

УДК 535.012.21

**СТРУКТУРНОЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛАХ**© С. Н. Хонина¹, С. В. Карпеев¹, В. В. Подлипов¹, В. Д. Паранин²,
А. П. Порфирьев¹, Н. Л. Казанский¹¹ *Филиал Института систем обработки изображений РАН ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,**443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151*² *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва,**443086, г. Самара, Московское шоссе, 34**E-mail: khonina@ipsiras.ru*

Представлен краткий обзор работ, посвящённых теоретическим и экспериментальным исследованиям структурных и поляризационных преобразований лазерных пучков в анизотропных кристаллах, определены возможности создания лазерных пучков со сложным поляризационно-фазовым состоянием. Показано, что адаптивная подстройка структурных и поляризационно-фазовых состояний может осуществляться относительно медленными изменениями параметров оптической системы и быстрыми электрооптическими методами модуляции с высоким быстродействием.

Ключевые слова: анизотропный кристалл, вихревые лазерные пучки, преобразование поляризации.

DOI: 10.15372/AUT20200208

Введение. Оптические кристаллы обладают рядом интересных свойств, таких как оптическая дисперсия, дихроизм, двойное лучепреломление и поляризационное преобразование падающего излучения [1]. Эти свойства используются в задачах, связанных с необходимостью структурных и поляризационных преобразований лазерных пучков, эффективность которых значительно выше, чем при применении известных методов дифракционной оптики. Теоретические и экспериментальные исследования [2–4] показали, что в одноосных кристаллах происходит периодическое преобразование непараксиально распространяющегося вдоль оптической оси пучка Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок Бесселя второго порядка. Немаловажным является исследование преобразования исходного поляризационного состояния лазерных пучков, прошедших через электрооптические кристаллы [5–7]. При этом получаются как радиальная и азимутальная, так и смешанные «спиральные» типы поляризаций. Важное свойство цилиндрических векторных пучков высших порядков — обеспечение острой фокусировки [8, 9].

Двойное лучепреломление может быть естественным или наведённым с помощью эффекта Погкельса или Керра [10, 11], что делает возможным активное управление поляризационными и структурными изменениями лазерных пучков. В качестве кристалла для электрооптического преобразования может использоваться исследованный кристалл DKDP (дейтерированный дигидрофосфат калия) [12]. Моделирование управления поляризацией и орбитальным угловым моментом лазерных пучков Гаусса и Лагерра — Гаусса на основе электрооптического кристалла проводилось в работах [13–15].

Использование каскадов таких кристаллов может привести к ещё более сложным поляризационным преобразованиям [16]. В этой работе были исследованы трансформации векторных пучков с радиальной и азимутальной поляризациями в двуосных кристаллах.

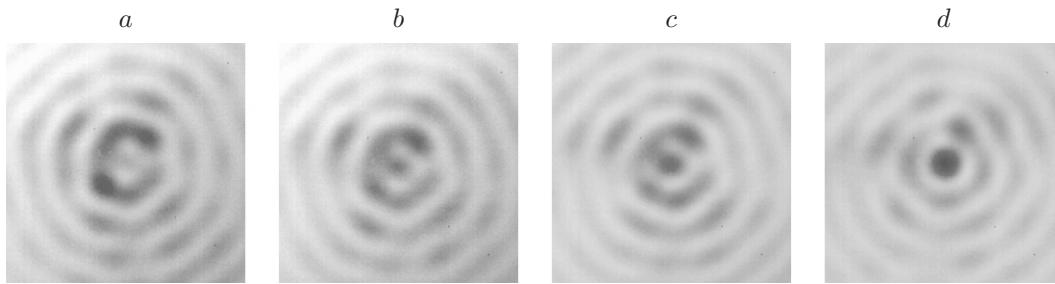


Рис. 1. Выходные пучки при различных длинах волн излучения: a — 637,52, b — 637,25, c — 637,05, d — 636,02 нм

В [17] проведены моделирование и эксперименты по распространению нецилиндрически-симметричных пучков света через двусный кристалл вдоль одной из осей. В [18] приведено исследование внеосевого отражения и пропускания пучка Бесселя через анизотропную среду. В [19] на примере пучков Лагерра — Гаусса проведено исследование их распространения разложением на спектр Лагерра — Гаусса, затем моделирование распространения для каждой компоненты в отдельности, а на выходе формирование суперпозиции всех компонент, которая является итоговым выходным полем.

Таким образом, приведённый обзор показывает ряд приложений, где могут быть использованы анизотропные оптические элементы, что определяет значимость проводимых исследований и их актуальность.

Цель данной работы — численно и экспериментально исследовать поляризационное и структурное преобразования однородно поляризованных вихревых лазерных пучков при фокусировке вдоль оси анизотропного кристалла. Использование электрооптического эффекта позволяет создавать быстродействующие динамические оптические элементы на основе анизотропных кристаллов в отличие от более медленных методов температурного, хроматического и оптико-механического управления лазерными пучками Бесселя [20–22].

Структурные преобразования лазерных пучков Бесселя. Преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок второго порядка выполнялось с использованием двулучепреломляющего кристалла [20–22]. Для формирования пучка Бесселя нулевого порядка был изготовлен амплитудный дифракционный аксикон диаметром 40 мм с периодом колец 2 мкм. На рис. 1 приведены изображения распределений интенсивности лазерных пучков, полученные на выходе кристалла при различных длинах волн излучения.

Из результатов измерений следует, что вариации длины волны приводят к изменению распределений интенсивности выходного пучка. Получено практически полное преобразование пучков при изменении длины волны $\Delta\lambda = 1,5$ нм при начальной длине волны $\lambda = 637,52$ нм для кристалла CaCO_3 длиной 15 мм. Указанное значение согласуется с расчётным $\Delta\lambda = 1,7$ нм. Изменение порядка пучка Бесселя сопровождается формированием вихревого фазового фронта.

Поляризационные преобразования лазерных пучков. С использованием анизотропных кристаллов возможно преобразование лазерных пучков с круговой поляризацией в цилиндрические векторные пучки [13–15]. Для исследования состояния поляризации вихревых пучков, сфокусированных в одноосном кристалле, была собрана оптическая установка (рис. 2).

Четвертьволновая пластинка ВП служит для преобразования поляризации из линейной в круговую. Фокусировка в кристалл CaCO_3 обеспечивалась линзой Л2 с фокусным расстоянием 25 мм. Изображения, полученные в кристалле, проецировались объек-

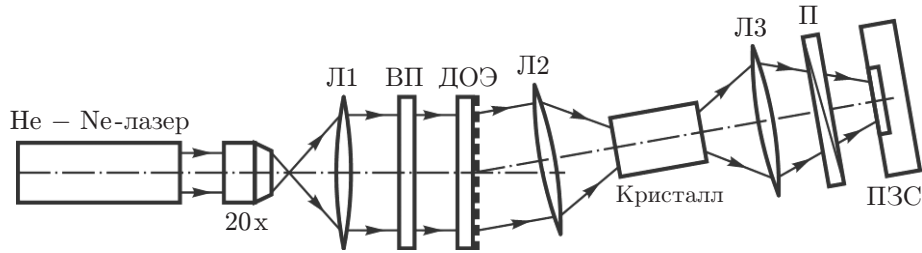


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

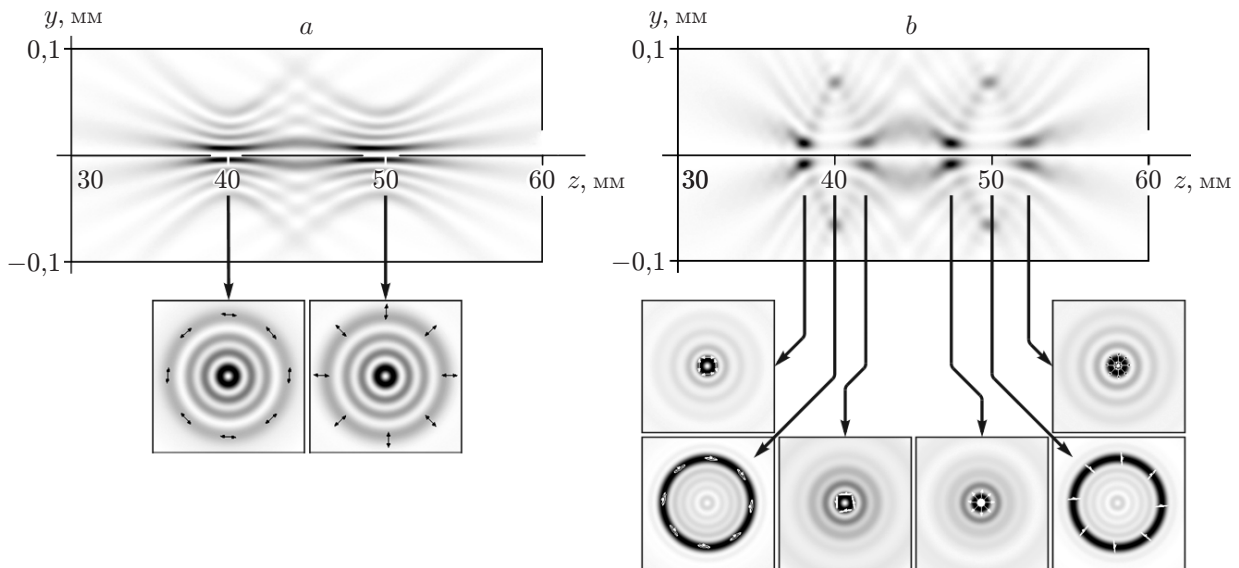


Рис. 3. Результаты сравнительного моделирования фокусировки пучков Лагерра — Гаусса и Бесселя вдоль оси анизотропного кристалла — распределений интенсивности поля для продольного и поперечных сечений: *a* — пучка Лагерра — Гаусса (3,1); *b* — пучка Бесселя первого порядка

тивом ЛЗ в плоскость ПЗС-матрицы. Для контроля поляризации использовался поляризатор (П).

Для формирования структурированных вихревых пучков были рассчитаны и изготовлены амплитудные ДОЭ, формирующие вихревые пучки первого порядка с амплитудой, соответствующей функции Лагерра — Гаусса и усечённой функции Бесселя. При перемещении линзы Л2 или Л3 обнаруживаются два положения, при которых наблюдается наибольшая концентрация энергии в центральной части сформированного пучка (фокальная картина). Результаты сравнительного моделирования для исследуемых пучков приведены на рис. 3.

Как видно из приведённых на рис. 3 распределений интенсивности, фокусировка пучков Лагерра — Гаусса существенно отличается от фокусировки пучков Бесселя, что также отмечалось в [7]. Моды Лагерра — Гаусса сохраняют своё поперечное распределение как при распространении в свободном пространстве, так и в фокусе линзы. Пучок же Бесселя в фокусе имеет форму кольца. Действие анизотропного кристалла в данном случае сказывается только на изменении поляризационного состояния пучка, причём в одной плоскости формируется азимутальная, а в другой — радиальная поляризации.

Управляемое электрооптическое преобразование пучков Бесселя в одном анизотропном кристалле DKDP. В [23, 24] были разработаны теоретические

Таблица

Распределение поперечной интенсивности пучка Бесселя на выходе из кристалла DKDP для различного приложенного напряжения

| Уровень напряжения, кВ | $\lambda = 520$ нм | | | $\lambda = 532$ нм | | |
|------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Полная интенсивность | Интенсивность x -компоненты | Интенсивность y -компоненты | Полная интенсивность | Интенсивность x -компоненты | Интенсивность y -компоненты |
| 0 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |

основы, представляющие периодическое преобразование не только лазерных пучков Бесселя, но и гауссовых мод при распространении вдоль оптической оси кристалла в непараксиальном режиме. Физические основы этого явления обсуждались в работах [24–27]. Моделирование проводилось на базе модели из [28].

В экспериментальном исследовании применялась схема, аналогичная представленной на рис. 2, с небольшими изменениями: в качестве источника излучения был использован лазер с перестраиваемой длиной волны EKSP LA NT200.

Пучок Бесселя нулевого порядка формировался дифракционным амплитудным аксиконом с периодом $d = 3$ мкм, изготовленным с помощью установки круговой лазерной записи CLWS-200 [29]. Пучок Бесселя направлялся вдоль оси кристалла DKDP. Для распознавания x - и y -компонент преобразованных пучков перед цифровой камерой дополнительно устанавливался вращающийся анализатор. Для проведения эксперимента динамического преобразования пучков Бесселя в кристалле DKDP к его контактам, выполненным в

виде кольцевых опоясывающих полосок, прикладывалось напряжение, формирующее наведённую анизотропию. Экспериментальные результаты электрооптического преобразования пучков Бесселя показаны в таблице. Анализируя изображения распределений интенсивности пучков Бесселя на длине волны 520 нм на выходе кристалла DKDP при приложении внешнего поля, можно видеть преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в более сложное распределение. При длине волны 532 нм на выходе кристалла даже при отсутствии напряжения происходит преобразование исходного пучка Бесселя нулевого порядка в пучок Бесселя второго порядка [20]. Под действием продольного электрического поля при увеличении напряжения изначально равные по интенсивности и по структуре x - и y -компоненты претерпевают изменения: интенсивность x -компоненты сначала слабеет, затем вновь появляется, в основном сохраняя свою структуру, а интенсивность y -компоненты, не меняя яркости, преобразуется в кольцевое распределение при напряжении 8 кВ.

Экспериментальные исследования выявили определённые отличия электрооптических преобразований пучков Бесселя от результатов моделирования [11, 30], которые подчеркивают наличие более сложных дополнительных эффектов, происходящих в кристаллах.

Заключение. Таким образом, в данной работе рассмотрены основные принципы структурных и поляризационных преобразований лазерных пучков. Эти преобразования осуществляются с минимальными потерями энергии в оптических системах, включающих дифракционные оптические элементы и анизотропные кристаллы. На примере пучков Гаусса, Лагерра — Гаусса и Бесселя показаны их структурные и поляризационные изменения. Численно и экспериментально представлены результаты сравнительного моделирования фокусировки пучков Лагерра — Гаусса и Бесселя вдоль оси анизотропного кристалла: распределения интенсивности поля для продольного и поперечных сечений. На примере кристалла DKDP рассмотрено управляемое электрооптическое преобразование пучков Бесселя. При приложении продольного электрического поля происходят сложные структурные изменения пучка Бесселя, распространяющегося вдоль оси кристалла, изменение поляризационно-фазового состояния, которое выражается в изменении интенсивности компонент поля. Данные изменения могут быть использованы в задачах атмосферной передачи информации на расстоянии.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в части исследования структурных и поляризационных преобразований (гранты № 18-29-20045 мк, № 18-07-01470 А) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части изготовления ДОО и оптической системы (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров Ф. И. Оптика анизотропных сред. М.: Едиториал УРСС, 2004. 380 с.
2. Хило Н. А., Петрова Е. С., Рыжевич А. А. Преобразование порядка бесселевых пучков в одноосных кристаллах // Квантовая электроника. 2001. **31**, № 1. С. 85–89.
3. Хонина С. Н., Харитонов С. И. Аналог интеграла Рэлея — Зоммерфельда для анизотропной и гиротропной сред // Компьютерная оптика. 2012. **36**, № 2. С. 172–182.
4. Khonina S. N., Kharitonov S. I. An analog of the Rayleigh — Sommerfeld integral for anisotropic and gyrotropic media // Journ. Mod. Opt. 2013. **60**, Iss. 10. P. 814–822. DOI: 10.1080/09500340.2013.814816.
5. Loussert C., Brasselet E. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media // Opt. Lett. 2010. **35**, N 1. P. 7–9.

6. **Хони́на С. Н., Волотовский С. Г., Харитонов С. И.** Особенности непараксиального распространения гауссовых и бесселевых мод вдоль оси кристалла // Компьютерная оптика. 2013. **37**, № 3. С. 297–306. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-3-297-306.
7. **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. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-598-605.
8. **Kozawa Y., Sato S.** Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams // JOSA A. 2007. **24**, N 6. P. 1793–1798.
9. **Khonina S. N., Alferov S. V., Karpeev S. V.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams // Opt. Lett. 2013. **38**, N 17. P. 3223–3226. DOI: 10.1364/OL.38.003223.
10. **Skab I., Vasyukiv Y., Smaga I., Vlokh R.** Spin-to-orbital momentum conversion via electro-optic Pockels effect in crystals // Phys. Rev. A. 2011. **84**, N 4. 043815.
11. **Хони́на С. Н., Паранин В. Д.** Электрооптическая корректировка преобразования пучков Бесселя вдоль оси кристалла ниобата бария-стронция // Компьютерная оптика. 2016. **40**, № 4. С. 475–481. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-475-481.
12. **Vasilev V. S., Podlipnov V. V.** Experimental observing of transformation Bessel beam spreading along axis of crystal during wavelength changes // CEUR Work. Proc. 2017. **1900**. P. 55–59.
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. **Хони́на С. Н., Карпеев С. В., Алфёров С. В.** Теоретическое и экспериментальное исследование поляризационных преобразований в одноосных кристаллах для получения цилиндрических векторных пучков высоких порядков // Компьютерная оптика. 2014. **38**, № 2. С. 171–180. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-171-180.
15. **Khonina S. N., Karpeev S. V., Paraniin V. D., Morozov A. A.** Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals // Phys. Lett. A. 2017. **381**, Iss. 30. P. 2444–2455. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.025.
16. **Turpin A., Vargas A., Lizana A. et al.** Transformation of vector beams with radial and azimuthal polarizations in biaxial crystals // JOSA A. 2015. **32**, N 5. P. 1012–1016.
17. **Turpin A., Loiko Y. V., Kalkandjiev T. K., Mompert J.** Light propagation in biaxial crystals // Journ. Opt. 2015. **17**, N 6. 065603.
18. **Li H., Liu J., Bai L., Wu Z.** Deformations of circularly polarized Bessel vortex beam reflected and transmitted by a uniaxial anisotropic slab // Appl. Opt. 2018. **57**, N 25. P. 7353–7362.
19. **Tang F., Lu X., Chen L.** The transmission of structured light fields in uniaxial crystals employing the Laguerre-Gaussian mode spectrum // Opt. Express. 2019. **27**, N 20. P. 28204–28213.
20. **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**, Iss. 5. 056101. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
21. **Паранин В. Д., Карпеев С. В.** Метод измерения толщины срезов одноосных анизотропных кристаллов и термическое управление преобразованием пучка Бесселя // Компьютерная оптика. 2016. **40**, № 1. С. 36–44. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-36-44.
22. **Paraniin V. D., Karpeev S. V., Khonina S. N.** Control of the formation of vortex Bessel beams in uniaxial crystals by varying the beam divergence // Quant. Electron. 2016. **46**, N 2. P. 163–168. DOI: 10.1070/QEL15880.
23. **Belyi V. N., Khilo N. A., Kazak N. S. et al.** Propagation of high-order circularly-polarized Bessel beams and vortex generation in uniaxial crystals // Opt. Eng. 2011. **50**, Iss. 5. 059001.

24. **Khonina S. N., Kharitonov S. I.** Comparative investigation of nonparaxial mode propagation along the axis of uniaxial crystal // Journ. Mod. Opt. 2015. **62**, N 2. P. 125–134. DOI: 10.1080/09500340.2014.959085.
25. **Khonina S. N., Karpeev S. V., Morozov A. A., Paraniin V. D.** Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements // Journ. Mod. Opt. 2016. **63**, N 13. P. 1239–1247. DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
26. **Khonina S. N., Podlipnov V. V., Volotovskii S. G.** Study of the electro-optical transformation of linearly polarized Bessel beams propagating along the optic axis of an anisotropic DKDP crystal // Journ. Opt. Technol. 2018. **85**, N 7. P. 388–395. DOI: 10.1364/JOT.85.000388.
27. **Карпеев С. В., Подлипов В. В., Хонина С. Н. и др.** Четырёхсекторный преобразователь поляризации, интегрированный в кристалл кальцита // Компьютерная оптика. 2018. **42**, № 3. С. 401–407. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407.
28. **Паранин В. Д., Карпеев С. В., Бабаев О. Г.** Экспериментальное исследование двулучепреломления параболической градиентной линзы на основе астигматического преобразования пучка Бесселя // Компьютерная оптика. 2017. **41**, № 6. С. 837–841. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-837-841.
29. **Полещук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: анализ погрешностей изготовления и их измерение // Автометрия. 1997. № 6. С. 42–56.
30. **Паранин В. Д., Хонина С. Н., Карпеев С. В.** Управление оптическими свойствами кристалла CaCO_3 в задачах формирования вихревых пучков Бесселя путём нагрева // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 81–87. DOI: 10.15372/AUT20160210.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 05.12.2019

Принята к публикации 17.12.2019
