

# Преобразование пучка Бесселя нулевого порядка в с-срезе кристалла ниобата лития

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

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** Исследовано частичное преобразование пучка Бесселя 0-го порядка в вихревой пучок Бесселя 2-го порядка. Для преобразования пучков использовался кристалл ниобата лития с-среза толщиной около 500 мкм. Показано, что для дифракционного аксикона с периодом 4 мкм, освещаемого гелий-неоновым лазером, выходной пучок представляет собой суперпозицию пучков Бесселя 0-го и 2-го порядков.

## 1. Введение

Распространение лазерных мод высокого порядка в среде с сильной анизотропией приводит к сложным поляризационно-модовым преобразованиям, связанным с наличием орбитального углового момента у таких пучков. Для линейно-поляризованного излучения происходит периодическое перераспределение энергии между двумя поперечными компонентами, а для пучка с круговой поляризацией энергия перекачивается из исходного пучка в вихревой пучок второго порядка и обратно. Наиболее заметно анизотропные эффекты проявляются для пучков Бесселя [1-3] в связи с особой структурой их пространственного спектра.

Теоретически было показано [3], что использование непараксиальных пучков Бесселя позволяет достичь эффективности преобразования близкой к 100% на малых (менее 1 см) длинах распространения вдоль оси одноосных кристаллов.

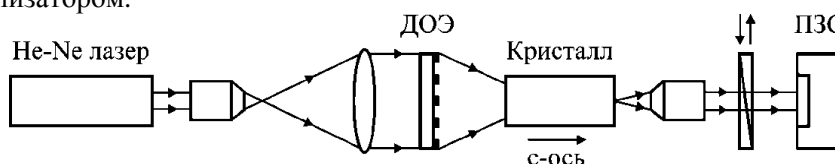
Преобразование непараксиального циркулярно- и линейно-поляризованного пучка Бесселя нулевого порядка в вихревой пучок второго порядка теоретически и экспериментально показано в работах [4-7]. Кроме статического преобразования [4-7] в работах [8-12] разработаны методы динамического преобразования пучков. Их достоинством является возможность заданного преобразования пучков, частичного или полного. Преобразование вихревых пучков Бесселя элементами кристаллической и интерференционной оптики также рассматривалось в работах [13-15].

В настоящей работе исследуется статическое преобразование пучка Бесселя 0-го порядка в тонком кристалле ниобата лития с-среза. Особое внимание уделяется оптимизации толщины кристалла с целью экономии дорогостоящего материала. Анализируется влияние элементов оптической схемы и интерференционных эффектов на качество выходного пучка.

## 2. Экспериментальное исследование

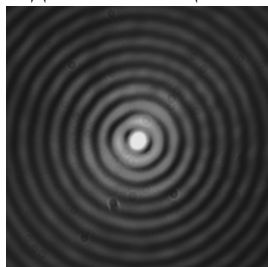
Для формирования пучков Бесселя нулевого порядка с различной числовой апертурой был изготовлен амплитудный аксокон диаметром 40 мм на стеклянной подложке с периодом колец 4 мкм. Структура аксокона включает хромовую маску толщиной 80-100 нм, сформированную на станции лазерной записи CLWS-200 методом термохимического окисления хрома с последующим химическим удалением немаскированных участков.

Для исследования поляризационного преобразования и взаимодействия обыкновенного и необыкновенного пучков была собрана оптическая схема, показанная на рис.1. Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ЛГН-207А с линейно-поляризованным излучением. Расширение лазерного пучка производилось объективом 10х и двояковыпуклой линзой диаметром 50 мм с фокусным расстоянием 500 мм. В качестве анизотропной среды использовался полированный одноосный кристалл конгруэнтного ниобата лития с размерами 12х12х0,5 мм. С-ось кристалла ориентировалась параллельно оптической оси схемы. Точное сведение обыкновенного и необыкновенного пучков обеспечивалось двумерной угловой оправой. Увеличение размеров выходного пучка обеспечивалось 20х объективом, установленным в трехкоординатную оправу. Распределение интенсивности выходного пучка фиксировалось черно-белой USB-видеокамерой DCM 310 с разрешением 3 МПкс и разрядностью АЦП 8 бит. Исследование поляризации выходного излучения осуществлялось пленочным анализатором.

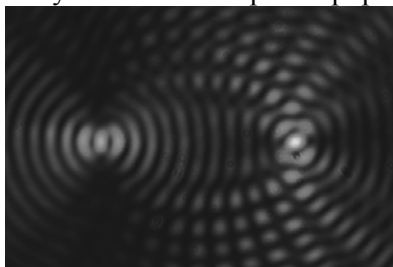


**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки.

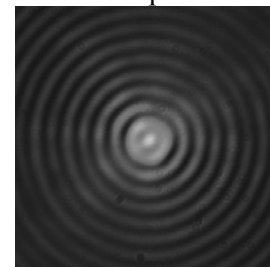
На рис.2 показан исходный пучок Бесселя 0-го порядка, формируемый дифракционным аксоконом с периодом 4 мкм. На рис.3 изображен процесс сведения выходных пучков. На рис.4 приведены совмещенные выходные пучки. Рис.2-4 зарегистрированы без анализатора.



**Рисунок 2.** Изображение исходного пучка Бесселя 0-го порядка.



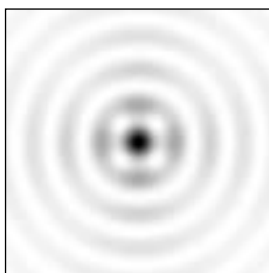
**Рисунок 3.** Изображение выходных пучков в процессе совмещения.



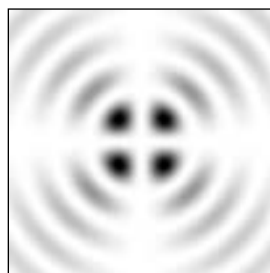
**Рисунок 4.** Изображение выходных пучков после совмещения.

Из полученных данных следует, что выходной пучок представляет собой суперпозицию пучков Бесселя 0-го и 2-го порядков. На рис.5-7 показаны расчетные распределения интенсивности выходного пучка для неполного преобразования пучков и различных ориентаций анализатора (качественно соответствуют табл.2 в работе [5]). На рис.8-10 приведены экспериментальные изображения при аналогичных положениях анализатора.

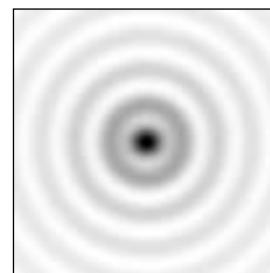
Таким образом, выполненные исследования подтверждают верность разработанной ранее математической модели. В настоящей работе также показана возможность осуществления преобразования пучков Бесселя 0-го и 2-го порядков с использованием тонких с-срезов одноосных кристаллов. Достигнуто значительное снижение толщины кристалла, не более 1 мм для полного преобразования вместо 15 мм в [5] и обеспечена экономия материала.



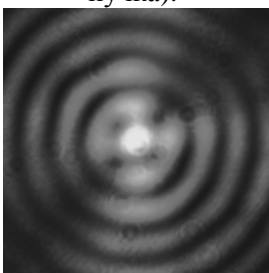
**Рисунок 5.** Распределение интенсивности (анализатор параллелен поляризации исходного пучка).



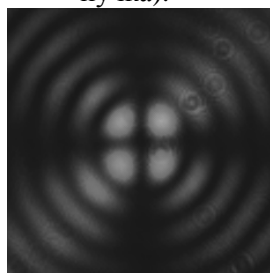
**Рисунок 6.** Распределение интенсивности (анализатор ортогонален поляризации исходного пучка).



**Рисунок 7.** Распределение интенсивности (анализатор отсутствует).



**Рисунок 8.** Распределение интенсивности (анализатор параллелен поляризации исходного пучка).



**Рисунок 9.** Распределение интенсивности (анализатор ортогонален поляризации исходного пучка).



**Рисунок 10.** Распределение интенсивности (анализатор отсутствует).

На приведенных изображениях отсутствуют значительные интерференционные искажения пучка, что сообщает о верно подобранных апертурах формирующей и приемной части стенда и достаточно точной угловой юстировке элементов.

### 3. Литература

- [1] Хило, Н.А. Преобразование порядка бесселевых пучков в одноосных кристаллах / Н.А. Хило, Е.С. Петрова, А.А. Рыжевич // Квантовая Электроника. – 2001. – Т. 31, № 1. – С. 85-89.
- [2] Хонина, С.Н. Периодическое изменение интенсивности модовых лазерных пучков при распространении в анизотропных одноосных кристаллах / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, С.И. Харитонов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 18-27.
- [3] 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. – Т. 37, № 3. – С. 297-306.
- [4] 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. – P. 056101-5.
- [5] Хонина, С.Н. Исследование поляризационного преобразования и взаимодействия обыкновенного и необыкновенного пучков в непараксиальном режиме / С.Н. Хонина, В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 598-605.
- [6] Loussert, C. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media / C. Loussert, E. Brasselet // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35(7). – P. 7-9.
- [7] Khilo, N.A. Diffraction and order conversion of Bessel beams in uniaxial crystals / N.A. Khilo // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285(5). – P. 503-509.

- [8] Паранин, В.Д. Управление формированием вихревых пучков Бесселя в с-срезах одноосных кристаллов за счет изменения расходимости пучка / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 2. – С.163-168.
- [9] Shiyao, F. Bessel beams with spatial oscillating polarization / F. Shiyao, Z. Shikun, G. Chunqing // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 30765.
- [10] Parani, V.D. Methods of dynamic transformation of vortex Bessel beams in c-cuts of uniaxial crystals / V.D. Parani, S.V. Karpeev, S.N. Khonina // Journal of Russian Laser Research. – 2016. – Vol. 37(3). – P. 207-210.
- [11] Gaofeng, W. Generation and self-healing of a radially polarized Bessel-Gauss beam / W. Gaofeng, W. Fei, C. Yangjian // Physical Review A. – 2014. – Vol. 89. – P. 043807.
- [12] 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.
- [13] Khonina, S.N. Polarization Conversion under Focusing of Vortex Laser Beams along the Axis of Anisotropic Crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Parani, A.A. Morozov // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. – 2017. – Vol. 381(30). – P. 2444-2455.
- [14] Карпеев, С.В. Формирование неоднородно поляризованных пучков Бесселя на основе интерференционного поляризатора / С.В. Карпеев, В.Д. Паранин, С.Н. Хонина // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48, № 6. – С. 521-526.
- [15] Karpeev, S.V. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S.V Karpeev, V.D. Parani, S.N. Khonina // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19(5). – P. 055701.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-20045/18-мк, 16-29-11698-офи\_м).

## Transformation of a zero-order Bessel beam in a c-cut lithium niobate

S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>, V.D. Parani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** The partial transformation of the 0th order Bessel beam into the 2nd order Bessel vortex beam is investigated. A c-cut lithium niobate crystal with a thickness of about 500  $\mu\text{m}$  was used to convert the beams. It is shown that for a diffractive axicon with a period of 4  $\mu\text{m}$  illuminated by helium-neon laser, the output beam is a superposition of Bessel beams of the 0th and 2nd orders.