

УДК 535.147

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СИСТЕМЫ «ОДНООСНЫЙ КРИСТАЛЛ - ЛИНЗА»

Шостка Н.В.

*Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: nataliya_shostka@mail.ru*

В работе предложен простой метод формирования цилиндрически поляризованных пучков, распространяющихся вдоль оптической оси одноосного кристалла. Варьируя параметры системы «кристалл - линза» изменялись расстояния между фокусами и формировались радиально и азимутально поляризованные пучки.

Ключевые слова: цилиндрически поляризованные пучки, сингулярные пучки.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для исследователей большой интерес представляют радиально и азимутально поляризованные лазерные пучки, способные создавать крайне узкую зону фокуса [1] и формировать электрическое поле только с продольной компонентой при жесткой фокусировке [2], что позволяет их применять не только в устройствах захвата [3], но и в микроскопии, и в поляризационных приборах. Большинство существующих способов получения вышеуказанных лазерных пучков требуют особо точного расположения и юстировки оптических устройств экспериментальной установки.

В предлагаемой работе применен простой метод получения цилиндрически-поляризованных пучков, распространяющихся вдоль оптической оси одноосного кристалла. При этом поляризационные состояния таких пучков, несмотря на сложную структуру поляризации, равномерно заполняют всю сферу Пуанкаре [4]. В таких пучках при фокусировке апертурной линзой получаются два фокуса с ярко выраженными распределениями поляризации, состояния которых определяются не только топологическим зарядом, спином, но и параметрами кристалла и оптических элементов [5]. Возникает вопрос, возможно ли управлять необходимыми свойствами поляризации в таких пучках.

Целью данной работы является формирование и исследование цилиндрически поляризованных лазерных пучков после прохождения системы «одноосный кристалл - линза» с различными состояниями начальной поляризации.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Теоретические расчеты в работе проводились с учетом экспериментальной установки, изображенной на рис.1., где $L = 2,5$ м, $h = 2,5$ м, $h = 3,5$ см, $d = 4,2$ см, $z = 1$ см.

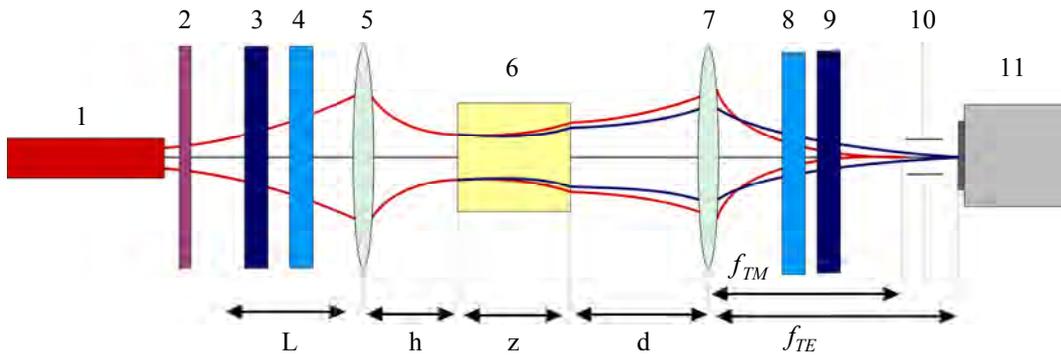


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм, 2 – компьютерно-синтезированная голограмма, 3,9 – пластинка $\lambda/4$, 4,8 – поляризатор, 5 – рассеивающая линза ($f=-50$ мм), 6 – кристалл CaCO_3 , 7-собирающая линза ($f=125$ мм), 10 – диафрагма, 11 – CCD камера.

Предположим, что право циркулярно-поляризованный параксиальный пучок фокусируется в одноосный кристалл, где он разделяется на два, обыкновенный и необыкновенный, распространяющиеся вдоль оптической оси. Обозначим первоначальное состояние пучка следующим образом: $|s \ l\rangle$. Рассмотрим два основных случая:

1. на кристалл падает право циркулярно-поляризованный сингулярный пучок с зарядом $l = -1$
2. на кристалл падает лево циркулярно-поляризованный сингулярный пучок с зарядом $l = -1$

Представим поле пучка с топологическим зарядом $l = -1$, т.е. с первоначальным состоянием $|1 \ -1\rangle$ в форме:

$$E_+ = \left\{ \left(\frac{r}{\omega_0 \sigma_0} \right) \Psi_0 + \left(\frac{r}{\omega_0 \sigma_e} \right) \Psi_e \right\} \exp(-i\varphi) \quad (1)$$

$$E_- = \left\{ \left(\frac{r}{\omega_0 \sigma_0} \right) \Psi_0 - \left(\frac{r}{\omega_0 \sigma_e} \right) \Psi_e \right\} \exp(i\varphi)$$

где $\Psi_{o,e} = (z_0 r / q_{o,e}^2) \exp[-ikn_1 r^2 / (2q_{o,e})]$, $q_{o,e} = S + f_2 q_2^{(o,e)} / (f_2 - q_2^{(o,e)})$,

$q_1 = h + d + (L + iz_0) f_1 / (f_1 + L + iz_0)$, $q_2^{(o,e)} = q_1 + (n_1 / n_{o,e}) z$ – комплексные параметры системы, $\sigma = 1 - iz / z_0$, $z_0 = kn_1 \omega_0^2 / 2$ – длина Рэлея, n_1 – показатель

преломления среды после кристалла, $n_{o,e}$ - показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, ω_0 - радиус перетяжки исходного пучка.

При этом E_+ компонента переносит единичный оптический вихрь с топологическим зарядом $l = -1$, и E_- компонента - оптический вихрь с топологическим зарядом $l = 1$.

Из записанных выражений видно, что пучок внутри кристалла представляет из себя сумму ТЕ и ТМ мод, т.е. сумму азимутально и радиально поляризованных пучков. Каждый из этих пучков характеризуется своей собственной длиной Рэлея z_o и z_e . Следовательно, эти парциальные пучки имеют, как говорилось выше, различные радиусы кривизны и текущую ширину перетяжки $w(z)$ на выходе из кристалла. Поскольку рассматриваемая оптическая система является центрированной и пучок не изменяет своей осевой симметрии при прохождении через элементы системы, воспользуемся законом ABCD для выражения (1). Различие в радиусах кривизны в фокальной плоскости дает возможность сформировать в каждой из этих фокальных плоскостей распределение поляризации, характерное для азимутально и радиально поляризованных пучков [6].

На рисунке 2 представлены два фокуса, соответствующие азимутально и радиально поляризованным пучкам, разделенных областью низкой интенсивности.

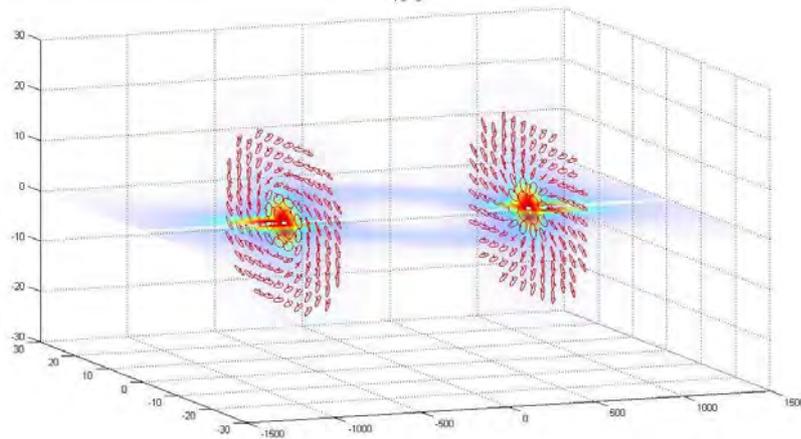


Рис. 2. Продольное сечение сфокусированного гауссова пучка, построенное на основе теоретических представлений, рассмотренных выше.

Изменим первоначальное состояние поляризации в падающем пучке следующим образом: $|1 \ -1\rangle \rightarrow |-1 \ -1\rangle$. Структура поля на выходе из кристалла изменится. При этом компоненты нового поля будут определяться как:

$$E_+ = e^{-i3\varphi} \sum_{j=0}^2 (iz_0)^{j-2} (2/j!) (r/\omega_0)^{2(j-2)} [\Psi_o/q_o^{j-2} - \Psi_e/q_e^{j-2}],$$

$$E_- = (\Psi_o + \Psi_e) e^{-i\varphi}$$
(2)

Таким образом, в данном случае E_+ компонента переносит единичный оптический вихрь с топологическим зарядом $l = -3$, и E_- компонента - оптический вихрь с топологическим зарядом $l = -1$.

На рисунке 3 представлено теоретически построенное изменение структуры поля в рассмотренных нами случаях.

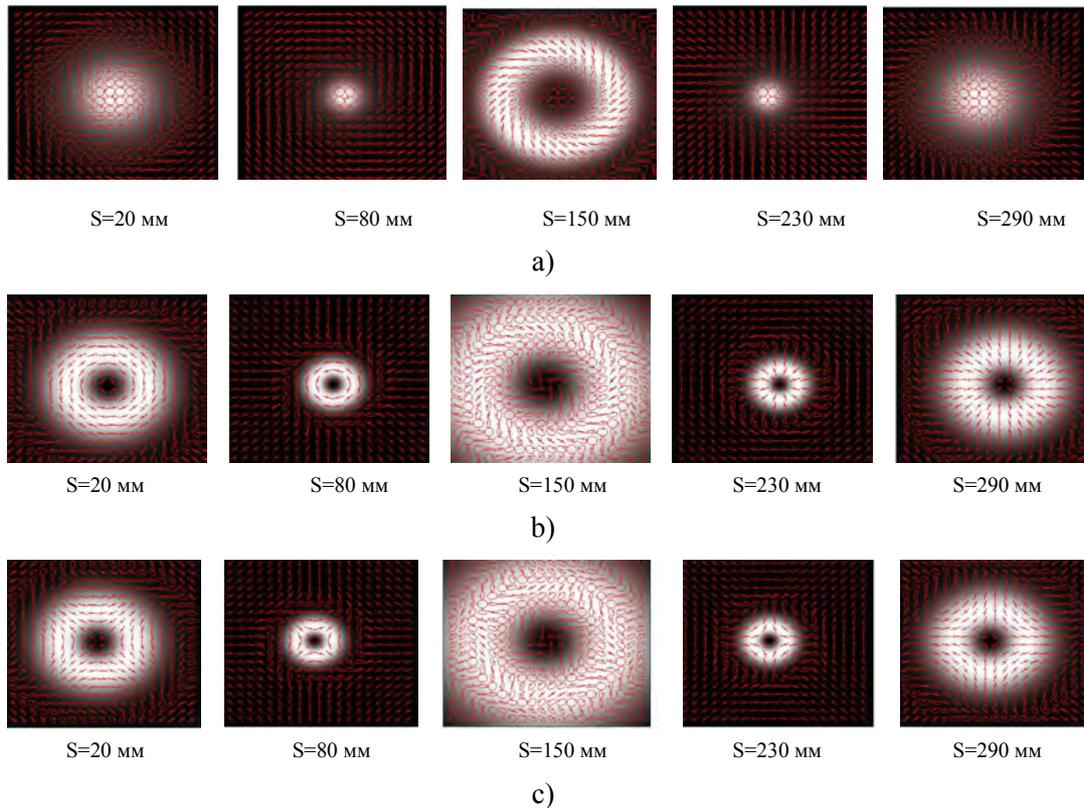


Рис. 3. Эволюция распределения поляризации на фоне распределения интенсивности в обыкновенном и необыкновенном модовых пучках: а) на кристалл фокусируется право циркулярно-поляризованный гауссов пучок, б) на кристалл падает сингулярный пучок с начальным состоянием $|1-1\rangle$, с) на кристалл падает сингулярный пучок с начальным состоянием $|-1-1\rangle$.

Необходимо отметить, что оба фокуса могут наблюдаться только при определенных параметрах системы. Критерий данного явления основан на следующих предположениях: каждый ТЕ и ТМ пучки имеют пик интенсивности в фокальной плоскости: $r_{o,e}^2 = \omega_o^2(1 + z^2 / z_{o,e}^2)$, т.е. максимумы в обыкновенном и необыкновенном пучках будут находиться на расстоянии ΔS друг от друга. Предполагается, что два фокуса могут независимо наблюдаться при условии: $\Delta S > 2\Delta$, где $\Delta_o = \Delta_e = \Delta$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для экспериментального изучения свойств прошедшего через кристалл пучка с различными состояниями начальной поляризации были рассмотрены три основных случая:

- на кристалл фокусируется право циркулярно-поляризованный гауссов пучок;
- на кристалл падает сингулярный пучок с начальным состоянием $|1-1\rangle$;
- на кристалл падает сингулярный пучок с начальным состоянием $|-1-1\rangle$;

Свет от гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 0,6328 \mu m$ проходил последовательно через компьютерно-синтезированную голограмму, с помощью которой формировался единично заряженный вихрь, поляризатор и пластинку $\frac{\lambda}{4}$, которые позволяли получить необходимую циркуляцию поляризации. Полученный циркулярно-поляризованный монохроматический параксиальный пучок фокусировался с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 30 \text{ мм}$ в одноосный кристалл. Пучок внутри кристалла представляет из себя сумму азимутально и радиально поляризованных пучков. Каждый из этих пучков характеризуется своей собственной длиной Рэлея, различными радиусами кривизны и шириной перетяжки $w(z)$ на выходе из кристалла.

Поле выходного пучка после кристалла фокусировалось с помощью собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 70 \text{ мм}$, а диафрагма вырезала необходимое поле (Рис.4, рис.5).

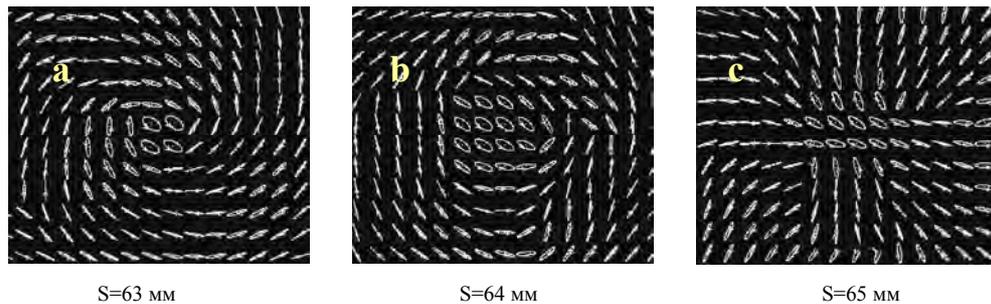


Рис. 4. Экспериментально полученные картины распределения поляризации при распространении гауссова пучка вдоль оси кристалла.

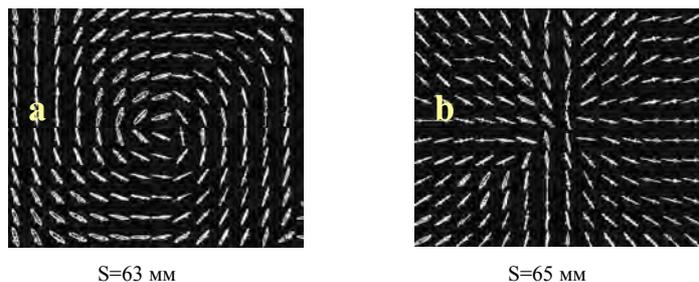


Рис. 5. Экспериментально полученные картины распределения поляризации при распространении сингулярного пучка, переносящего оптический вихрь, вдоль оси кристалла с начальным состоянием $|1-1\rangle$.

Все экспериментальные данные с хорошей степенью точности совпали с теоретическими расчетами.

Положение фокальных плоскостей определяется рядом параметров: показателями преломления обыкновенного и необыкновенного пучков n_o, n_e в кристалле, толщиной кристалла z , расстоянием линзы от выходной грани кристалла d , показателем преломления среды после кристалла n и фокусным расстоянием линзы f [7]. Изменение этих параметров по-разному влияет на фокусировку полученных пучков и их поляризационные свойства.

ВЫВОДЫ

Таким образом, варьируя параметры системы «кристалл-линза» можно менять расстояния между двумя фокусами, то есть подбором параметров фокусирующей системы можно формировать и радиально и азимутально поляризованные пучки.

Список литературы

1. Kitamura K. Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam / Kitamura K., Sakai K., Noda S. // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – Issue 5. – P. 4518-4525.
2. Dorn R. Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam / Dorn R., Quabis S., Leuchs G. // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Vol. 91. — Issue 23. — P. 233901-233901.
3. Novel optica trap of atoms with a doughnut beam / Kuga T., Torii Y., Shiokawa N., et al. // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78. – P. 4713-4716
4. Fadeyeva T.A. Transverse shift of a high-order paraxial vortex-beam induced by a homogeneous anisotropic medium / Fadeyeva T.A., Rubass A.F. and Volyar A.V. // Phys. Rev. – 2009. – A. 79. – P. 053815.
5. Focusing of coherent laguerre-gaussian beams after uniaxial crystals / Rubass A.F., Egorov Yu.A., Fadeyeva T., Volyar A. // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 6023. – P. 60230U -1 - 60230U-5.
6. Shvedov V. Natural shaping of the cylindrically polarized beams / Shvedov V., Fadeyeva T., Shostka N., et al. // OPTICS LETTERS. – 2010. – Vol. 35, No. 22.
7. Spatially engineered polarization states and optical vortices in uniaxial crystals / Fadeyeva T., Shvedov V., Izdebskaya Ya., et al. // OPTICS EXPRESS. – 2010. – Vol. 18, No. 10.

Шостка Н.В. Теоретичне та експериментальне дослідження поляризованих лазерних пучків після проходження системи «одновісний кристал - лінза» / Шостка Н.В. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – Т. 24(63), №2. – С. 120-126.

В роботі запропоновано простий метод формування циліндрично поляризованих пучків, поширених вздовж оптичної вісі одновісного кристалу. Варіюючи параметри системи «кристал - лінза» змінювались відстані між фокусами і формувались радіально та азимутально поляризовані пучки.

Ключові слова: циліндрично поляризовані лазерні пучки, сингулярні пучки.

Shostka N.V. Theoretical and experimental analysis of polarized laser beams passed the system “uniaxial crystal - lens” / Shostka N.V. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2011 – Vol. 24(63), No.2 – P. 120-126.

In this paper is used a simple method of generation of cylindrically polarized beams propagating along the optical axis of a uniaxial crystal. By varying the parameters of the system “crystal – lens” the distance between two focuses with different polarization distributions was changed, and radially and azimuthally polarized beams were formed.

Keywords: cylindrically polarized laser beams, singular beams.

Поступила в редакцію 12.04.2011 г.