. Следует отметить, что первое изображение, хотя и выглядит как

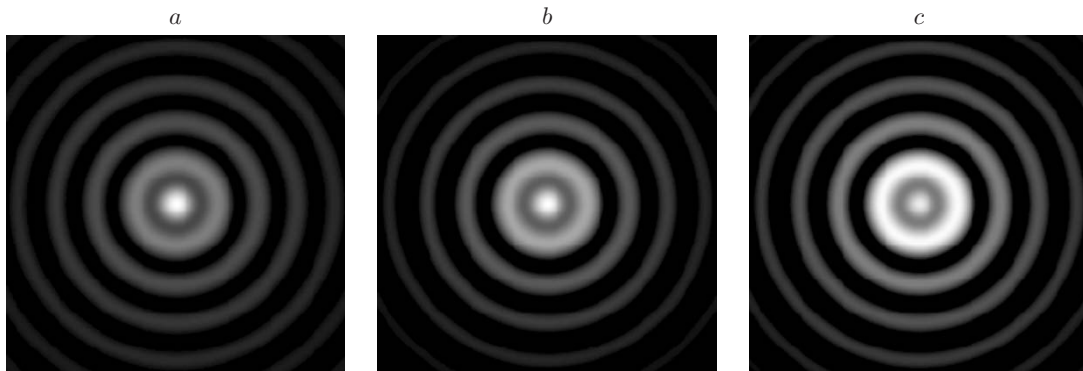


Рис. 6

непреобразованный пучок Бесселя нулевого порядка, в действительности уже имеет степень преобразования 0,5. Это определяется сочетанием длины кристалла и кривизны волнового фронта освещающего пучка.

Период преобразования  $p$ , вычисленный на основе термооптических коэффициентов, увеличивается. Согласно (4) при температурах 21,1, 45,7 и 70,5 °С он принимает значения 171,55, 171,84 и 172,14 мкм соответственно. Из этого следует противодействие термооптического изменения показателей преломления тепловому расширению кристалла, что существенно снижает эффективность температурного преобразования пучков Бесселя на основе кристалла  $\text{CaCO}_3$ . Для повышения чувствительности необходимо выбирать кристаллы с минимальными, а лучше — отрицательными термооптическими коэффициентами.

**Заключение.** В данной работе экспериментально исследовано преобразование пучков Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок Бесселя второго порядка в  $s$ -срезе кристалла  $\text{CaCO}_3$ . Показана возможность управления преобразованием пучка на выходе кристалла при изменении его температуры, обусловленная термооптическим эффектом и линейным расширением кристалла. При нагреве на 49,4 °С получено изменение, равное 0,20 от пространственного периода полного преобразования пучка. Выявлено противодействие механизмов термооптического изменения показателей преломления и линейного расширения кристалла, снижающее эффективность преобразования. Предложено повышение чувствительности формы выходного пучка к температуре при использовании кристаллов с минимальными или отрицательными термооптическими коэффициентами за счёт увеличения апертуры освещающего аксикона и толщины кристалла.

Рассмотренные подходы позволяют создавать компактные твердотельные устройства управления оптическим излучением для применения в задачах лазерной обработки, литографии, манипуляции микрочастицами. Входящие в конструкции подобных устройств дифракционные аксиконы могут быть изготовлены с высокой точностью на основе метода лазерной термохимической записи [16, 17].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsuoka Y., Kizuka Y., Inoue T. The characteristics of laser micro-drilling // Appl. Phys. A. 2006. **84**, N 4. P. 423–430.
2. Cagniot E., Fromager M., Godin T. et al. Transverse superresolution technique involving rectified Laguerre — Gaussian  $LG(p)^0$  beams // JOSA A. 2011. **28**, N 8. P. 1709–1715.
3. Tao S. H., Lee W. M., Yuan X. C. Dynamic optical manipulation with a high-order fractional Bessel beam generated from a spatial light modulator // Opt. Lett. 2003. **28**, N 20. P. 1867–1869.

4. **Garces-Chavez V., Volke-Sepulveda K., Chavez-Cerda S. et al.** Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle // *Phys. Rev. A*. 2002. **66**, N 6. 063402.
5. **Скиданов Р. В., Рыков М. А.** Суперпозиция вихревых световых пучков для захвата и перемещения биологических микрообъектов // *Компьютерная оптика*. 2013. **34**, № 3. С. 431–435.
6. **Хило Н. А., Петрова Е. С., Рыжевич А. А.** Преобразование порядка бesselевых пучков в одноосных кристаллах // *Квантовая электроника*. 2001. **31**, № 1. С. 85–89.
7. **Stepanov M. A.** Transformation of Bessel beams under internal conical refraction // *Opt. Commun.* 2002. **212**, N 1. P. 11–16.
8. **Zusin D. H., Maksimenka R., Filippov V. V. et al.** Bessel beam transformation by anisotropic crystals // *JOSA A*. 2010. **27**, N 8. P. 1828–1833.
9. **Хони́на С. Н., Волотовский С. Г., Харитонов С. И.** Особенности непараксиального распространения гауссовых и бesselевых мод вдоль оси кристалла // *Компьютерная оптика*. 2013. **37**, № 3. С. 297–306.
10. **Khonina S. N., Morozov A. A., Karpeev S. V.** Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal // *Laser Phys.* 2014. **24**, N 5. P. 056101–056105.
11. **Хони́на С. Н., Паранин В. Д., Карпеев С. В., Морозов А. А.** Исследование поляризационного преобразования и взаимодействия обыкновенного и необыкновенного пучков в непараксиальном режиме // *Компьютерная оптика*. 2014. **38**, № 4. С. 598–605.
12. **Zhu W., She W.** Electrically controlling spin and orbital angular momentum of a focused light beam in a uniaxial crystal // *Opt. Express*. 2012. **20**, N 23. P. 25876–25883.
13. **Zhu W., She W.** Electro-optically generating and controlling right- and left-handed circularly polarized multiring modes of light beams // *Opt. Lett.* 2012. **37**, N 14. P. 2823–2825.
14. **Кикоин И. К.** Таблицы физических величин: Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
15. **Palik E.** Handbook of Optical Constants of Solids. Maryland: Academic Press, 1997. 3224 p.
16. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Седухин А. Г. и др.** Прямая лазерная запись в плёнках хрома полутонных микроизображений с большим динамическим диапазоном // *Автометрия*. 2015. **51**, № 3. С. 87–93.
17. **Корольков В. П.** Чувствительность оптимизированного метода контурной маски к ошибкам процесса изготовления ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом // *Автометрия*. 2014. **50**, № 1. С. 9–19.

*Поступила в редакцию 7 июля 2015 г.*