

## ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ КОРРЕКТИРОВКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ ВДОЛЬ ОСИ КРИСТАЛЛА НИОБАТА БАРИЯ – СТРОНЦИЯ

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

<sup>1</sup> *Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,*

<sup>2</sup> *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия*

### Аннотация

Теоретически исследовано электрически управляемое преобразование пучков Бесселя, распространяющихся вдоль оптической оси электрооптического кристалла ниобата бария – стронция. Компьютерное моделирование показало возможность динамического изменения распределения интенсивности пучка на выходе из анизотропного кристалла за счет изменения показателей преломления в результате приложенного напряжения. На основе теоретического анализа и численного моделирования определено управляющее напряжение, необходимое для корректировки преобразования пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного дифракционным аксиконом, в вихревой пучок Бесселя второго порядка.

**Ключевые слова:** пучки Бесселя, анизотропный кристалл, вихревой пучок, электрооптическое управление, кристалл ниобата бария – стронция.

**Цитирование:** Хонина, С.Н. Электрооптическая корректировка преобразования пучков Бесселя вдоль оси кристалла ниобата бария – стронция / С.Н. Хонина, В.Д. Паранин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 475-481. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-475-481.

### Введение

Электрооптическое преобразование лазерных пучков может реализоваться двумя способами.

В первом способе формирование и преобразование происходит в комбинированном элементе, объединяющем дифракционную маску и управляющие электроды на поверхности электрооптического материала [1, 2].

Во втором случае формирование лазерного пучка осуществляется дифракционным оптическим элементом [3], а изменение его параметров производится в отдельной электроуправляемой части. Для управления произвольными лазерными пучками более удобен второй подход, обладающий большими возможностями как по генерации лазерных мод, так и по виду электроуправляемого воздействия (на фазу, поляризацию, амплитуду, направление распространения и др.).

Так, в работах [4, 5] было выполнено моделирование управления поляризацией, угловым и орбитальным моментом лазерных пучков Гаусса и Лаггера-Гаусса на основе электрооптического кристалла ниобата бария – стронция  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$  (SBN:75). Этот подход применим и к другим видам лазерных пучков, что расширяет возможности техники высокоразрешающей фотолинтографии [6], оптической микроманипуляции [7, 8], лазерной абляции [9, 10]. Использование электрооптического эффекта позволяет создавать быстродействующие динамические элементы в отличие от сравнительно медленных методов температурного, хроматического и оптико-механического управления лазерными пучками Бесселя [11–13].

Целью работы являлось теоретическое исследование электроуправляемого преобразования лазерных пучков Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок второго порядка. В качестве формирователя пучка Бесселя нулевого порядка рассматривается бинарная

кольцевая решетка – дифракционный аксикон. В качестве преобразующего элемента выбран электрооптический кристалл ниобата бария – стронция  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$  z-среза, обладающий высокой чувствительностью показателей преломления к напряженности электрического поля.

### 1. Расчет статического преобразования пучков Бесселя

В работах [14, 15] были разработаны теоретические основы, описывающие периодическое модовое преобразование лазерных пучков при распространении оптической оси кристалла в непараксиальном режиме. Физические основы этого явления, связанные с интерференцией обыкновенного и необыкновенного лучей при острой фокусировке лазерного излучения в анизотропной среде, обсуждались в работе [16].

Наиболее интересные результаты были получены для одномерно-поляризованных Бесселевых пучков:

$$\mathbf{B}_m(r, \varphi) = \begin{pmatrix} B_x(r, \varphi) \\ B_y(r, \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} J_m(k\sigma_0 r) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где  $B_x(r, \varphi)$ ,  $B_y(r, \varphi)$  – поперечные компоненты лазерного излучения,  $(r, \varphi)$  – полярные координаты,  $J_m(x)$  – функция Бесселя  $m$ -го порядка,  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения в вакууме,  $\sigma_0$  – параметр пучка,  $p_x, p_y$  – поляризационные коэффициенты.

Известно, что пучки Бесселя нулевого порядка можно формировать с помощью бинарной кольцевой решетки, представляющей собой дифракционный аксикон [17]:

$$\tau(r) = \text{sgn}[\cos(k\sigma_0 r)], \quad (2)$$

где  $\text{sgn}[x]$  – функция взятия знака.

В этом случае характеристики аксикона и параметр Бесселева пучка связываются через значение числовой апертуры аксикона:

$$\sigma_0 = \lambda/d, \tag{3}$$

где  $d$  – период кольцевой решетки.

На рис. 1а показана центральная часть (размером  $70 \times 70$  мкм) бинарного дифракционного аксикона с периодом  $d = 4$  мкм, а также результаты моделирования формирования пучка Бесселя нулевого порядка с помощью такого аксикона в однородной среде с показателем преломления  $n = 2,3$  при освещении равномерным лазерным пучком с длиной волны  $\lambda = 638,8$  нм. В данном случае числовая апертура аксикона небольшая и составляет  $\sigma_0 \approx 0,16$ . Как видно, пучок Бесселя сохраняет свою структуру на всем рассмотренном пути распространения за исключением роста интенсивности с увеличением  $z$  (рис. 1з). Последнее связано с фазовым характером аксикона [17] – при удалении от оптического элемента в формировании пучка начинают участвовать периферийные кольца, энергия от которых при освещении плоским пучком растет пропорционально площади колец.

Для пучков Бесселя нулевого порядка с круговой поляризацией  $p_y \pm ip_x$  было экспериментально показано [18], что при распространении вдоль оптической оси анизотропного кристалла будет происходить пе-

риодическое преобразование пучка нулевого порядка в вихревой пучок второго порядка и обратно.

Комплексное распределение поля в случае формирования пучка Бесселя с помощью дифракционного аксикона (2) можно записать в виде [14, 15]:

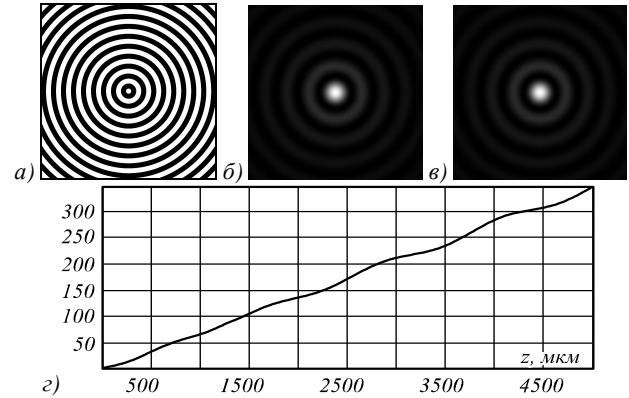


Рис. 1. Формирование пучка Бесселя нулевого порядка с помощью бинарного дифракционного аксикона с периодом  $d = 4$  мкм (а) в однородной среде с показателем преломления  $n = 2,3$  на расстоянии  $z = 1$  мкм (б) и  $z = 5$  мкм (в) (размер картин  $16 \times 16$  мкм), а также график распределения интенсивности вдоль оптической оси  $z$  (з)

$$\mathbf{E}(\rho, \theta, z) = k^2 \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ \pm i/\sqrt{2} \end{pmatrix} \left\{ \int_0^\infty \begin{pmatrix} SS(k\rho\sigma, \theta) & -SC(k\rho\sigma, \theta) \\ -SC(k\rho\sigma, \theta) & CC(k\rho\sigma, \theta) \end{pmatrix} \exp[ikz\gamma_o(\sigma)] F(\sigma) \sigma d\sigma + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \begin{pmatrix} CC(k\rho\sigma, \theta) & SC(k\rho\sigma, \theta) \\ SC(k\rho\sigma, \theta) & SS(k\rho\sigma, \theta) \end{pmatrix} \exp[ikz\gamma_e(\sigma)] F(\sigma) \sigma d\sigma \right\}, \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{\epsilon_o\sigma}{\epsilon_e\gamma_e(\sigma)} C(k\rho\sigma, \theta) & -\frac{\epsilon_o\sigma}{\epsilon_e\gamma_e(\sigma)} S(k\rho\sigma, \theta) \end{pmatrix}$$

где

$$F_m(\sigma) = \int_0^\infty \tau(r) J_m(kr\sigma) r dr, \tag{5}$$

$$\gamma_o(\sigma) = \sqrt{\epsilon_o - \sigma^2}, \quad \gamma_e(\sigma) = \sqrt{\epsilon_o - \sigma^2 (\epsilon_o / \epsilon_e)}, \tag{6}$$

$$\begin{aligned} C(t, \theta) &= iJ_1(t) \cos(\theta), \quad S(t, \theta) = iJ_1(t) \sin(\theta), \\ SC(t, \theta) &= -(1/2)J_2(t) \sin(2\theta), \\ CC(t, \theta) &= (1/2)[J_0(t) - J_2(t) \cos(2\theta)], \\ SS(t, \theta) &= (1/2)[J_0(t) + J_2(t) \cos(2\theta)], \end{aligned} \tag{7}$$

где  $\epsilon_o, \epsilon_e$  – диэлектрические проницаемости кристалла для обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно.

Приближенно (без учета продольной компоненты и считая пучок Бесселя идеальным) распределение поперечной интенсивности в кристалле можно записать в виде [14, 15]:

$$\begin{aligned} I(x, y) &\approx (1/2)|C|^2 J_0^2(k\sigma_0\sqrt{x^2+y^2}) + \\ &+ (1/2)|S|^2 J_2^2(k\sigma_0\sqrt{x^2+y^2}), \end{aligned} \tag{8}$$

где  $C, S$  – условные величины, равные:

$$\begin{aligned} C &= \exp(ikz\gamma_o) + \exp(ikz\gamma_e), \\ S &= \exp(ikz\gamma_o) - \exp(ikz\gamma_e). \end{aligned} \tag{9}$$

где  $z$  – толщина кристалла.

При этом интенсивность на оптической оси испытывает периодические изменения в зависимости от пройденного расстояния  $z$  в анизотропной среде:

$$I(z) \sim 1 + \cos(kz[\gamma_e(\sigma_0) - \gamma_o(\sigma_0)]). \tag{10}$$

Заметим, что формулы (8) и (10) описывают поведение в кристалле идеального пучка Бесселя, в случае использования аксикона отличие будет состоять в линейном росте интенсивности, как пояснялось к рис. 1з.

Используя выражения (4)–(7), выполним расчет преобразования для пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного дифракционным аксиконном, при распространении в кристалле ниобата бария-стронция  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ , имеющем обыкновенный и необыкновенный показатели преломления  $n_o = 2,3117, n_e = 2,2987$  на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм. Результаты моделирования показаны на рис. 2, из которых видно, что при распространении в анизотропной среде пучок

Бесселя нулевого порядка преобразуется в пучок Бесселя второго порядка. Причем, судя по графику осевой интенсивности (рис. 2е), при толщине кристалла 5 мм происходит полное преобразование.

Однако из соображений компактности может потребоваться использование более тонкого кристалла. В этом случае можно увеличить числовую апертуру аксикона, формирующего пучок Бесселя. На рис. 3 показаны результаты моделирования для аксикона с периодом  $d=2$  мкм, что соответствует увеличению числовой апертуры в два раза ( $\sigma_0 \approx 0,32$ ). Как видно, совершив два полных цикла, на выходе кристалла пучок возвращается в исходное состояние.

Заметим, что уменьшение периода аксикона может быть ограничено не только технологическими возможностями [19], но и предельной числовой апертурой [20], при которой в рассматриваемой оптической среде имеют место распространяющиеся волны.

На рис. 4 показаны результаты моделирования для аксикона с периодом  $d=1,3$  мкм ( $\sigma_0 \approx 0,48$ ). Такой аксикон может быть изготовлен с помощью установки круговой лазерной записи CLWS-200 на пределе технологических возможностей [21].

Из рис. 4 видно, что в кристалле происходит несколько циклов преобразования пучка Бесселя нулевого

порядка в пучок второго порядка и обратно. Причем на выходе кристалла достигается некая средняя фаза преобразования. Чтобы получить некоторое определенное состояние на выходе кристалла, нужно подобрать/оптимизировать характеристики лазерного излучения, например, изменяя период аксикона или длину волны.

Для облегчения этой задачи вместо (10) можно воспользоваться параксиальным выражением [14, 15]

$$I(z) \sim 1 + \cos\left(kz\sigma_0^2\left[\frac{1-n_o^2/n_e^2}{2n_o}\right]\right) \quad (11)$$

и напрямую связать характеристики кристалла и параметры падающего на кристалл пучка с периодом преобразования. Таким образом, полное преобразование будет происходить для кристаллов толщиной:

$$h_q = (2\lambda n_o / \sigma_0^2 (1 - n_o^2 / n_e^2)) (0,5 + q), \quad (12)$$

$q$  – целое положительное число.

Для рассматриваемого кристалла мы получаем следующее выражение для выбора периода аксикона:

$$d_q \approx 0,04 \sqrt{h / (q + 0,5)}. \quad (13)$$

В частности, чтобы в кристалле толщиной  $h=5$  мм произошло  $q=4$  преобразования, период аксикона должен быть равен  $d=1,33$  мкм, т.е. немного больше, чем в случае, представленном на рис. 4.

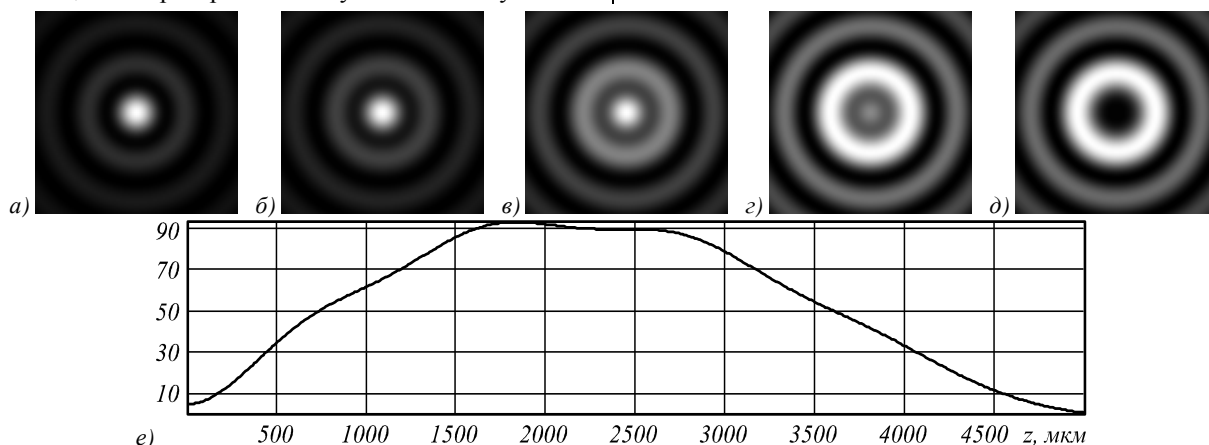


Рис. 2. Распространение пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного с помощью аксикона с периодом  $d=4$  мкм вдоль оси кристалла ниобата бария-стронция, на расстоянии  $z=1$  мм (а),  $z=2$  мм (б),  $z=3$  мм (в),  $z=4$  мм (г) и  $z=5$  мм (д) (размер картин  $10 \times 10$  мкм), а также график распределения интенсивности вдоль оптической оси  $z$  (е)

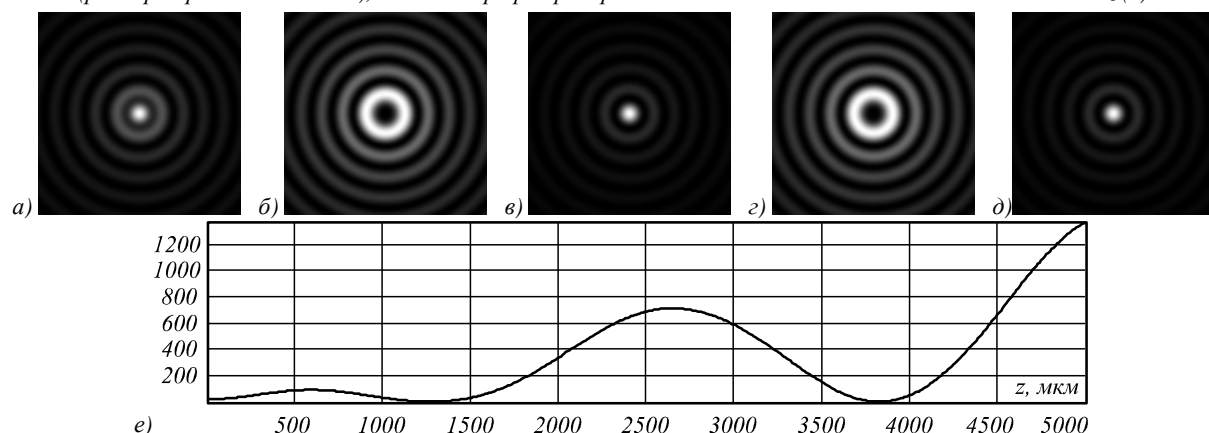


Рис. 3. Распространение пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного с помощью аксикона с периодом  $d=2$  мкм вдоль оси кристалла ниобата бария-стронция, на расстоянии  $z=0,6$  мм (а),  $z=1,3$  мм (б),  $z=2,6$  мм (в),  $z=3,8$  мм (г) и  $z=5$  мм (д) (размер картин  $10 \times 10$  мкм), а также график распределения интенсивности вдоль оптической оси  $z$  (е)

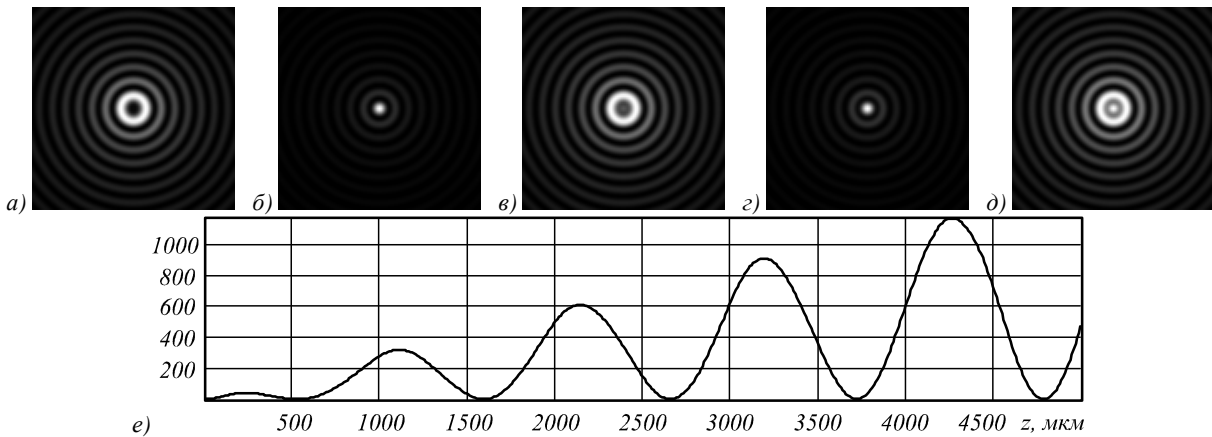


Рис. 4. Распространение пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного с помощью аксикона с периодом  $d = 1,3$  мкм вдоль оси кристалла ниобата бария–стронция, на расстоянии  $z = 0,5$  мм (а),  $z = 1$  мм (б),  $z = 1,5$  мм (в),  $z = 2$  мм (г) и  $z = 2,5$  мм (д) (размер картин  $10 \times 10$  мкм), а также график распределения интенсивности вдоль оптической оси  $z$  (е)

**2. Расчет динамического преобразования пучков Бесселя**

Для достижения некоторого определенного состояния выходного пучка необходимо менять характеристики кристалла. Так, в работе [12] для изменения размерных и оптических характеристик кристалла использовался нагрев. Однако подход не слишком удобен из-за длительности процесса нагрева/остывания. Поэтому электрооптическое управление показателями преломления кристалла, обладающее существенно лучшим быстродействием, представляет особый интерес.

С этой целью выполнен анализ применимости электрооптического кристалла ниобата бария–стронция  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ . Используем случай продольного электрооптического эффекта  $E_z || z$  и  $k || z$ , который реализуется для  $z$ -среза кристалла с прозрачными электродами, нанесенными на его входную и выходную поверхности. Расположение оптических элементов и ориентация кристалла поясняется на рис. 5.

Показатели преломления кристалла ниобата бария–стронция  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$  для продольного линейного электрооптического эффекта с  $E_z || z$  и  $k || z$  имеют вид [22]:

$$n_z \approx n_e - (1/2)n_e^3 r_{33} E_z n_z \approx n_e - (1/2)n_e^3 r_{33} E_z \quad (14)$$

где  $r_{13} = 67 \cdot 10^{-12}$ ,  $r_{33} = 1340 \cdot 10^{-12}$  – линейные электрооптические коэффициенты, м/В [23]. Напряженность электрического поля в формулах (11) вычисляется через напряжение на электродах  $U$  (В) и толщину кристалла  $h$  (м) следующим образом:

$$E_z = U / h \quad (15)$$

Для рассматриваемого кристалла толщиной  $h = 5$  мм с приложенным напряжением  $U = 400$  В изменения для показателей преломления составляют:  $\Delta n_o \approx 3,25 \cdot 10^{-5}$  и  $\Delta n_e \approx 6,51 \cdot 10^{-4}$  соответственно. На рис. 6 показаны результаты моделирования для аксикона с периодом  $d = 1,33$  мкм в отсутствие напряжения и с приложенным к кристаллу напряжением  $U = -400$  В. Как видно, такого напряжения достаточно, чтобы согласовать характеристики лазерного излучения и кристалла и получить на выходе полностью преобразованный пучок.

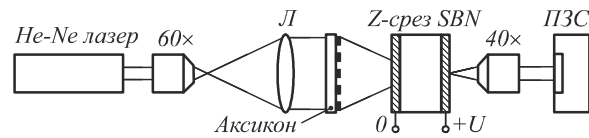


Рис. 5. Схема установки для электрооптического преобразования пучков Бесселя

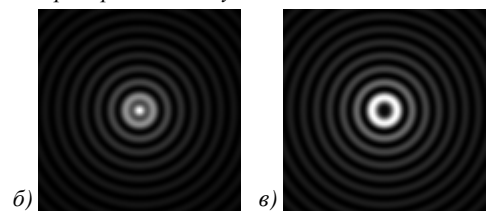
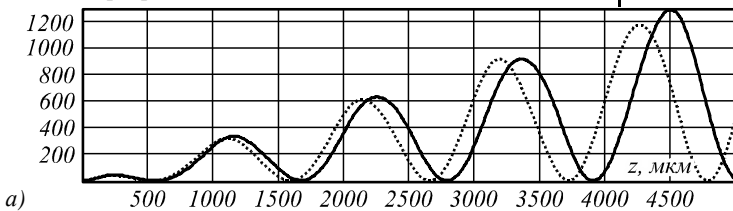


Рис. 6. Распространение пучка Бесселя нулевого порядка, сформированного с помощью бинарного дифракционного аксикона с периодом  $d = 1,33$  мкм вдоль оси кристалла ниобата бария–стронция: график распределения интенсивности вдоль оптической оси  $z$  (без напряжения – точечная линия и с приложенным напряжением  $U = -400$  В – сплошная линия) и распределение на выходе кристалла (а) в отсутствие напряжения (б) и с приложенным к кристаллу напряжением  $U = -400$  В (в); размер картин –  $10 \times 10$  мкм

Из результатов расчетов следует, что полное преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в пучок второго порядка происходит при напряжении около 400 В. Необходимая напряженность поля составляет  $E_z \approx 0,8$  кВ/см, что меньше коэрцитивного поля  $E_c \approx 1$  кВ/см для SBN:75 [24].

**Заключение**

Теоретически исследованы особенности статического и динамического (электрооптического) преобразования пучков Бесселя вдоль оси кристалла  $Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ .

Показана возможность электрически управляемого преобразования пучка Бесселя нулевого или второго порядков, а также их заданного сочетания в тонких кристаллах толщиной 5 мм за счет использования дифракционных аксиконов с высокой числовой апертурой ( $\sigma_0 \approx 0,48$ ). При рассмотренных параметрах напряженность электрического поля в кристалле не превосходит предельного (коэрцитивного) поля, что обеспечивает длительное сохранение его свойств.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, а также Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 16-07-00825, 16-29-11698-офи\_м).

### Литература

1. **Ye, Q.** High-efficiency electrically tunable diffraction grating based on a transparent lead magnesium niobate-lead titanite electro-optic ceramic / Q. Ye, L. Qiao, H. Cai, R. Qu // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 13. – P. 2453-2455. – DOI: 10.1364/OL.36.002453.
2. **Paranin, V.D.** Methods to control parameters of a diffraction grating on the surface of lithium niobate electro-optical crystal / V.D. Paranin // *Technical Physics*. – 2014. – Vol. 59(11). – P. 1723-1727. – DOI: 10.1134/S1063784214110206.
3. *Computer Design of Diffractive Optics* / D.L. Golovashkin, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov; ed. by V.A. Soifer. – Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing, 2012. – 896 p. – ISBN: 978-1-84569-635-1.
4. **Zhu, W.** Electro-optically generating and controlling right- and left-handed circularly polarized multiring modes of light beams / W. Zhu, W. She // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(14). – P. 2823-2825. – DOI: 10.1364/OL.37.002823.
5. **Zhu, W.** Electrically controlling spin and orbital angular momentum of a focused light beam in a uniaxial crystal / W. Zhu, W. She // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 23. – P. 25876-25883. – DOI: 10.1364/OE.20.025876.
6. **Cagniot, E.** Transverse superresolution technique involving rectified Laguerre-Gaussian  $LG_p^0$  beams / E. Cagniot, M. Fromager, T. Godin, N. Passilly, K. Ait-Ameur // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28, Issue 8. – P. 1709-1715. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.001709.
7. **Yao, A.M.** Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / A.M. Yao, M.J. Padgett // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – Vol. 3, Issue 2. – P. 161-204. – DOI: 10.1364/AOP.3.000161.
8. **Soifer, V.A.** Optical Microparticle Manipulation: Advances and New Possibilities Created by Diffractive Optics / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // *Physics of Particles and Nuclei*. – 2004. – Vol. 35, Issue 6. – P. 733-766.
9. **Matsuoka, Y.** The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam / Y. Matsuoka, Y. Kizuka, T. Inoue // *Applied Physics A*. – 2006. – Vol. 84, Issue 4. – P. 423-430. – DOI: 10.1007/s00339-006-3629-6.
10. **Алфёров, С.В.** О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065. – DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
11. **Paranin, V.D.** Transformation of Bessel beams in c-cuts of uniaxial crystals by varying the emission source wavelength / V.D. Paranin, S.V. Karpeev, S.N. Khonina // *Journal of Russian Laser Research*. – 2016. – Vol. 37(3). – P. 250-253. – DOI: 10.1007/s10946-016-9567-7.
12. **Паранин, В.Д.** Управление оптическими свойствами кристалла  $\text{CaCO}_3$  в задачах формирования вихревых пучков Бесселя путём нагрева / В.Д. Паранин, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев // *Автометрия*. – 2016. – Т. 52, № 2. – P. 81-87. – DOI: 10.15372/AUT20160210.
13. **Паранин, В.Д.** Управление формированием вихревых пучков Бесселя в с-срезах одноосных кристаллов за счёт изменения расходимости пучка / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46, № 2. – С. 163-168.
14. **Хонина, С.Н.** Особенности непараксиального распространения гауссовых и бесселевых мод вдоль оси кристалла / Хонина, С.Н., Волоотовский С.Г., Харитонов С.И. // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 297-306.
15. **Khonina, S.N.** Comparative investigation of nonparaxial mode propagation along the axis of uniaxial crystal / S.N. Khonina, S.I. Kharitonov // *Journal of Modern Optics*. – 2015. – Vol. 62(2). – P. 125-134. – DOI: 10.1080/09500340.2014.959085.
16. **Khonina, S.N.** Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.A. Morozov, V.D. Paranin // *Journal of Modern Optics*. – 2016. – Vol. 63, Issue 13. – P. 1239-1247. – DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
17. **Vasara, A.** Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms / A. Vasara, J. Turunen, A.T. Friberg // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1989. – Vol. 6. – P. 1748-1754. – DOI: 10.1364/JOSAA.6.001748.
18. **Khonina, S.N.** Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal / S.N. Khonina, A.A. Morozov, S.V. Karpeev // *Laser Physics*. – 2014. – Vol. 24(5). – 056101 (5 pp). – DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
19. **Полешук, А.Г.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: анализ погрешностей изготовления и их измерение / А.Г. Полешук, В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // *Автометрия*. – 1997. – № 6. – С. 42-56.
20. **Устинов, А.В.** Анализ дифракции лазерного излучения на аксиконе с числовой апертурой выше предельной / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*, 2014. – Т. 38, № 2. – С. 213-222.
21. **Агафонов, А.Н.** Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров структуры светочувствительной плёнки хрома / А.Н. Агафонов, О.Ю. Моисеев, А.А. Корлюков // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 101-108.
22. **Ярив, А.** Оптические волны в кристаллах: пер. с англ. / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
23. **Кузьминов, Ю.С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением / Ю.С. Кузьминов. – М.: Наука, 1982. – 400 с.
24. **Волк, Т.Р.** Процесс поляризации кристаллов ниобата бария – стронция в импульсных полях / Т.Р. Волк, Д.В. Исаков, Л.И. Ивлева // *Физика твердого тела*. – 2003. – Т. 45, Вып. 8. – С. 1463-1468.

**Сведения об авторах**

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Паранин Вячеслав Дмитриевич**, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (ныне Самарский университет) по специальности 210201 «Проектирование и технология электронных средств», работает ассистентом кафедры нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением. E-mail: [vparanin@mail.ru](mailto:vparanin@mail.ru).

ГРПТИ: 29.31.15 и 29.33.17.

Поступила в редакцию 12 августа 2016 г. Окончательный вариант – 19 августа 2016 г.

## ELECTRO-OPTICAL CORRECTION OF BESSEL BEAM CONVERSION ALONG THE AXIS OF A BARIUM NIOBATE-STRONTIUM CRYSTAL

S.N. Khonina<sup>1,2</sup>, V.D. Paranin<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

**Abstract**

We perform a theoretical study of the electrically controlled transformation of Bessel beams propagating along the optical axis of an electro-optical barium niobate-strontium crystal. Computer modeling has shown the ability of the anisotropic crystal to dynamically change the output intensity distribution of the beam due to a change in the refractive index as a result of the applied voltage. On the basis of theoretical analysis and numerical simulation we specify the control voltage required to correct the conversion of the zero-order Bessel beam generated by a diffractive axicon into a second-order vortex Bessel beam.

**Keywords:** Bessel beams, anisotropic crystal, vortex beam, electro-optical controlling, crystal of barium niobate-strontium.

**Citation:** Khonina SN, Paranin VD. Electro-optical correction of Bessel beam conversion along axis of a barium niobate-strontium crystal. *Computer Optics* 2016, 40(4): 475-481. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-475-481.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the RF Ministry of Education and Science and by the Russian Foundation for Basic Research (grants 16-07-00825, 16-29-11698-ofi\_m).

**References**

- [1] Ye Q, Qiao L, Cai H, Qu R. High-efficiency electrically tunable diffraction grating based on a transparent lead magnesium niobate-lead titanate electro-optic ceramic. *Optics Letters* 2011; 36(13): 2453-2455. DOI: 10.1364/OL.36.002453.
- [2] Paranin VD. Methods to control parameters of a diffraction grating on the surface of lithium niobate electro-optical crystal. *Technical Physics* 2014; 59(11): 1723-1727. DOI: 10.1134/S1063784214110206.
- [3] Soifer VA, ed. *Computer Design of Diffractive Optics*. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing; 2012. ISBN: 978-1-84569-635-1.
- [4] Zhu W, She W. Electro-optically generating and controlling right- and left-handed circularly polarized multiring modes of light beams. *Optics Letters* 2012; 37(14): 2823-2825. DOI: 10.1364/OL.37.002823.
- [5] Zhu W, She W. Electrically controlling spin and orbital angular momentum of a focused light beam in a uniaxial crystal. *Optics Express* 2012; 20(23): 25876-25883. DOI: 10.1364/OE.20.025876.
- [6] Cagniot E, Fromager M, Godin T, Passilly N, Ait-Ameur K. Transverse superresolution technique involving rectified Laguerre-Gaussian LG(p)0 beams. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(8): 1709-1715. DOI: 10.1364/JOSAA.28.001709.
- [7] Yao AM, Padgett MJ. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications. *Advances in Optics and Photonics* 2011; 3(2): 161-204. DOI: 10.1364/AOP.3.000161.
- [8] Soifer VA, Kotlyar VV, Khonina SN. Optical Microparticle Manipulation: Advances and New Possibilities Created by Diffractive Optics. *Physics of Particles and Nuclei* 2004; 35(6): 733-766.
- [9] Matsuoka Y, Kizuka Y, Inoue T. The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam. *Applied Physics A* 2006; 84(4): 423-430. DOI: 10.1007/s00339-006-3629-6.
- [10] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Tukmakov KN, Moiseev OYu, Shulyapov SA, Ivanov KA, Savel'ev-Trofimov AB. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation. *Quantum Electronics* 2014; 44(11): 1061-1065. DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
- [11] Paranin VD, Karpeev SV, Khonina SN. Transformation of Bessel beams in c-cuts of uniaxial crystals by varying the emission source wavelength. *Journal of Russian Laser Research* 2016; 37(3): 250-253. DOI: 10.1007/s10946-016-9567-7.

- [12] Paraniin VD, Khonina SN, Karpeev SV. Control of the optical properties of a CaCO<sub>3</sub> crystal in problems of generating Bessel vortex beams by heating. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2016; 52(2): 174-179. DOI: 10.3103/S8756699016020102.
- [13] Paraniin VD, Karpeev SV, Khonina SN. Control of the formation of vortex Bessel beams in uniaxial crystals by varying the beam divergence. *Quantum Electronics* 2016; 46(2): 163-168. DOI: 10.1070/QEL15880.
- [14] Khonina SN, Volotovskiy SG, Kharitonov SI. Features of nonparaxial propagation of Gaussian and Bessel beams along the axis of the crystal. *Computer Optics* 2013; 37(3): 297-306.
- [15] Khonina SN, Kharitonov SI. Comparative investigation of nonparaxial mode propagation along the axis of uniaxial crystal. *Journal of Modern Optics* 2015; 62(2): 125-134. DOI: 10.1080/09500340.2014.959085.
- [16] Khonina SN, Karpeev SV, Morozov AA, Paraniin VD. Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements. *J Mod Opt* 2016; 63(13): 1239-1247. DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
- [17] Vasara A, Turunen J, Friberg AT. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms. *J Opt Soc Am A* 1989; 6: 1748-1754. DOI: 10.1364/JOSAA.6.001748.
- [18] Khonina SN, Morozov AA, Karpeev SV. Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal. *Laser Physics* 2014; 24(5): 056101. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
- [19] Cherkashin VV, Kharissov AA, Korol'kov VP, Koronkevich VP, Poleshchuk AG. Accuracy potential of circular laser writing of DOEs. *Proceedings of SPIE* 1997, 3348: 58-68
- [20] Ustinov AV, Khonina SN. Analysis of laser beam diffraction by axicon with the numerical aperture above limiting. *Computer Optics* 2014; 38(2): 213-222.
- [21] Agafonov AN, Moiseev OY, Korlyukov AA. Analysis of dependence of local thermochemical oxidation technology resolution from photosensitive chrome film structure parameters. *Computer Optics* 2010; 34(1): 101-108.
- [22] Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons; 1983. ISBN: 978-0471091424.
- [23] Kuz'minov YuS. *Ferroelectric crystals for laser control* [in Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1982.
- [24] Volk TR, Isakov DV, Ivleva LI. Polarization of strontium-barium niobate crystals in pulsed fields. *Physics of the Solid State* 2003; 45(8): 1537-1542. DOI: 10.1134/1.1602893.

---

#### *Authors' information*

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; she works as a Professor of Samara National Research University and the chief researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulation, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Vyacheslav Dmitrievich Paraniin** (b. 1986) graduated from Samara State Aerospace University in 2010, majoring in Design and Technology of Radio-electronic Equipment. Currently he works as an associate professor at Nanoengineering sub-department of Samara National Research University. Research interests are methods and devices for controlling the laser radiation. E-mail: [vparaniin@mail.ru](mailto:vparaniin@mail.ru).

---

*Received August 12, 2016. The final version – August 19, 2016.*

---