

Амплитудные и поляризационные преобразования пучка Бесселя при прохождении в анизотропном кристалле перпендикулярно оси кристалла

А.В. Глазкова^а, М.В. Забловская^а, В.В. Подлипнов^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В работе выполнен сравнительный численный расчёт распространения лазерного пучка Бесселя нулевого порядка в одноосном кристалле перпендикулярно его оси с помощью интегрального оператора Рэлея-Зоммерфельда, обобщенного для анизотропной среды. Численное моделирование выполнено с различным типом поляризации пучков и различными характеристиками пучка Бесселя. Получены картины интенсивности пучка при прохождении различных расстояний в кристалле, показывающие степень астигматического преобразования, что позволяет определить условия, при которых происходит наибольшее астигматическое искажение пучков. Проведённый анализ может быть полезен на практике для определения характеристик анизотропии кристалла.

Ключевые слова: дифракционный аксикон; двулучепреломляющий кристалл; поляризационные преобразования; амплитудные преобразования; пучки Бесселя; астигматизм.

1. Введение

Все больший интерес и практическое применение приобретают оптические устройства, позволяющие преобразовывать одни свойства электромагнитного излучения в другие. Чаще всего требуются модовые преобразования (из фундаментальной моды в распределения более высокого порядка) и поляризационные (из однородной линейной поляризации в более сложные). Одним из инструментов таких преобразований являются анизотропные кристаллы. Распространение лазерных мод с высокой числовой апертурой в среде с сильной анизотропией приводит к сложным поляризационно-модовым преобразованиям [1-6].

В частности, при распространении вдоль оси кристалла происходит преобразование спинового углового момента, который имеет пучок с круговой поляризацией, в орбитальный угловой момент [7-13]. В работах [6, 7, 11-13] было показано, что при распространении вдоль оси кристалла непараксиальные пучки Бесселя испытывают периодическое изменение интенсивности, соответствующее преобразованию в пучок более высокого порядка. В публикациях [14-20] рассматривались поляризационные преобразования пучков, сфокусированных вдоль оси кристалла.

В работах [21-26] исследовалось распространение различных типов лазерных пучков перпендикулярно оси кристалла. При этом наиболее интересные преобразования наблюдались для бесселевых пучков [16, 21, 24, 27], так как в этом случае происходит визуально выраженное астигматическое искажение кольцевой структуры пучка. Аналогичное искажение можно наблюдать при наклонном падении плоской волны на дифракционный аксикон [28-30], а также при использовании цилиндрической линзы [31]. Эта аналогия была отмечена в работе [24], а аналитическое обоснование такого эффекта было приведено в [27].

В данной работе детально на основе численного моделирования исследуется эффект астигматического преобразования пучков Бесселя при распространении перпендикулярно оси кристалла. Расчет выполнен с помощью интегрального оператора Рэлея-Зоммерфельда, обобщенного для анизотропной среды [32, 33]. Численное моделирование выполнено для различных типов поляризации пучков и различными характеристиками пучка Бесселя. Формирование пучков Бесселя [34-37] осуществлялось с помощью дифракционных аксиконов с различным периодом радиальной решетки. Исследовано влияние относительного положения плоскости поляризации излучения и с-оси кристалла на распределения интенсивности, формируемые в различных векторных компонентах обыкновенного и необыкновенного пучков. Получены картины интенсивности пучка при прохождении различных расстояний в кристалле, показывающие степень астигматического преобразования, что позволяет определить условия, при которых происходит наибольшее астигматическое искажение пучков. Проведённый анализ может быть полезен на практике для определения характеристик анизотропии кристалла.

2. Теоретический анализ

Рассмотрим анизотропный кристалл, ось которого ориентирована перпендикулярно оси распространения и совпадает с осью Oy . В этом случае распространение поля $\mathbf{E}_\perp(x, y, 0)$ в кристалле с диэлектрическими проницаемостями ϵ_o , ϵ_e (обыкновенной и необыкновенной) можно описать выражением, похожим на интеграл Рэлея-Зоммерфельда [32, 33]:

$$\mathbf{E}(u, v, z) = \frac{2\pi z}{\lambda^2} \sum_{j=1}^2 \iint \mathbf{e}_j(\alpha_{jc}, \beta_{jc}) \left[\mathbf{w}_j(\alpha_{jc}, \beta_{jc})^T \mathbf{E}_\perp(x, y, 0) \right] \frac{\sqrt{d_j s_j t_j}}{R_j^2} \exp \left\{ ik \sqrt{\frac{d_j}{s_j t_j}} R_j \right\} dx dy, \quad (1)$$

где индексы соответствуют обыкновенной ($j=1$) и необыкновенной ($j=2$) волнам, $d_1 = d_2 = \varepsilon_o$, $s_1 = t_1 = 1$, $s_2 = t_2 = \varepsilon_o / \varepsilon_e$.

Для поперечных (x- и y-компонент):

$$\begin{aligned} e_{1x}(\alpha, \beta) &= 1, \\ e_{1y}(\alpha, \beta) &= 0, \\ e_{2x}(\alpha, \beta) &= \alpha\beta, \\ e_{2y}(\alpha, \beta) &= \beta^2 - \varepsilon_o. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_1(\alpha, \beta)^T &= \left(1, \frac{\alpha\beta}{(\varepsilon_o - \beta^2)} \right), \\ \mathbf{w}_2(\alpha, \beta)^T &= \left(0, -\frac{1}{(\varepsilon_o - \beta^2)} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha_{1c} = \sqrt{\varepsilon_o} \frac{(u-x)}{R_1}, \\ \beta_{1c} = \sqrt{\varepsilon_o} \frac{(v-y)}{R_1}, \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_{1c} = \sqrt{\varepsilon_o} \frac{(u-x)}{R_1}, \\ \beta_{1c} = \sqrt{\varepsilon_o} \frac{(v-y)}{R_1}, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z^2}, \\ R_2 &= \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_o} \sqrt{(u-x)^2 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_e} (v-y)^2 + z^2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичные результаты можно получить, если ось кристалла будет направлена вдоль оси Oх.

3. Результаты численного моделирования

При проведении эксперимента был использован аксикон. Схема работы аксикона представлена на рис. 1

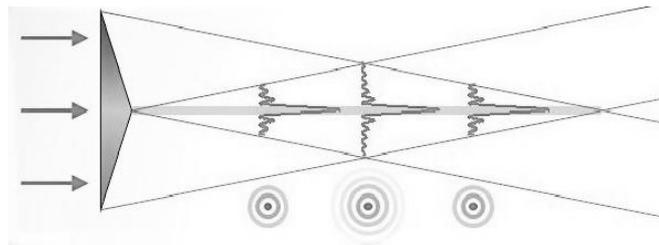


Рис. 1. Схема работы аксикона.

Для проведения моделирования в качестве анизотропной среды в данной работе был выбран кристалл ниобата лития X-срез, диэлектрические проницаемости которого: $\varepsilon_o = 5.2273505956$, $\varepsilon_e = 4.8517551289$. Показатели преломления данного кристалла: $n_o = 2.28634$, $n_e = 2.20267$. Для формирования пучков Бесселя нулевого порядка использовались дифракционные аксиконы с периодами $d_1 = 1,2$ мкм, $d_2 = 2$ мкм, $d_3 = 4$ мкм освещаемые светом, поляризованным линейно вдоль оси OY, с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. Также в работе проводилось сравнение результатов преобразования при различных толщинах кристалла, которые выбирались $h_1 = 1047$ мкм и $h_2 = 843$ мкм. Для анализа преобразования пучков Бесселя аксиконами результаты моделирования представлялись в виде картин распределения света распространяющихся пучков отдельно для поляризованного света вдоль OX, отдельно для OY и их суперпозиции. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Можно отметить, что картина Y компоненты практически не отличается от картины суперпозиции X и Y компонент, что означает, что X компонента имеет пренебрежимо малую интенсивность, а линейно поляризованный свет на выходе из кристалла ниобата лития не изменил своей поляризации.

Таблица 1. Картины распространения пучков Бесселя сформированных аксиконами при освещении светом поляризованным вдоль оси ОУ сквозь анизотропный кристалл X-среза

| | d1=1,2мкм | | d2=2мкм | | d3=4мкм | |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Компонента | h1=1,047 мм | h2=0,843 мм | h1=1,047 мм | h2=0,843 мм | h1=1,047 мм | h2=0,843 мм |
| Общая | | | | | | |
| x | | | | | | |
| y | | | | | | |

Как видно по моделируемым картинам распределения интенсивности преобразованных в анизотропном кристалле ниобата лития пучкам Бесселя наиболее сильным астигматическим искажениям подвержены пучки, сформированные аксиконами с минимальным периодом. С увеличением толщины кристалла степень астигматизма увеличивается пропорционально длине распространения.

При анализе картин распределения интенсивности света на выходе из анизотропного кристалла для линейно поляризованного света вдоль оси Y, с круговой поляризацией, поляризацией повернутой на угол 45° относительно оси X высказанный выше характер преобразования пучков Бесселя сохраняется.

4. Заключение

В работе для проведения анализа зависимости распространения пучка Бесселя нулевого порядка от угла поляризации, от периода и радиуса аксикона использовался расчет с помощью интегрального оператора Рэлея-Зоммерфельда, обобщенного для анизотропной среды. Наиболее сильному преобразованию подвергаются пучки Бесселя сформированные аксиконом с наименьшим периодом и проходящие сквозь анизотропный кристалл на наибольшее расстояние. Описываемые закономерности могут использоваться на практике для определения степени анизотропии или точной толщины срезов кристалла.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 16-07-00825 и 16-29-11698 оф_и_м) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

- [1] Zhou, Y. Nonparaxial analysis in the propagation of a cylindrical vector Laguerre-Gaussian beam in a uniaxial crystal orthogonal to the optical axis / Y. Zhou, X. Wang, Ch. Dai et al. // Opt. Commun. – 2013 – Vol. 305, p. 113-125.
- [2] Хонина, С.Н. Особенности непараксиального распространения гауссовых и бесселевых мод вдоль оси кристалла / С. Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, С.И. Харитонов. // Компьютерная оптика – 2013. – 37(3), 297-306.
- [3] Loussert, C. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media / C. Loussert and E. Brasselet. // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35, No. 1, p. 7-9.
- [4] Хонина, С.Н. Непараксиальное распространение гауссовых пучков под углом к оси анизотропного кристалла / С.Н. Хонина, О.В. Зотева, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика – 2012. – 36(3), 346-356.
- [5] Хонина, С.Н. Острая фокусировка лазерных пучков в анизотропных одноосных кристаллах / С.Н. Хонина, О.В. Зотева, С.И. Харитонов // Оптический журнал – 2015. – 82(4) 23-31.
- [6] Khonina, S.N. Comparative investigation of nonparaxial mode propagation along the axis of uniaxial crystal / S.N. Khonina, S.I. Kharitonov // J. Mod. Opt. – 2015. – Vol. 62, No. 2, p. 125-134.

- [7] Хило, Н.А. Преобразование порядка бesselевых пучков в одноосных кристаллах / Н.А. Хило, Е.С. Петрова, А.А. Рыжович. // Квантовая электроника – 2001. – т. 31, № 1, с. 85-89 (2001)
- [8] Ciattoni, A. Circularly polarized beams and vortex generation in uniaxial media / A. Ciattoni, G. Cincotti, C. Palma // J. Opt. Soc. Am. A – 2003. – V. 20, no. 1. P. 163-171.
- [9] Marrucci, L. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media / L. Marrucci, C. Manzo, D. Paparo // Phys. Rev. Lett – 2006. – V. 96. P. 163905-163908.
- [10] Picon, A. Spin and orbital angular momentum propagation in anisotropic media: theory/ A. Picon., A. Benseny, J. Mompert, G.F. Calvo // J. Opt – 2011. – V. 13. P. 064019 (7pp).
- [11] Khilo, N.A. Diffraction and order conversion of Bessel beams in uniaxial crystals / N.A. Khilo. // Opt. Commun. – 2012. – Vol. 285, No. 5, p. 503-509.
- [12] 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 and S.V. Karpeev. // Laser Phys. – 2014 – Vol. 24, No. 5, p. 056101 (5p).
- [13] 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. Parani // Journal of Modern Optics – 2016. – Vol. 63, No. 13, 1239-1247.
- [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. – 46: 3304-10.
- [15] Yonezawa, K. Compact laser with radial polarization using birefringent laser medium / K. Yonezawa, Y. Kozawa, S. Sato // Japanese Journal of Applied Physics – 2007. – 46: 5160-3.
- [16] Hacyan, S., Evolution of optical phase and polarization vortices in birefringent media / S. Hacyan and R. Jáuregui // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11, No. 8, p. 085204.
- [17] Fadeyeva, T. Natural shaping of the cylindrically polarized beams / T. Fadeyeva, V. Shvedov, N. Shostka, C. Alexeyev, A. Volyar. // Optics Letters – 2010. – 35(22): 3787-9.
- [18] Fadeyeva, T.A. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals / T.A. Fadeyeva, V.G. Shvedov, Y.V. Izdebskaya, A.V. Volyar, E. Brasselet, D.N. Neshev, A.S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar. // Optics Express – 2010. – 18(10): 10848-63.
- [19] Хонина, С.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование поляризационных преобразований в одноосных кристаллах для получения цилиндрических векторных пучков высоких порядков / С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, С.В. Алфёров // Компьютерная оптика – 2014. – 38(2), 171-180.
- [20] Khonina, S.N. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov and V.A. Soifer // Journal of Optics – 2015. – 17, 065001-11pp.
- [21] Ciattoni, A. Nondiffracting beams in uniaxial media propagating orthogonally to the optical axis / A. Ciattoni and C. Palma, // Opt. Commun. – 2003. – Vol. 224, No. 4, p. 175-183.
- [22] Liu, D. Various dark hollow beams propagating in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis/ D. Liu and Z. Zhou // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – Vol. 10, No. 9, p. 095005 (9pp).
- [23] Tang, B. Hermite-cosine-Gaussian beams propagating in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis / B. Tang // J. Opt. Soc. Am. A – 2009. – Vol. 26, No. 12, p. 2480-2487.
- [24] Zusin, D.H. Bessel beam transformation by anisotropic crystals / D.H. Zusin, R. Maksimenka, V.V. Filippov et al. // J. Opt. Soc. Am. A – 2010. – Vol. 27, No. 8, p. 1828-1833.
- [25] Zhao, C. Paraxial propagation of Lorentz and Lorentz-Gauss beams in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis / C. Zhao and Y. Cai // J. Mod. Opt – 2010. – Vol. 57, No. 5, p. 375-384.
- [26] Zhou, G., Propagation of Airy beams in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis / G. Zhou, R. Chen, and X. Chu // Opt. Express – 2012. – Vol. 20, No. 3, p. 2196-2205.
- [27] Khonina, S.N. Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal / S.N. Khonina, V.D. Parani, A.V. Ustinov, A.P. Krasnov // Optica Applicata – 2016. – Vol. XLVI, No. 1, p. 5-18.
- [28] Bin, Z. Diffraction property of an axicon in oblique illumination / Z. Bin and L. Zhu // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37, No. 13, p. 2563-2568.
- [29] Khonina, S.N. Astigmatic Bessel laser beams / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer et al. // J. Mod. Opt. – 2004. – Vol. 51, No. 5, p. 677-686 (2004).
- [30] Bendersky, A. Modification of the structure of Bessel beams under oblique incidence / A. Bendersky, F. Perez Quintian, and M.A. Rebollo // J. Mod. Opt. – 2008. – Vol. 55, No. 15, p. 2449-2456.
- [31] Anguiano-Morales, M., Transformation of Bessel beams by means of a cylindrical lens / M. Anguiano-Morales // Appl. Opt. – 2009. – Vol. 48, No. 25, p. 4826-4831.
- [32] Хонина, С.Н. Аналог интеграла Рэлея–Зоммерфельда для анизотропной и гиротропной сред / С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика – 2012. – 36(2), 172-182.
- [33] Khonina, S.N. An analog of the Rayleigh–Sommerfeld integral for anisotropic and gyrotropic media / S.N. Khonina, S.I. Kharitonov, / Journal of Modern Optics – 2012. 60(10), 814-822.
- [34] Turunen, J. Holographic generation of diffraction-free beams / J. Turunen, A. Vasara, and A. T. Friberg // J. Appl. Opt – 1988. – 27(19), 3959-3962.
- [35] Khonina, S.N. Bessel-mode formers / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar // Proceedings of SPIE – 1994. – v. 2363, 184-190.
- [36] Kotlyar, V.V. Algorithm for the generation of non-diffracting Bessel modes / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics – 1995. – 42(6), 1231-1239.
- [37] Chattrapiban, N. Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator / N. Chattrapiban, E.A. Rogers, D. Cofield, W.T. Hill III, R. Roy // Opt. Lett – 2003 – 28(22), 2183- 2185.