

УДК 535.8

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ В РАСТВОРАХ КРАСИТЕЛЕЙ И ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ

С. А. НАЗАРОВ<sup>1)</sup>, Д. В. ГОРБАЧ<sup>1)</sup>, А. Л. ТОЛСТИК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты экспериментальных исследований по преобразованию бesselевых световых пучков непрерывного лазерного излучения, а также импульсов нано- и пикосекундной длительности при их распространении в управляемой внешним напряжением жидкокристаллической ячейке и растворе красителя «Родамин 6Ж». Проанализировано изменение поляризационной, фазовой и пространственной структуры бesselевых световых пучков. Показано, что при распространении импульсного лазерного излучения в растворе красителя наблюдается эффект самодифракции, проявляющейся в появлении дополнительного кольцеобразного распределения интенсивности в дальней зоне бesselева светового пучка. При распространении линейно-поляризованного бesselева светового пучка нулевого порядка в жидкокристаллической ячейке реализовано электрически переключаемое преобразование его в пучок с ортогональной поляризацией, а также азимутально-модулированным распределением интенсивности, характерным для пучков второго порядка.

**Ключевые слова:** бesselевы световые пучки; оптические вихри; самодифракция; жидкие кристаллы.

---

### Образец цитирования:

Назаров С. А., Горбач Д. В., Толстик А. Л. Преобразование бesselевых световых пучков при их распространении в растворах красителей и жидкокристаллических средах // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 4–8.

### For citation:

Nazarov S. A., Gorbach D. V., Tolstik A. L. Transformation of the Bessel light beams during its propagation in dyes solutions and liquid crystal media. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 4–8 (in Russ.).

---

### Авторы:

**Сергей Александрович Назаров** – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – А. Л. Толстик.

**Дмитрий Владиславович Горбач** – старший преподаватель кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

**Алексей Леонидович Толстик** – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

### Authors:

**Sergey A. Nazarov**, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

*sanazarov@tut.by*

**Dmitriy V. Gorbach**, senior lecturer at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

*gorbachdv@yandex.by*

**Aleksey L. Tolstik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

*tolstik@bsu.by*

## TRANSFORMATION OF THE BESSEL LIGHT BEAMS DURING IT'S PROPAGATION IN DYES SOLUTIONS AND LIQUID CRYSTAL MEDIA

S. A. NAZAROV<sup>a</sup>, D. V. GORBACH<sup>a</sup>, A. L. TOLSTIK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: S. A. Nazarov (sanazarov@tut.by)

In this work the results of the experimental investigations of the transformation of continuous, nano- and picosecond pulse duration Bessel light beams during its propagation in controlled by external voltage liquid crystall cell and «Rhodamine 6G» dye solution are represented. Changing of the polarization, phase and spatial structure of the Bessel light beams has been analysed. It is shown, that selfdiffraction is observed during the propagation of the pulse laser radiation in the dye solution. This effect leads to the appearance of an additional ring structured distribution of the intensity in the far field of the Bessel light beam. While propagating in the liquid crystall cell, transformation of the linear polarized Bessel light beam of the zero order to the beam with the orthogonal polarization and azimuthally-modulated distribution of the intensity, characteristic for the beam of the second order, has been realized.

**Key words:** Bessel light beams; optical vortex; selfdiffraction; liquid crystals.

Бесселевы световые пучки (БСП) находят все большее применение в различных областях оптики (лазерная обработка материалов [1], манипулирование микрочастицами [2], передача информации и др.). Часто БСП получают из гауссовых световых пучков при помощи аксиконов. Интерференция волн после аксикона формирует БСП, распределение интенсивности которого представляет собой концентрический набор колец. Область существования БСП определяется диаметром начального падающего светового пучка и углом конусности аксикона [3]. Поскольку расстояние между кольцами остается неизменным, то говорят о «бездифракционном» бесселевом световом пучке. Разнообразие применений БСП обуславливает развитие исследований особенностей распространения БСП в различных средах и преобразования структуры БСП при нелинейных взаимодействиях [4; 5].

Особый интерес представляет спин-орбитальное преобразование, происходящее при распространении бесселевых световых пучков вдоль оптической оси одноосных [6] или двуосных [7] кристаллов. При этом меняется как состояние поляризации БСП, так и топологический заряд [8]. Изменение структуры БСП можно реализовать и при помощи жидкокристаллических элементов [9], а также при распространении БСП в нелинейной среде, например в растворе красителя [10].

В настоящей работе рассмотрено изменение состояния поляризации, фазы и пространственного распределения интенсивности импульсных БСП при их распространении в растворе красителя и непрерывных БСП – в жидком кристалле.

Схема экспериментальной установки для исследования распространения БСП в кювете с раствором красителя «Родамин 6Ж» представлена на рис. 1. Импульсное (нано- либо пикосекундной длительности) лазерное излучение источника 1 с длиной волны 532 нм, попадающей в максимум полосы поглощения раствора красителя «Родамин 6Ж» в этаноле, направляется при помощи зеркал 2 в систему пространственной фильтрации, состоящей из линз 3, 5 и пинхола 4. Для получения бесселева светового пучка нулевого порядка использовалась коническая линза (аксикон) 7 с углом при основании 1°.

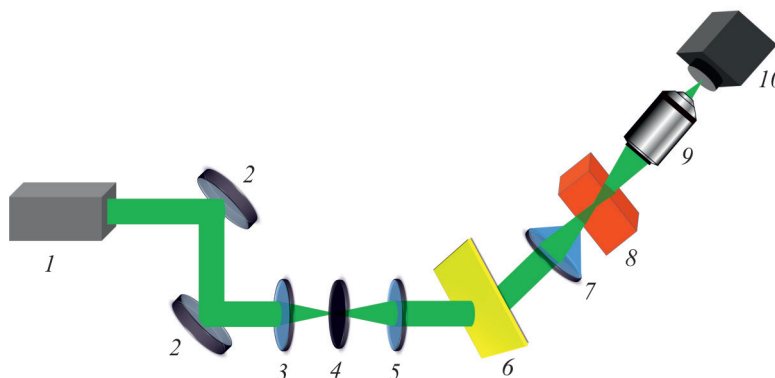


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental setup

В области оптимального формирования БСП размещалась кювета 8 с раствором красителя «Родамин 6Ж». Изображение распределения интенсивности прошедшего излучения в дальней зоне регистрировалось при помощи микрообъектива 9 на камере 10. Для получения бесселева светового пучка первого порядка перед аксиконом устанавливался голографический транспарант 6, преобразующий гауссов световой пучок в сингулярный световой пучок (оптический вихрь) первого порядка.

Распределение интенсивности бесселева светового пучка нулевого порядка представляет собой набор концентрических колец с центральным максимумом (рис. 2, а). При падении на аксикон оптического вихря первого порядка образуется бесселев световой пучок первого порядка с центральным провалом (см. рис. 2, б). Дальняя зона БСП в обоих случаях представляет собой кольцеобразное распределение интенсивности (см. рис. 2, в).

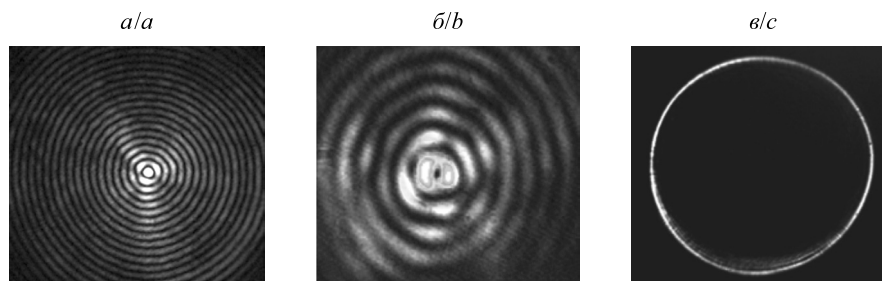


Рис. 2. Бесселев световой пучок нулевого порядка (а), первого порядка (б), распределение интенсивности в дальней зоне БСП (в)

Fig. 2. Bessel light beam of the zero order (a), first order (b), distribution of the intensity in the far field of the BLB (c)

Экспериментальные исследования проведены с использованием лазеров на иттрий-алюминиевом гранате с длительностью импульсов 20 нс и 120 пс. При этом энергии импульсов в обоих случаях были выбраны равными 2 мДж, чтобы обеспечить равенство светоиндуцируемой тепловой нелинейности:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \frac{kIt}{Cp},$$

где  $\frac{\partial n}{\partial T}$  – термооптический коэффициент;  $k$  – коэффициент поглощения раствора красителя;  $I$  – интенсивность;  $t$  – длительность импульса;  $C$  – удельная теплоемкость;  $p$  – плотность.

Из приведенной формулы, которая получена без учета теплообмена с окружающей средой, видно, что изменение показателя преломления определяется произведением интенсивности на длительность импульса, т. е. плотностью энергии светового импульса. Равенство энергий нано- и пикосекундных импульсов при одинаковых условиях их фокусировки определяет равенство термооптического изменения показателя преломления. Для выбранных условий эксперимента термооптический коэффициент  $\frac{\partial n}{\partial T} = -4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , удельная теплоемкость  $C = 2400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ , плотность  $p = 8 \cdot 10^{-4} \text{ кг/см}^3$  (этанольный раствор красителя), коэффициент поглощения  $k = 10 \text{ см}^{-1}$ , плотность энергии импульсов  $I \cdot t = 0,1 \text{ Дж/см}^2$ , тепловое изменение показателя преломления  $\Delta n$  составляет  $-2 \cdot 10^{-4}$ . Такая величина  $\Delta n$  является типичной для взаимодействия мегаваттных лазерных импульсов с растворами красителей и обеспечивает создание области со светоиндуцированным изменением показателя преломления.

В результате при распространении БСП первого порядка нано- и пикосекундной длительности в кювете с раствором красителя «Родамин 6Ж» наблюдается эффект самодифракции, проявляющийся в дополнительном кольце в дальней зоне прошедшего светового пучка (рис. 3). Заметим, что схожая картина имела место и при распространении в растворе красителя БСП нулевого порядка наносекундной [10] и пикосекундной длительности.

Для расширения возможностей преобразования структуры БСП было проведено исследование распространения БСП нулевого порядка через управляемую внешним напряжением жидкокристаллическую ячейку, которая представляла собой структуру типа сэндвича. Жидкий кристалл расположен между двумя стеклянными пластинами с нанесенными на них токопроводящими и ориентирующими слоями. Толщину жидкокристаллической (ЖК) ячейки задают калиброванные по диаметру волокна. В исследованиях использовался положительный нематический кристалл ЖК-1289. Для длины волны 633 нм величина оптической анизотропии данного жидкого кристалла составляет  $n_e - n_o = 0,16$  (показатель преломления для обыкновенной волны  $n_o = 1,53$  и необыкновенной волны  $n_e = 1,69$ ). Толщина ЖК-ячейки равнялась 20 мкм.

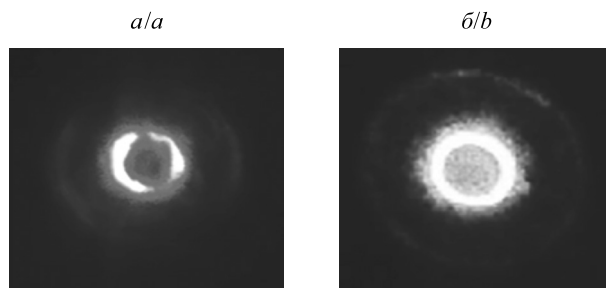


Рис. 3. Дальняя зона БСП первого порядка наносекундной (а) и пикосекундной (б) длительности при прохождении через кювету с раствором красителя «Родамин 6Ж»

Fig. 3. Far field of the BLB of the first order of nanosecond (a) and picosecond (b) duration after the propagation through the cell with the «Rhodamine 6G» dye solution

В отсутствие внешнего напряжения на ячейке молекулы жидкого кристалла ориентированы в плоскости ячейки (планарная ориентация). При изменении подаваемого на ЖК-ячейку внешнего напряжения от 0 до 20 В происходит постепенная переориентация молекул жидкого кристалла вдоль силовых линий прикладываемого электрического поля. Чем больше величина прикладываемого напряжения, тем больший по толщине слой жидкого кристалла становится переориентированным в объеме ячейки. При подаче внешнего напряжения, равного порядка 20 В, практически все молекулы жидкого кристалла ориентируются гомеотропно (перпендикулярно плоскости ячейки). В этом случае ЖК-ячейку можно рассматривать как одноосный кристалл с оптической осью, параллельной направлению распространения БСП. В такой ситуации можно ожидать преобразования БСП нулевого порядка в БСП второго порядка [6–8].

Нами исследованы преобразования поляризационной, фазовой и пространственной структур линейно-поляризованного БСП нулевого порядка при его прохождении в ЖК-ячейке. Установлено, что при подаче напряжения часть БСП приобретает поляризацию, ортогональную первоначальной. Увеличение управляющего напряжения приводит к изменению пространственного распределения интенсивности: до напряжения ~6 В распределение интенсивности в дальней зоне имеет вид кольца (рис. 4, а). При последующем увеличении напряжения появляются разрывы в распределении интенсивности. В случае достижения напряжения 20 В распределение интенсивности приобретает лепестковую структуру (см. рис. 4, б), характерную для БСП второго порядка [6]. Данный эффект является результатом суперпозиции падающего пучка и световых полей, возбуждаемых при взаимодействии БСП с ЖК-ячейкой, которая в данном случае есть одноосный кристалл [6–8]. Следует отметить, что при изменении ориентации линейной поляризации падающего светового пучка эффективность преобразования (доля интенсивности светового пучка с поляризацией, ортогональной первоначальной) практически не изменялась. Происходит изменение только ориентации лепестковой структуры в распределении интенсивности в дальней зоне прошедшего пучка (см. рис. 4).

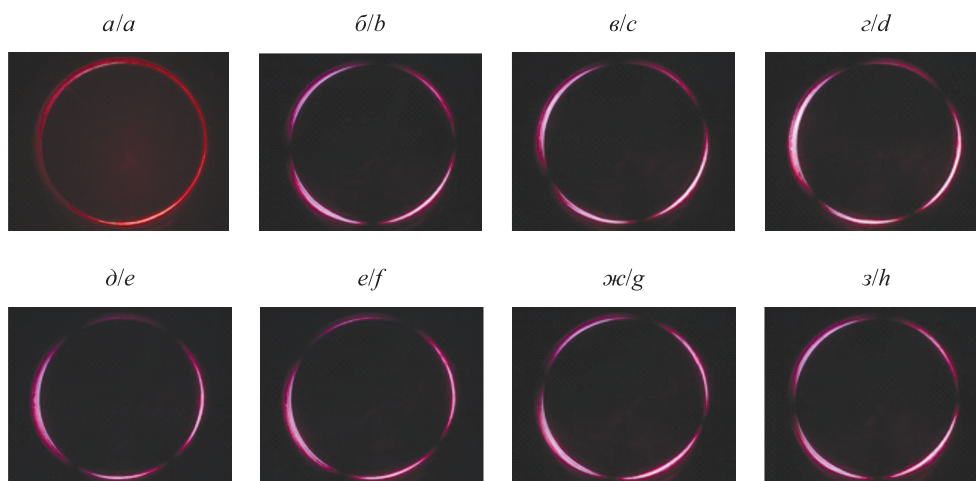


Рис. 4. Дальняя зона БСП, прошедшего через оптическую систему с ЖК-ячейкой в отсутствие внешнего напряжения (а) и с напряжением 20 В при различных ориентациях поляризации падающего пучка: 0° (б), 15° (в), 30° (г), 45° (д), 60° (е), 75° (ж), 90° (з)

Fig. 4. Far field of the BLB after the propagation through the optical system with the liquid crystal cell without external voltage (a), with applied external voltage 20 V and the initial polarization of the falling beam: 0° (b), 15° (c), 30° (d), 45° (e), 60° (f), 75° (g), 90° (h)

Таким образом, в настоящей работе иллюстрируются возможности преобразования поляризационной, фазовой и пространственной структур бесселевых световых пучков при их распространении в растворах красителей и жидких кристаллах. Преобразованное световое поле можно использовать для захвата и манипулирования микрочастицами в схемах оптического пинцета. Преобразование части бесселева светового пучка нулевого порядка в пучок второго порядка и их последующее взаимодействие представляют интерес для решения задач оптической микроскопии при формировании бездифракционных световых пучков с заданными характеристиками.

### Библиографические ссылки

1. Duocastella M., Arnold C. B. Bessel and annular beams for materials processing // *Laser Photonics Rev.* 2012. Vol. 6, № 5. P. 607–621. DOI: 10.1002/lpor.201100031.
2. Arlt J., Garces-Chavez V., Sibbett W., et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam // *Opt. Commun.* 2001. Vol. 197. P. 239–245.
3. Bouchal Z. Nondiffracting optical beams – physical properties, experiments, and applications // *Czech. J. Phys.* 2003. Vol. 53, № 7. P. 537–578. DOI: 10.1023/A:102480280.
4. Kazak N. S., Katranji E. G., Utkin I. A., et al. Self-diffraction of Bessel light beams in a nonlinear medium // *J. Appl. Spectrosc.* 2004. Vol. 71, № 5. P. 697–701. DOI: 10.1023/B:JAPS.0000049631.50343.b7.
5. Demas J., Steinvurzel P., Tai B., et al. Intermodal nonlinear mixing with Bessel beams in optical fiber // *Optica.* 2015. Vol. 2, № 1. P. 14–17. DOI: 10.1364/Optica.2.000014.
6. Хило Н. А., Петрова Е. С., Рыжевич А. А. Преобразование порядка бесселевых пучков в одноосных кристаллах // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 31, № 1. С. 85–89. DOI: 10.1070/QE2001v031n01ABEH001897.
7. Belyi V. N., Khilo N. A., Kurilkina S. N., et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion for Bessel beams propagating along the optical axes of homogeneous uniaxial and biaxial crystals // *J. Opt.* 2013. Vol. 15, № 4. Article ID: 044018. DOI: 10.1088/2040-8978/15/4/044018.
8. 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. Vol. 50, № 5. Article ID: 059001. DOI: 10.1117/1.3572109.
9. Slussarenko S., Murauski A., Du T., et al. Tunable liquid crystal  $q$ -plates with arbitrary topological charge // *Opt. Express.* 2011. Vol. 19, № 5. P. 4085–4090. DOI: 10.1364/OE.19.004085.
10. Romanov O. G., Gorbach D. V., Kupryianets T. A., et al. Propagation and self-action of Bessel light beams in dye solutions // *NPCS.* 2013. Vol. 16, № 4. P. 373–381.

### References

1. Duocastella M., Arnold C. B. Bessel and annular beams for materials processing. *Laser Photonics Rev.* 2012. Vol. 6, No. 5. P. 607–621. DOI: 10.1002/lpor.201100031.
2. Arlt J., Garces-Chavez V., Sibbett W., et al. Optical micromanipulation using a Bessel light beam. *Opt. Commun.* 2001. Vol. 197. P. 239–245.
3. Bouchal Z. Nondiffracting optical beams – physical properties, experiments, and applications. *Czech. J. Phys.* 2003. Vol. 53, No. 7. P. 537–578. DOI: 10.1023/A:102480280.
4. Kazak N. S., Katranji E. G., Utkin I. A., et al. Self-diffraction of Bessel light beams in a nonlinear medium. *J. Appl. Spectrosc.* 2004. Vol. 71, No. 5. P. 697–701. DOI: 10.1023/B:JAPS.0000049631.50343.b7.
5. Demas J., Steinvurzel P., Tai B., et al. Intermodal nonlinear mixing with Bessel beams in optical fiber. *Optica.* 2015. Vol. 2, No. 1. P. 14–17. DOI: 10.1364/Optica.2.000014.
6. Khilo N. A., Petrova E. S., Ryzhevich A. A. Transformation of the order of Bessel beams in uniaxial crystals. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electron.]. 2001. Vol. 31, No. 1. P. 85–89 (in Russ.). DOI: 10.1070/QE2001v031n01ABEH001897.
7. Belyi V. N., Khilo N. A., Kurilkina S. N., et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion for Bessel beams propagating along the optical axes of homogeneous uniaxial and biaxial crystals. *J. Opt.* 2013. Vol. 15, No. 4. Article ID: 044018. DOI: 10.1088/2040-8978/15/4/044018.
8. 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. Vol. 50, No. 5. Article ID: 059001. DOI: 10.1117/1.3572109.
9. Slussarenko S., Murauski A., Du T., et al. Tunable liquid crystal  $q$ -plates with arbitrary topological charge. *Opt. Express.* 2011. Vol. 19, No. 5. P. 4085–4090. DOI: 10.1364/OE.19.004085.
10. Romanov O. G., Gorbach D. V., Kupryianets T. A., et al. Propagation and self-action of Bessel light beams in dye solutions. *NPCS.* 2013. Vol. 16, No. 4. P. 373–381.

Статья поступила в редколлегию 25.09.2017.  
Received by editorial board 25.09.2017.