

УДК 535.012.21

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ СИНГУЛЯРНОГО ПУЧКА В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ

Соколенко Б. В.

*Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского, проспект академика
Вернадского 4, Симферополь 295007, Республика Крым, Россия*

E-mail: simplexx.87@gmail.com

Приведен ряд теоретических и экспериментальных результатов, описывающих преобразование интенсивности и фазы полей параксиальных оптических пучков, прошедших одноосный кристалл строго ортогонально оптической оси. Исследована динамика формирования фазовых сингулярностей в процессе двулучепреломления во вращающейся системе оптический пучок-кристалл, рассмотрено воздействие анизотропной дифракции на положение внеосевого оптического вихря. Представлены решения векторного параксиального уравнения для обыкновенного и необыкновенного пучков в виде параметрических полей.

Ключевые слова: фазовая сингулярность, оптический вихрь, двулучепреломление, анизотропия.

PACS: 42.25.Lc

ВВЕДЕНИЕ

Особое место в сингулярной оптике представляют исследования, связанные с распространением световых пучков и преобразованием их структуры в анизотропных средах – одноосных кристаллах [1-4]. Прежде всего, анизотропная среда позволяет формировать в поле пучка фазовые [3, 5] и поляризационные сингулярности, а также управлять их формой и взаимным положением на плоскости, что находит широкое применение в устройствах модуляции, оптических пинцетах и микроскопии [6].

В работах, касающиеся ортогонального распространения пучка в анизотропных средах [7], авторами показано, что пучки в кристалле испытывают естественную эллиптическую деформацию в поперечном сечении, величина которой пропорциональна разности показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного пучков в кристалле, однако вопрос об особенностях пространственной фазовой структуры раскрыт не полностью. В частности, формирование сингулярными пучками коноскопических картин заслуживает отдельного рассмотрения благодаря богатому разнообразию эффектов, вызванных интерференцией обыкновенного и необыкновенного пучков.

Ранее изученные физические механизмы формирования сложных векторных полей в кристаллах предполагали трансляцию однородно поляризованных пучков вдоль оптической оси кристалла или под небольшим углом к ней [4]. В нашем же случае, вращение кристалла вокруг перпендикуляра к оптической оси позволяет задавать требуемые конфигурации векторных сингулярностей в поле после

кристалла. Таким образом, вопрос формирования и управления оптическими вихрями является актуальной проблемой современной оптики.

1. РЕШЕНИЕ ВОЛНОВОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СИНГУЛЯРНОГО ПУЧКА В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ

Поскольку кристалл представляет собой одноосную однородную, неограниченную среду, главные кристаллографические оси которой привязаны к лабораторным осям координат, тензор диэлектрической проницаемости примет вид:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Оптическая ось кристалла C направлена вдоль оси y , перпендикулярно оси z , вдоль которой распространяется пучок. Компоненты пучка при распространении ортогонально оптической оси являются модами собственной линейной поляризации и в этом случае не интерферируют друг с другом. В параксиальном приближении компоненты пучка представим в виде полей:

$$E_x = \tilde{E}_x(x, y, z) e^{(-ik_1 z)} \quad (2)$$

$$E_y = \tilde{E}_y(x, y, z) e^{(-ik_2 z)} \quad (3)$$

Тогда для каждой из поперечно поляризованных компонент можно записать уравнения [1]:

$$\partial_x^2 \tilde{E}_x + \partial_y^2 \tilde{E}_x - 2ik_1 \partial_z \tilde{E}_x = 0 \quad (4)$$

$$\partial_x^2 \tilde{E}_y + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \partial_y^2 \tilde{E}_y - 2ik_2 \partial_z \tilde{E}_y = 0 \quad (5)$$

где $k_1 = k_z^{(x)} = k_0 n_1$ и $k_2 = k_z^{(y)} = k_0 n_2$. Позволим кристаллу вращаться, введя переменные ψ – угол прецессии, в то время как φ является углом внутреннего вращения оптического вихря относительно оси пучка. Ограничимся наиболее простым случаем пучка с круговым поперечным сечением в плоскости $z=0$ и радиусом перетяжки w_o, w_e . Решение волновых уравнений (4), (5) представим в виде:

$$\tilde{E}_x = \left(\frac{X - i\xi Y}{w_o \sigma_o} - a e^{-i\xi(\psi - \varphi)} \right) \times \exp \left[- (X^2 + Y^2) / w_o^2 \sigma_o \right] / \sigma_o \quad (6)$$

$$\tilde{E}_y = \frac{i}{\sqrt{\sigma_x \sigma_y}} \left(\frac{X}{w_e \sigma_x} - i\xi \frac{Y}{w_e \sigma_y} - a e^{-i\xi(\psi - \varphi)} \right) \times \exp \left[- \frac{X^2}{w_e^2 \sigma_x} - \frac{Y^2}{w_e^2 \sigma_y} \right] \quad (7)$$

Введем обозначения: $z_o = k_1 w_o^2 / 2$, $z_x = k_2 w_e^2 / 2$, $z_y = k_2 w_e^2 n_1^2 / 2 n_2^2$, $\sigma_o = 1 - iz / z_o$, $\sigma_x = 1 - iz / z_x$, $\sigma_y = 1 - iz / z_y$, $X = x \cos \psi - y \sin \psi$, $\xi = \pm 1$. Полученные выражения

описывают поведение сингулярного пучка в системе координат, связанной с подвижной системой, при чем пучок распространяется строго ортогонально оптической оси кристалла (Рис. 1). Выражениях (6) и (74) параметр a отвечает за смещение вихря относительно оси пучка. Очевидно, для обыкновенного и необыкновенного пучков, вследствие анизотропии кристалла, длина Рэля будет различна, что приведет к неодинаковому смещению вихря в поперечном сечении каждой из компонент E_x и E_y , и, как следствие, в циркулярно поляризованных компонентах $E_+ = E_x - iE_y$, $E_- = E_x + iE_y$. Фазовый портрет на Рис. 1 свидетельствует о наличии сингулярности в пучке, а направление спирали указывает на знак топологического заряда. Сдвиг фазы на периферии пучка указывает на постоянную разность фаз между обыкновенным и необыкновенным пучками.

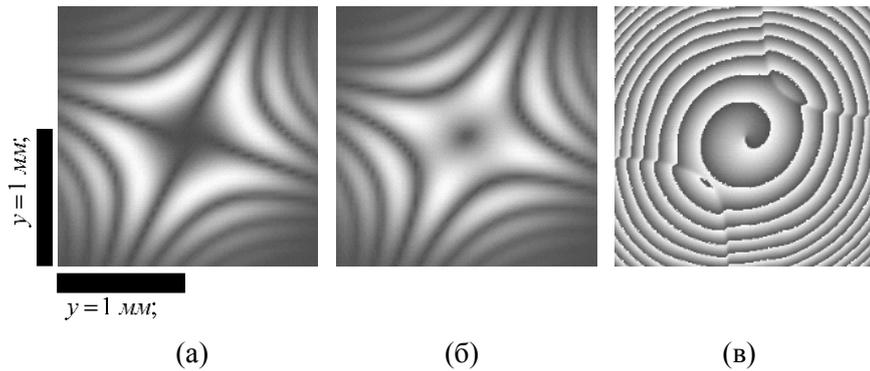


Рис. 1. Распределение интенсивности в циркулярно поляризованных компонентах: (а) E_- , (б) E_+ и фазы пучка (в) для пучка с центрированным вихрем при $a = 0$, $\omega_0 = 20$ мкм и $z = 20$ мм, $\xi = -1$, $n_o = 1,54$, $n_e = 1,55$, $\psi = 0,4\pi$.

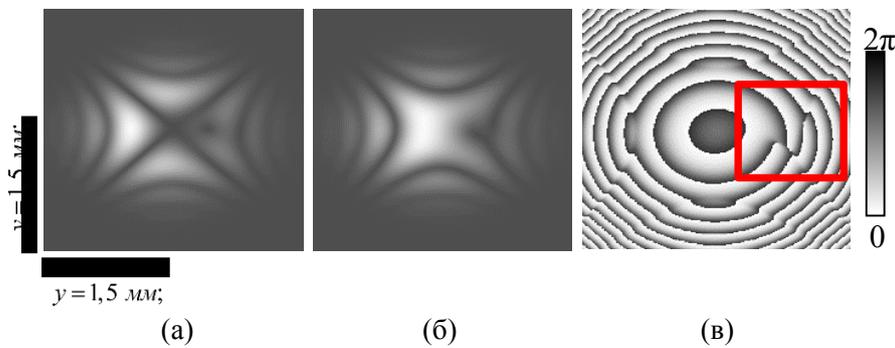


Рис. 2. Распределение интенсивности в циркулярно поляризованных компонентах: (а) E_- , (б) E_+ и фазы пучка (в) для пучка со смещенным вихрем при $a = 0,5\omega_0 = 10$ мкм и $z = 20$ мм, $\xi = -1$, $n_o = 1,54$, $n_e = 1,55$. Прямоугольником отмечена область топологической реакции.

Как показано на Рис. 2, при смещении от оси оптического вихря в исходном пучке на расстояние равное половине радиуса перетяжки $a = 0.5\omega_0$, сдвиг вихря в обыкновенном пучке после двулучепреломления соответствует таковому в исходном, в то время для необыкновенного пучка из-за эллиптической деформаций положение вихря не соответствует первоначальному.

Иными словами, эллиптическая деформация (вызванная анизотропией среды) усиливает смещение сингулярности в необыкновенном пучке, вызывая расхождение вихрей в циркулярно поляризованных компонентах. Чем больше величина смещения исходного вихря относительно оси гауссова пучка, тем явнее расхождение.

2. ДИНАМИКА ФАЗОВЫХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ КОМПОНЕНТАХ ПАРАКСИАЛЬНОГО ПУЧКА В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ

Дополнительное искажение в фазу вносит тонкая структура коноскопической картины, разность фаз между линиями семейства изоклин которой имеет постоянную величину, кратную π , при этом наличие внеосевого вихря в окрестности линий вносит дополнительный сдвиг фазы в структуре коноскопической картины и приводит к формированию топологического диполя (Рис. 3, а).

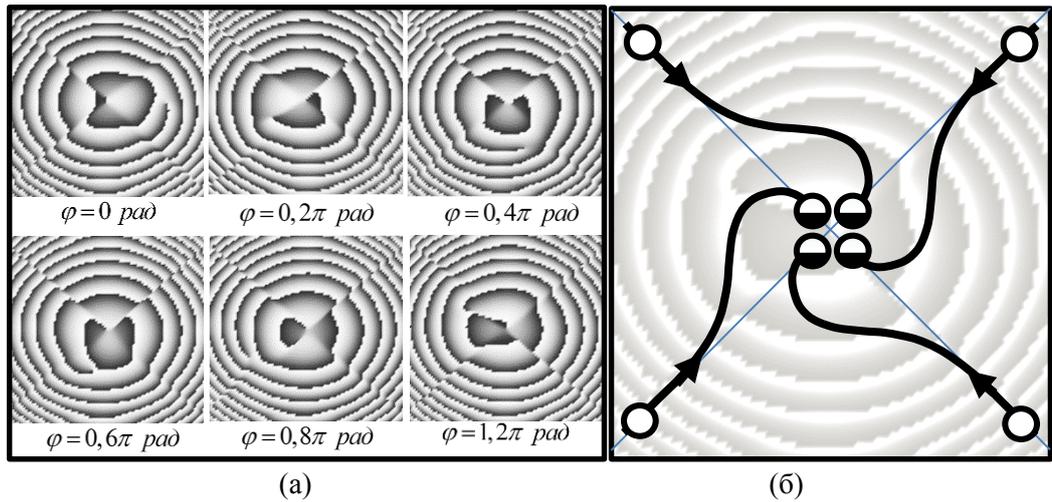


Рис. 3. Эволюция фазы пучка циркулярно поляризованной компоненты E_- в области сингулярности: (а) фазовые портреты внеосевого оптического вихря при различных полярных углах φ ; (б) траектория фазовых сингулярностей в процессе поворота вихря относительно оси пучка: белые окружности соответствуют области рождения сингулярности, окружности с половинчатой заливкой указывают на рождение вихря с противоположным знаком и аннигиляцию его с исходным в окрестности центра пучка. Сплошные линии со стрелками указывают направление движения сингулярностей; $a = 0,5$, $\omega_0 = 10 \text{ мкм}$ и $z = 20 \text{ мм}$.

Пространственное положение коноскопической картины и взаимная ориентация оптического вихря приводит к ряду топологических реакций и локальному фазовому анфолдингу. Управление положением оптического вихря в сечении пучка может осуществляться радиус-вектором (параметр a) и азимутальным углом φ . В случае осевого вихря, значительного искажения в структуре фазы коноскопической картины не происходит, однако небольшое смещение вихря от оси пучка сопровождается наложением фазового профиля сингулярности и коноскопической картины. Последовательное изменение положения оптического вихря в данном случае приводит ряду аннигиляций и рождению топологических диполей.

В динамике данный процесс можно представить в виде траектории (Рис. 3, б). Исходный оптический вихрь асимптотически приближается к оси пучка, где происходит аннигиляция с вихрем обратного топологического заряда, в то же время на периферии формируется вихрь со знаком топологического заряда, совпадающим с исходной сингулярностью, таким образом формируется топологический диполь одна часть которого располагается в окрестности оси пучка, а вторая приходит с бесконечности, замещая исходный вихрь. При дальнейшем повороте вихря в пучке (при изменении угла φ и $a = const$), процесс повторяется. Стоит отметить что движение вихрей происходит вдоль линии, разграничивающей семейства изоклин, разность фаз между которыми испытывает скачок, кратный π . Благодаря наличию исходной фазовой сингулярности, вводимой в пучок, в кристалле формируется ряд вихрей в области линии раздела семейств (Рис. 4).

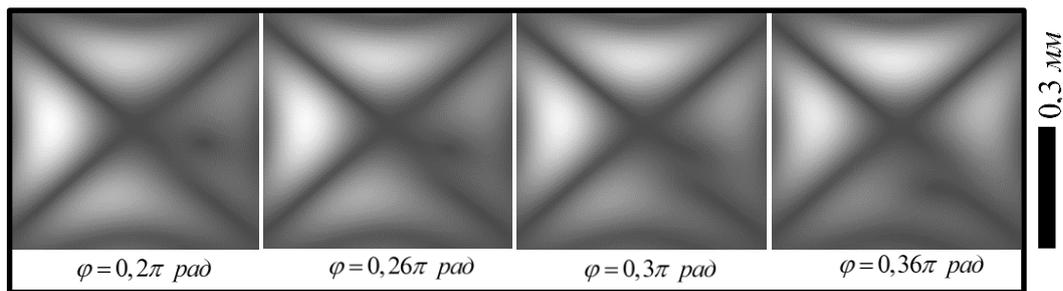


Рис. 4. Распределение интенсивности в окрестности центра пучка циркулярно поляризованной компоненты E_- для различных углов φ при $a = 0,5$, $\omega_0 = 10$ мкм, и $z = 20$ мм, $\xi = -1$, $n_o = 1,54$, $n_e = 1,55$.

В ортогональной циркулярно поляризованной компоненте процесс топологических реакций происходит идентично за исключением локальных траекторий топологических диполей, которые зависят от продольного смещения вихря от оси пучка.

Топологические реакции в компоненте E_+ образуются, главным образом, за счет взаимодействия исходного вихря с линиями изоклин, результатом чего является расщепление линии по интенсивности и искажение фазового портрета, в

котором присутствуют характерные «вилки», соответствующие фазовым сингулярностям и топологическим диполям (Рис. 5, а). Изменение угла φ приводит к последовательному расщеплению линий, находящихся в непосредственной близости к траектории внеосевого вихря. В зоне топологической реакции вихри дипольной пары сходятся, подвергаясь фазовому анфолдингу (сглаживанию фазовой поверхности) в области кривых линий изоклин, после чего исходный вихрь продолжает свое движение. Таким образом, фазовая сингулярность вносит возбуждение в структуру коноскопической картины, вызывая реакцию среды посредством формирования топологических пар (Рис. 5, б).

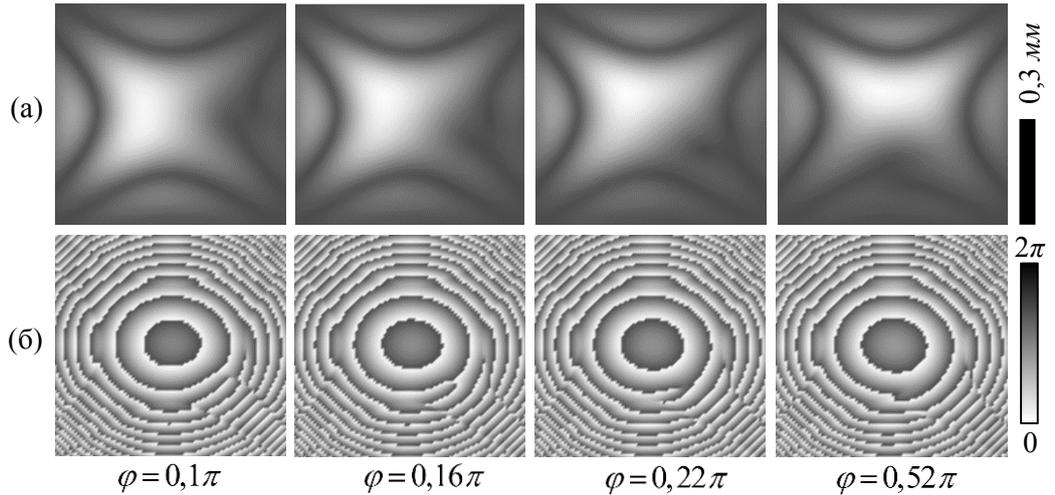


Рис. 5. Эволюция фазовых сингулярностей в поле пучка компоненты циркулярной поляризации E_+ для различных азимутальных углов φ ориентации исходного внеосевого вихря: (а) интенсивность поля, (б) фазовый профиль. Параметры пучка: $a = 0,8$, $\omega_0 = 16 \text{ мкм}$ и $z = 20 \text{ мм}$, $\xi = -1$, $n_o = 1,54$, $n_e = 1,55$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный расчет и моделирование процессов распространения параксиальных пучков, переносящих оптический вихрь – фазовую сингулярность в одноосном кристалле, позволил выявить сложный процесс взаимодействия анизотропной среды со световыми полями. Классическая коноскопическая картина, сформированная интерференцией обыкновенного и необыкновенного пучков обладает высокой чувствительностью к фазовым искажениям, в качестве которых могут выступать оптические вихри, краевые дислокации, иные неоднородности.

Показано, что смещение оптического вихря относительно оси пучка вызывает формирование фазовых сингулярностей, которые взаимодействуют с исходным вихрем, влияя на траекторию его движения. Главным образом это связано с

пространственной расходимостью точек сингулярностей в обыкновенном и необыкновенном пучках.

Образование топологических пар, их аннигиляция и пространственная ориентация указывает на отклик среды и, следовательно, что может быть использовано в качестве датчиков, фазовых модуляторов и анализаторов световых полей.

Список литературы

1. The precession of vortex-beams in a rotating uniaxial crystal / T. A. Fadeyeva, A. F. Rubass, B. V. Sokolenko, A. V. Volyar // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 11, Issue 9. – P. 53-55.
2. Soskin M. S. Singular optics *Progress in optics* / M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov// *Nova Science.* – 2011. – Vol. 42. – P. 219-276.
3. Sokolenko B. V. The vortex generation in revolving uniaxial crystal during the propagating nearly perpendicular to its optical axis / B. V. Sokolenko, A. F. Rubass and A. V. Volyar // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.* – 2013. – Vol. 16, No 4. – P. 344-348.
4. Volyar A. Generation of single-charge optical vortices with an uniaxial crystal / A. Volyar, V. Shvedov, T. Fadeyeva // *Optics Express.* – 2009. – Vol. 14, No 9. – P. 3724-372.
5. The evolution of light spin-orbital momentum within the rotated uniaxial crystal near the perpendicular to its optical axis / B. V. Sokolenko, A. F. Rubass, S. N. Lapaeva, et al. // *Proceedings of SPIE.* – 2013. – Vol. 9066.
6. Optical Vortex Scanning in an Aperture Limited System / A. Popiolek-Masajada, B. Sokolenko, I. Augustyniak, et al. // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2014. – Vol. 55. – P. 105-112.
7. Ciattoni A. Optical propagation in uniaxial crystals orthogonal to the optical axis: paraxial theory and beyond / A. Ciattoni and C. Palma // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2008. – Vol. 20. – 2163-71.

Соколенко Б. В. Перетворення фазової структури сингулярності пучка в одноосних кристалах / Б. В. Соколенко // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Фізико-математичні науки.* – 2014. – Т. 27 (66), № 2. – С. 29-36.

Наведено ряд теоретичних і експериментальних результатів, що описують перетворення інтенсивності та фази полів параксильної оптичних пучків, що пройшли одноосний кристал ортогонально до оптичної вісі. Досліджено динаміку формування фазових сингулярностей в процесі подвійного променезаломлення у системі оптичний пучок-кристал, досліджено вплив анізотропної дифракції на стан позавісьового оптичного вихору. Представлено рішення векторного параксильного рівняння для звичайного і незвичайного пучків у вигляді параметричних полів.

Ключові слова: фазова сингулярність, оптичний вихор, інтерференція, анізотропія.

Sokolenko B. V. Conversion of phase structure of singular beams in uniaxial crystals / B. V. Sokolenko // *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University.* – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2014. – Vol. 27 (66), No 2. – P. 29-36.

There is a series of theoretical and experimental results, which describe the transformation of the intensity and phase of paraxial optical beams passed uniaxial crystal strictly orthogonal to the optical axis. The dynamics of singular beams and phase shaping within the rotating birefringent crystal and anisotropic diffraction effects were investigated. The solutions of the vector paraxial equation for the ordinary and extraordinary beams in the form of parametric fields are shown.

Key words: phase singularity, optical vortex, interference, anisotropy.

References

1. T. A. Fadeyeva, A. F. Rubass, B. V. Sokolenko, A. V. Volyar, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** (9), 53 (2009).
2. M. S. Soskin, M. V. Vasnetsov, *Nova Science* **42**, 219 (2011).

3. B. V. Sokolenko, A. F. Rubass and A. V. Volyar, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* **16**, No. 4, 344 (2013).
4. A. Volyar, V. Shvedov, T. Fadeyeva, *Optics Express* **14**, No. 9, 3724 (2009).
5. B. V. Sokolenko, A. F. Rubass, S. N. Lapaeva, M. V. Glumova and A. V. Volyar, *Proceedings of SPIE* **9066** (2013).
6. A. Popiolek-Masajada, B. Sokolenko, I. Augustyniak, J. Masajada A. Khoroshun, and M. Bacia, *Optics and Lasers in Engineering* **55**, 105 (2014).
7. A. Ciattoni and C. Palma, *J. Opt. Soc. Am. A* **20**, 2163-71 (2008).

Received 05 October 2014.