

Экспериментальное наблюдение преобразования бесселевого пучка, распространяющегося вдоль оси кристалла, при изменении длины волны лазерного излучения

В.С. Васильев^а, В.В. Подлипнов^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 описывается экспериментальное наблюдение преобразование пучка Бесселя, формируемого дифракционным аксиконом, при прохождении через анизотропный двулучепреломляющий кристалл. Данное наблюдение охватывает широкий диапазон изменения длины волны (от 520 нм до 534 нм). Приведено теоретическое обоснование данного эффекта.

Ключевые слова: перестраиваемый лазер; дифракционный аксикон; двулучепреломляющий кристалл; пучки Бесселя

1. Введение

В оптике хорошо известно использование анизотропных элементов для преобразования пучков с однородной поляризацией в цилиндрические векторные пучки [1-6]. При этом необходимо реализовать продольное разделение мод вдоль оптической оси системы, которая параллельна оси кристалла. Для создания большей сходимости пучков в кристалле можно использовать телескопическую систему или формировать пучки с высокой числовой апертурой. Поляризационные и модовые преобразования при распространении вдоль оси кристалла рассматривались как для бесселевых, так и для гауссовых пучков [7-16].

В работах [17, 18] было показано, что при распространении вдоль оси кристалла непараксиальные пучки Бесселя обладают иными, чем гауссовы пучки, свойствами, а именно, испытывают равномерное периодическое изменение интенсивности. В этом случае пучок Бесселя нулевого и второго порядка периодически преобразуются один в другой [7-9, 17, 18]. Период осцилляций прямо пропорционален длине волны лазерного излучения и обратно пропорционален квадрату пространственной частоты лазерного пучка и разности диэлектрических проницаемостей, соответствующих обыкновенному и необыкновенному лучам. Такая зависимость позволяет управлять происходящим в кристалле преобразованием за счет изменения либо характеристик пучка Бесселя, либо кристалла. В частности, пространственная частота пучка зависит от числовой апертуры формирующего пучок аксикона [19-22], причем подстроить характеристики пучка можно и за счет изменения расходимости пучка [23]. Изменить параметры кристалла можно нагревом [24] или электрооптическим воздействием [25]. Однако наиболее удобным способом подстройки является изменение длины волны лазерного излучения, от которой период преобразования имеет прямую линейную зависимость [26].

В работе [26] была экспериментально продемонстрирована возможность управления преобразованием пучка Бесселя на выходе кристалла CaCO_3 за счет изменения длины волны излучения, освещающего дифракционный аксикон. Было достигнуто почти полное преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в пучок второго порядка при использовании аксикона с периодом 2 μm и изменением длины волны на $\Delta\lambda = 1.5 \text{ nm}$ от начального значения $\lambda = 637.5 \text{ nm}$. Изменение длины волны в небольших пределах достигалось изменением температуры лазера KLM-A635. В отличие от этого способа использование лазера с изменяемой длиной волны обеспечивает широкий диапазон $\Delta\lambda$, а следовательно, возможность достижения полного преобразования при использовании аксикона с большим периодом, т.е. меньшей числовой апертурой. Заметим, что применение аксиконов с высокой числовой апертурой ограничено не только технологическими возможностями изготовления [27], сокращением отрезка бездифракционного распространения [20], но и предельной числовой апертурой [28], при которой в рассматриваемой оптической среде имеют место распространяющиеся волны.

В данной работе показаны результаты экспериментального наблюдения модового преобразования пучка Бесселя, сформированного амплитудным аксиконом с периодом 3 μm , на выходе кристалла дейтерированного дигидрофосфата В калия (DKDP) при изменении длины волны излучения лазера EKSPLA NT 200.

2. Теоретический анализ

Рассмотрим анизотропный кристалл, ось которого ориентирована вдоль оптической оси.

Распределение интенсивности $I(x, y, z)$ при распространении пучка Бесселя вдоль оси кристалла имеет следующий вид [9, 11, 17, 18]:

$$I(x, y, z) \approx \frac{1}{2} \left[|C(z)|_2 J_0^2 \left(k \alpha \sqrt{x^2 + y^2} \right) + |S(z)|^2 J_2^2 \left(k \alpha \sqrt{x^2 + y^2} \right) \right] \quad (1)$$

где $J_0(\cdot)$ и $J_2(\cdot)$ - функции Бесселя нулевого и второго порядка, соответственно,

$$C(z) = \exp(ikz\gamma_o) + \exp(ikz\gamma_e),$$

$$S(z) = \exp(ikz\gamma_o) - \exp(ikz\gamma_e), \quad (2)$$

где α – числовая апертура пучка, z – пройденное расстояние; γ_o, γ_e – величины, определяющие направление распространения обыкновенного и необыкновенного лучей:

$$\begin{aligned} \gamma_o &= \sqrt{n_o^2 - \alpha^2}, \\ \gamma_e &= \sqrt{n_o^2 - \alpha^2 n_{oe}^2 / n_e^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где n_o, n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла.

Полное преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в пучок второго порядка будет периодически происходить на расстояниях, кратных величине:

$$z_p = \frac{\lambda}{\gamma_o - \gamma_e} \approx \frac{2\lambda n_o^2}{\alpha^2 (n_o^2 - n_e^2)}. \quad (4)$$

Как следует из (4), период полного преобразования зависит от показателей преломления кристалла и числовой апертуры аксикона, а также длины волны излучения. Причем зависимость от длины волны является прямой и линейной, т.е. наиболее удобной для динамического изменения (подстройки) величины периода так, чтобы на выходе кристалла формировалась желаемая картина.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Методика эксперимента

В данной работе проводились эксперименты с помощью оптической схемы, представленной на рис. 1, где 1 – лазер с перестраиваемой длиной волны EKSP LA NT 200, 2 – диафрагма, 3 – коллиматор (система, состоящая из 2-х двояковыпуклых линз), 4 – диафрагма, 5 – ДОЭ, 6 – анизотропный кристалл, 7 – 20х микрообъектив, 8 – цифровая USB – камера TOUPCAM UCMOS05100KPA.

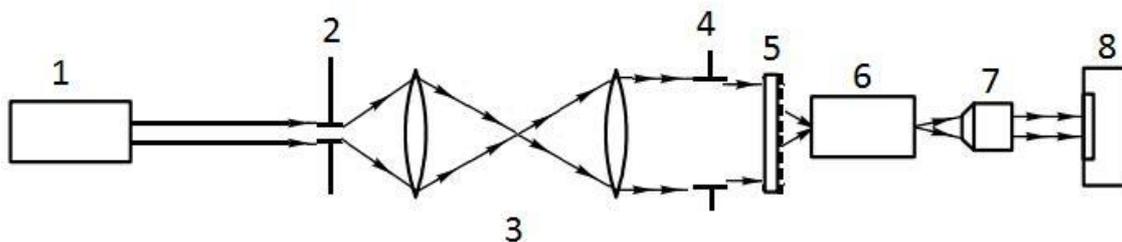
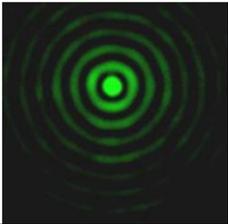
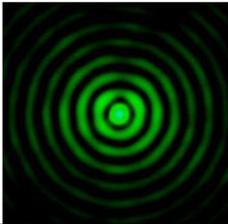
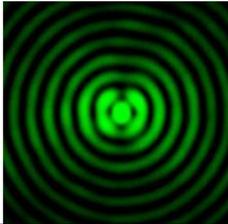
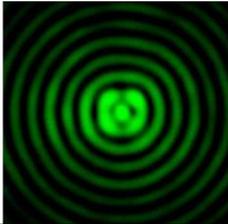
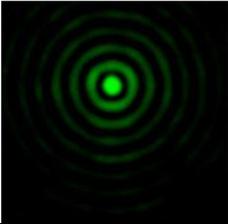
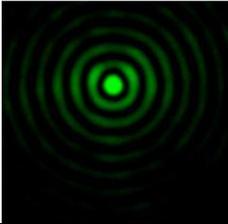
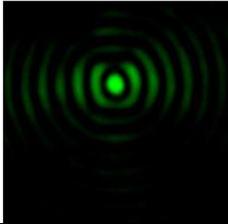
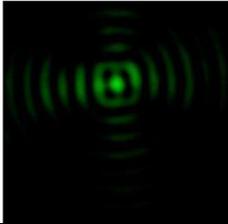
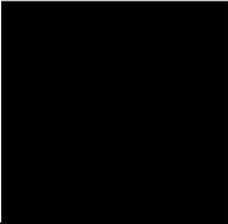
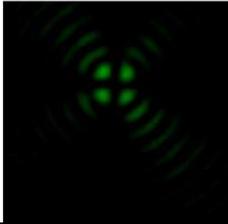
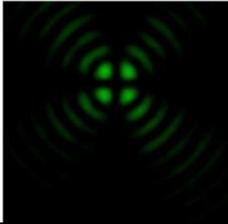
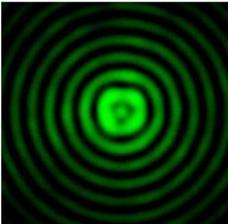
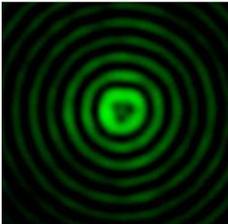
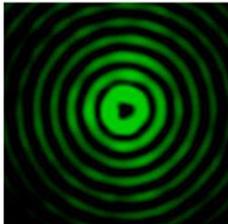
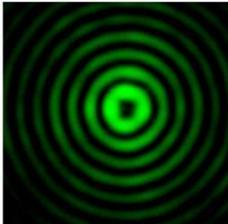
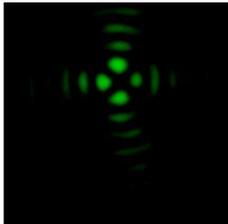
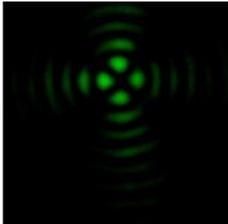
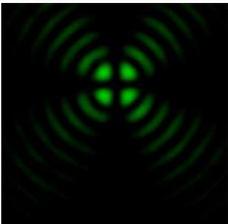
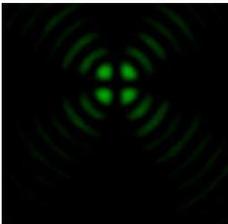
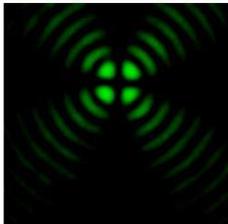
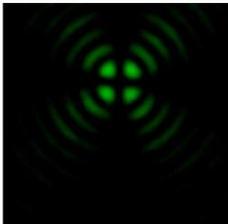


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки.

В качестве источника излучения был использован лазер с перенастраиваемой длиной волны EKSP LA NT 200. В рассматриваемом диапазоне изменения длины волны (520 – 534 нм) лазерный пучок имеет горизонтальную Х-поляризацию. Энергия лазерного излучения, полученная в диапазоне видимого спектра длин волн, изменяется в пределах от 610 мкДж (450 нм) до 45 мкДж (700 нм). Расширение пучка производилось при помощи коллиматора (системы, состоящей из пары двояковыпуклых линз различного диаметра). По причине того, что пучок выходящий из лазера имеет не гауссовское распределение интенсивности возникла необходимость выделить часть пучка, в которой наблюдается малое изменение интенсивности. Данная задача решается путём введения диафрагмы 2. Диафрагма 4 позволяет ограничить числовую апертуру и обеспечить условие формирования распространяющихся волн. Распределение интенсивности выходного пучка регистрировалось при помощи цифровой USB – камеры TOUPCAM UCMOS05100KPA с разрешением 5 МПкс и разрядностью АЦП 12 бит.

Пучок Бесселя нулевого порядка формировался с использованием дифракционного амплитудного аксикона с периодом $d = 3\text{ мкм}$, который работает приблизительно одинаково эффективно в рассматриваемом в данной работе диапазоне длин волн. Пучок Бесселя направлялся вдоль оси кристалла DKDP с поперечным размером 10x10 мм и длиной 20 мм. В результате преобразования пучков Бесселя для различных длин волн формировались интерференционные картины распределения интенсивности и регистрировались с помощью микрообъектива и цифровой камеры (таблица. 1). Для выделения различных X и Y компонент преобразованных пучков перед цифровой камерой дополнительно устанавливался вращающийся анализатор.

Таблица 1. Распределение интенсивности света пучков Бесселя, преобразованных в двулучепреломляющем кристалле

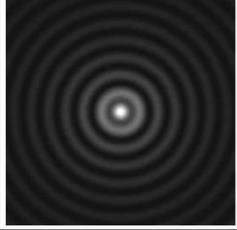
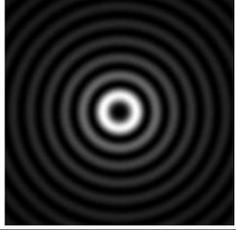
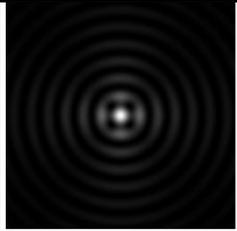
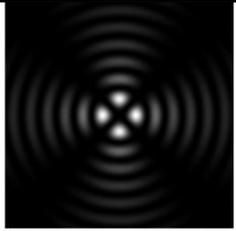
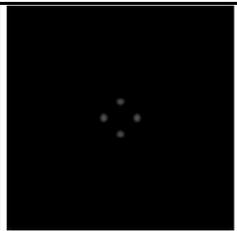
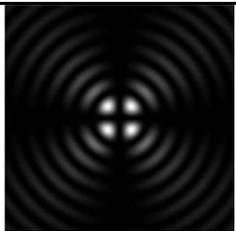
Длина волны лазера	520	522	524	526
Суммарная				
X компонента				
Y компонента				
Длина волны лазера	528	530	532	534
Суммарная				
X компонента				
Y компонента				

3.2. Результаты и их обсуждения

Как видно по изображениям, при изменении длины волны на $\Delta\lambda=14$ нм с 520 до 534 нм происходит полное преобразование пучка Бесселя из первого порядка во второй (образуется кольцо), вызванное действием двулучепреломляющего кристалла. Наблюдаемое явление объясняется формулой (4), где λ стоит в числителе. Изменение длины волны при этом, аналогично изменению длины распространения пучка, так как если бы изменялись размеры кристалла. Для проверки адекватности наблюдаемого явления описываемой модели преобразования

дополнительно был проведен численный расчет для длины волны 520 нм и 532 нм. Изображения распределений интенсивности пучков Бесселя преобразованных электрооптическим кристаллом для приведенных условий эксперимента, полученные с помощью численного расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Моделирование распределения интенсивности света пучков Бесселя, преобразованных в двулучепреломляющем кристалле

Длина волны лазера	520	532
Компонента		
Суммарная		
X компонента		
Y компонента		

По результатам моделирования можно заключить, что наблюдаемые экспериментальные результаты имеют хорошее сходство с математическим описанием для преобразования пучков Бесселя в рассматриваемом диапазоне длин волн.

4. Заключение

В работе экспериментально продемонстрировано преобразование пучков Бесселя нулевого порядка, сформированных аксионом с периодом $d=3\text{ мкм}$, в двулучепреломляющем кристалле DKDP в зависимости от изменения длины волны лазерного излучения в диапазоне $\lambda = 520\text{-}534\text{ нм}$ в пучки Бесселя второго порядка, имеющие кольцевое распределение интенсивности. Дальнейшее увеличение длины волны показало повторное преобразование в пучок Бесселя нулевого порядка, повторяющееся периодически. Анализ экспериментальных изображений полной интенсивности и их компонент с изображениями полученными численным моделированием показали хорошее соответствие.

Благодарности

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

Литература

- [1] 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(16). – P. 3304.
- [2] Yonezawa, K. Compact laser with radial polarization using birefringent laser medium/ K. Yonezawa, Y. Kozawa, S. Sato // *Journal of Applied Physics*. - 2007. – Vol 1(1). - P. 5160.
- [3] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications/ Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. - 2009. – Vol 1(1). - P. 57.
- [4] Fadeyeva, T. Natural shaping of the cylindrically polarized beams/ T. Fadeyeva, V. Shvedov, N. Shostka, C. Alexeyev, A. Volyar // *Optics Letters*. - 2010. – Vol. 235(22). – P. 3787.
- [5] 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. – Т.2, №38. – С. 171-180.
- [6] 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(1). – P. 11.
- [7] Khilo, N.A. Transformation of the order of Bessel beams in uniaxial crystals/ N.A. Khilo, A.A. Ryzhevich, E.S. Petrova // *Quantum Electronics*. - 2001. – Vol. 31(1). – P. 85-89.

- [8] Khilo, N.A. Diffraction and order conversion of Bessel beams in uniaxial crystals/ N.A. Khilo // Optics Communications. - 2012. - Vol. 285(1). - P. 503-509.
- [9] 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 Phys. - 2014. - Vol. 24(1). - P. 5.
- [10] Khonina, S.N. Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal/ S.N. Khonina, V.D. Pararin, A.V. Ustinov, A.P. Krasnov // Optica Applicata. - 2016. - Vol. 46(1). - P. 5-18.
- [11] 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. Pararin // Journal of Modern Optics. - 2016. - Vol. 63(13) - P. 1239-1247.
- [12] Ciattoni, A. Circularly polarized beams and vortex generation in uniaxial media/ A. Ciattoni, G. Cincotti, C. Palma // J. Opt. Soc. Am. A. - 2003. - Vol. 20(1). - P. 163-171.
- [13] Marrucci, L. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media/ L. Marrucci, C. Manzo, D. Paparo // Phys. Rev. Lett. - 2006. - Vol 96(1). - P. 130 - 135.
- [14] Loussert, C. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media/ C. Loussert, E. Brasselet // Optics Letters. - 2010. - Vol 35(1). - P. 7-9.
- [15] 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. - Vol. 18(10). - P. 63.
- [16] Picon, A. Spin and orbital angular momentum propagation in anisotropic media: theory/ A. Picon, A. Benseny, J. Mompert, G.F. Calvo // J. Opt. 13(1). - 2011. - P. 7.
- [17] Хонина, С.Н. Особенности непараксиального распространения гауссовых и бesselевых мод вдоль оси кристалла/ С.Г. Волотовский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. - 2013. - Т.3, №37. - С. 297-306.
- [18] 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.
- [19] McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // Journal of the Optical Society of America. - 1954. - Vol. 44. - P. 592-597.
- [20] Turunen, J. Holographic generation of diffraction-free beams/ J. Turunen, A. Vasara, and A. T. Friberg // J. Appl. Opt. - 1988. - Vol. 27(19). - P. 3959-3962.
- [21] Khonina, S.N. Bessel-mode formers/ S.N. Khonina, V.V. Kotlyar // Proceedings of SPIE. - 1994. - Vol.23(63). - P. 184-190.
- [22] Elizabeth, A. Rogers. Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator/ Narupon Chattrapiban, Elizabeth A. Rogers, David Cofield, Wendell T. Hill, III, Rajarshi Roy // Opt. Lett.. - 2003. - Vol. 28(22) - P. 2183-2185.
- [23] Хонина, С.Н. Управление формированием вихревых пучков Бесселя в одноосных кристаллах за счет изменения расходимости пучка/ В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Квантовая электроника. - 2016. - Т.46, № 2. - С. 163-168.
- [24] Хонина, С.Н. Управление оптическими свойствами кристалла CaCO₃ в задачах формирования вихревых пучков Бесселя путем нагрева/ В.Д. Паранин, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев // Автометрия. - 2016. - Т. 52, № 2. - С. 81-87.
- [25] Хонина, С.Н. Электрооптическая корректировка преобразования пучков Бесселя вдоль оси кристалла ниобата бария - стронция/ В.Д.Паранин, С.Н. Хонина // Компьютерная Оптика. - 2016. - Т. 40, № 4. - С. 475-481.
- [26] Khonina, S.N. Transformation of Bessel beams in c-cuts of uniaxial crystals by varying the emission source wavelength/ V.D. Pararin, S.V. Karpeev, S.N. Khonina // Russia: Journal of Russian Laser Research. - 2016. - Vol. 37(3). - P. 207-210.
- [27] Полещук, А.Г. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: анализ погрешностей изготовления и их измерение / А.Г. Полещук, В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Автометрия. - 1997. - № 6. - С. 42-56 [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]
- [28] Хонина, С.Н. 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.