

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИМЕТРИИ В ГИБРИДНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОРЯДКАМИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В.Д. Зайцев^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт»;

²Самарский университет, г. Самара

e-mail: zaicev-vlad@yandex.ru

Аннотация

В данной работе, используя формализм Ричардса-Вольфа, исследовалась спиральность гибридных векторных вихревых пучков, представляющих собой пучки с различными комбинациями топологических зарядов и порядков поляризации. Показано, что спиральность в таких пучках является центрально симметричной, но при этом наблюдается асимметрия в зонах с отрицательными и положительными значениями плотности спиральности. Центральная симметрия сохраняется: если провести произвольную прямую через центр, то в таком сечении кривая будет симметрична относительно нуля. Здесь асимметрия на уровне уравнивания отрицательных и положительных зон плотности спиральности. Обычно они совпадают для пучков, а здесь нет.

Ключевые слова: оптические вихри, гибридная поляризация, уравнения Ричардса–Вольфа, острая фокусировка света.

Введение

В настоящее время активно исследуются поляризационно-неоднородные пучки. Пучки Пуанкаре [1] обладают радиальной симметрией, их частными случаями являются радиально и азимутально поляризованные пучки [2]. При фокусировке таких пучков наблюдаются обратный поток энергии [3] и спин-орбитальное преобразование [4–5]. Значительное внимание уделяется также пучкам с гибридной поляризацией, понимание которой варьируется: поляризация может меняться с круговой на радиальную в зависимости от азимутального угла или расстояния до оси [6-8, 9]. В последнее время активно изучается спиральность [10]. Для пучков Пуанкаре показано [11], что спиральность радиально-симметрична и максимальна при $\theta = 0$.

В данной работе исследована спиральность гибридного пучка, сочетающего радиальную и круговую поляризацию с вихревой фазой. Рассмотрены пучки порядка 1–5 с топологическим зарядом 1, $\lambda = 0,633$ мкм, фокусировка апланатическим объективом с $NA = 0,95$. Показано, что интенсивность и плотность спиральности в фокусе не обладают радиальной симметрией, но центрально симметричны; подобная асимметрия ранее не наблюдалась.

1. Материалы и методы

Поведение света в области острого фокуса можно описать с помощью формулы Ричардса-Вольфа [12]:

$$\mathbf{U}(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) \Gamma(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (1)$$

В данной работе рассматривается фокусировка оптического вихря с гибридной поляризацией; вектор Джонса для него имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= A(\theta) e^{in\varphi} \begin{pmatrix} -i \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{pmatrix}, \\ \mathbf{H} &= A(\theta) e^{in\varphi} \begin{pmatrix} -\cos m\varphi \\ -i \sin m\varphi \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – порядок гибридного векторного пучка, n – топологический заряд оптического вихря, функция $A(\theta)$ описывает радиально-симметричную амплитуду начального светового поля в зависимости от полярного угла θ .

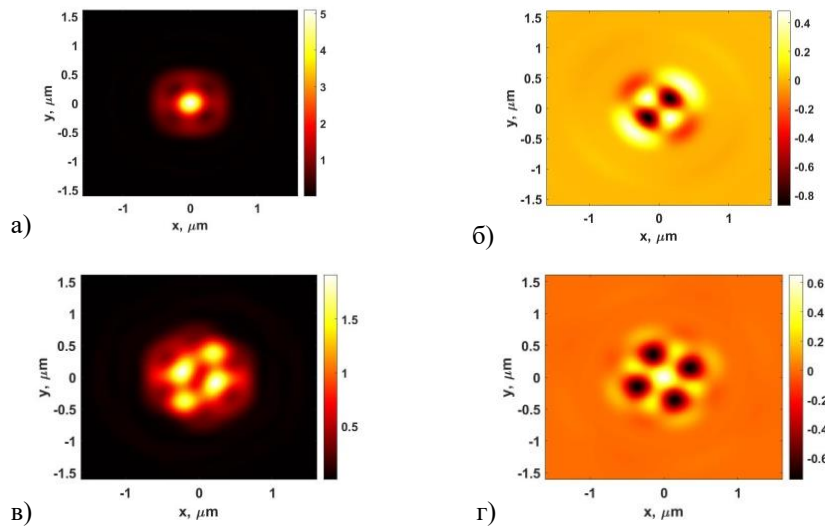
Интенсивность рассчитывалась как сумма квадратов модулей компонент напряженности электрического поля:

$$I = I_x + I_y + I_z = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2 \quad (3)$$

2. Моделирование

Численная модель реализована в MATLAB на основе интеграла Ричардса–Вольфа (1) для $\lambda = 0,633$ мкм и апланатического объектива с $NA = 0,95$. Рассмотрены комбинации топологического заряда $n = 1$ и порядка поляризации $m = 1-5$.

Результаты (рис. 1) показывают, что спиральность отличается от описанной в [11], она не совпадает с интенсивностью, число локальных минимумов интенсивности равно $2m$, а максимальные значения достигаются при $n = 1, m = 2$. Интенсивность и плотность спиральности в фокусе не обладают радиальной симметрией, но центрально симметричны. Отсутствие радиальной симметрии ранее наблюдалось у пучков Пуанкаре, однако плотность спиральности для них сохраняла радиальную поляризацию [11]. На рис. 1б максимальные положительные значения плотности спиральности составляют примерно половину модуля минимальных отрицательных, что ранее не отмечалось.



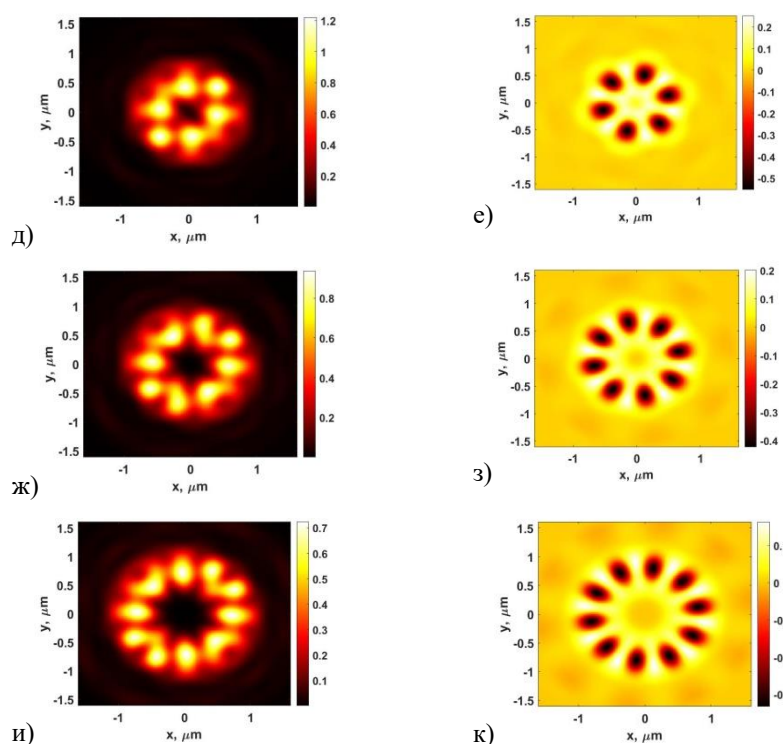


Рисунок 1 – Интенсивность (а, в, д, ж, и) и спиральность (б, г, е, з, к) для гибридного пучка с топологическим зарядом $n=1$ и порядком поляризации $m=1$ (а, б), $m=2$ (в, г), 3(д, е), 4(ж, з), 5(и, к)

Заключение

Теоретически и численно исследована спиральность гибридных векторных вихревых пучков при острой фокусировке (формализм Ричардса–Вольфа) для комбинаций топологического заряда $n=1$ и порядка гибридной поляризации m . Показано, что распределение спиральности в фокусе центрально асимметрично, в отличие от ранее изученных пучков с радиальной симметрией [13]. Спиральность не совпадает с интенсивностью, число локальных минимумов интенсивности равно $2m$. Наибольшие значения спиральности достигаются при $n=1$, $m=2$. Результаты расширяют понимание свойств гибридно-поляризованных вихревых пучков и могут применяться в нанофотонике, оптических манипуляциях и передаче информации.

Список использованных источников

1. Kotlyar, V.V. Inhomogeneously polarized light fields: polarization singularity indices derived by analogy with the topological charge / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.D. Zaitsev // Computer Optics. – 2022. – V. 46, № 5. – P. 671–681.
2. Redistributing the energy flow of tightly focused ellipticity-variant vector optical fields / X.-Z. Gao, Y. Pan, G.-L. Zhang, M.-D. Zhao, Z.-C. Ren, C.-G. Tu, Y.-N. Li, H.-T. Wang // Photon. Res. – 2017. – V. 5. – P. 640.
3. Roadmap on spatiotemporal light fields / Y. Shen, Q. Zhan, L.G. Wright, D.N. Christodoulides, F.W. Wise, K. Pang, H. Song, C. Liu, E. Mazur, N. Rotenberg [et al.] // J. Opt. – 2023. – V. 25, № 9. – P. 093001.

4. Focusing a cylindrical vector beam and the Hall effect / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.A. Kovalev, V.D. Zaitsev // *Computer Optics*. – 2024. – V. 48, № 1. – P. 47–52.
5. Kotlyar, V.V. Sharp focusing of on-axis superposition of a high-order cylindrical vector beam and a beam with linear polarization / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, V.D. Zaitsev // *Computer Optics*. – 2023. – T. 47, № 1. – C. 5–15.
6. Hybrid polarization induced transverse energy flow / Y. Lyu, Z. Man, R. Zhao, P. Meng, W. Zhang, X. Ge, S. Fu // *Opt. Commun.* – 2021. – V. 485. – P. 126704.
7. A new type of vector fields with hybrid states of polarization / H.T. Wang, X.L. Wang, Y. Li, J. Chen, C.S. Guo, J. Ding // *Opt. Express*. – 2010. – V. 18. – P. 10786.
8. Lerman, G.M. Generation and tight focusing of hybridly polarized vector beams / G.M. Lerman, L. Stern, U. Levy // *Opt. Express*. – 2010. – V. 18. – P. 27650.
9. Stafeev, S.S. Sharp focusing of a hybridly polarized optical vortex / S.S. Stafeev, V.D. Zaitsev, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2024. – V. 48, № 5. – P. 655–661.
10. Panin, D.N. Inhomogeneous chiral metamaterials: optical wave reflection analysis with regard to the dispersion of material parameters / D.N. Panin, O.V. Osipov // *Computer Optics*. – 2024. – V. 48, № 6. – P. 809–815. 10.18287/2412-6179-CO-1443.
11. Stafeev, S.S. Helicity density of higher-order Poincare beams in tight focus / S.S. Stafeev, V.D. Zaitsev, V.V. Kotlyar // *Opt. Commun.* – 2025. – V. 583. – P. 131803.
12. Richards, B. Electromagnetic Diffraction in Optical Systems. II. Structure of the Image Field in an Aplanatic System / B. Richards, E. Wolf // *Proc R Soc A*. – 1959. – V. 253, № 1274. – P. 358–379.
13. Holmes, B.M. Poincaré Bessel beams: structure and propagation / B.M. Holmes, E.J. Galvez // *J. Opt.* – 2019. – V. 21. – P. 104001. 10.1088/2040-8986/ab3d7d.

STUDY OF ASYMMETRY IN HYBRID POLARIZED BEAMS WITH DIFFERENT POLARIZATION ORDERS

V. D. Zaitsev^{1,2}

¹*Institute of Image Processing Systems, National Research Center "Kurchatov Institute",*

²*Samara University, Samara*

e-mail: zaicev-vlad@yandex.ru

Abstract

In this paper, using the Richards-Wolf formalism, we investigated the helicity of hybrid vector vortex beams, which are beams with various combinations of topological charges and polarization orders. It was shown that the helicity in such beams is centrally symmetric, but asymmetry is observed in the zones with negative and positive helicity density values. The central symmetry is preserved: if an arbitrary straight line is drawn through the center, the curve in this section will be symmetric about zero. Here, the asymmetry is at the level of equilibration of the negative and positive helicity density zones. These zones usually coincide for beams, but not here.

Keywords: optical vortices, hybrid polarization, Richards–Wolf equations, tight focusing of light.