

# Острая фокусировка пучков с циркулярно-радиальной поляризацией

Е.А. Долгова

Самарский национальный исследовательский университет

им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

liza.dolgova2002@mail.ru

**Аннотация** — В данной работе рассмотрена острая фокусировка гибридного векторного пучка, сочетающего в себе свойства цилиндрического векторного пучка высокого порядка с пучком с круговой поляризацией. Показано, что в фокусе образуется распределение интенсивности в виде неравномерного кольца — если порядок пучка равен  $m$ , то в фокусе интенсивность имеет  $2(m + 1)$  локальных максимумов.

**Ключевые слова** — острая фокусировка, гибридная поляризация, интеграл Ричардса-Вольфа.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Большое распространение в настоящее время получило изучение гибридных векторных пучков [1-7] — пучков, в которых периодически меняется не только направление поляризации, но и фаза. При этом может меняться как фаза волнового фронта пучка [1], так и разница фаз между компонентами вектора напряжённости электрического поля в разложении по базису декартовой или цилиндрической системы координат, ось  $z$  которой направлена вдоль оси распространения пучка [2].

В работах, посвящённых моделированию острой фокусировки света в дальней зоне, обычно используются формулы Ричардса-Вольфа [8,9], так как они позволяют вычислить распределение отдельных составляющих вектора напряжённости электрической компоненты светового поля в координатах выходного зрачка.

В данной работе численно показано, что векторный пучок  $m$ -го порядка, сочетающий в себе свойства цилиндрического векторного пучка высокого порядка с пучком с круговой поляризацией, в фокусе образует распределение интенсивности в виде неравномерного кольца — если порядок пучка равен  $m$ , то в фокусе интенсивность имеет  $2(m + 1)$  локальных максимумов.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим фокусировку пучка со смешанной круговой-цилиндрической поляризацией  $m$ -го порядка с вектором Джонса:

$$\begin{aligned} a(\varphi) &= -i \sin(m\varphi) \\ b(\varphi) &= \cos(m\varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi$  — азимутальный угол,  $m$  — порядок пучка. Такое состояние поляризации представляет собой гибридный векторных пучков и пучков с круговой поляризацией. При  $m\varphi = \pi/2$  поляризация линейная, а при  $m\varphi = \pi/4$  — круговая, другие углы соответствуют эллиптической поляризации. Получить такой пучок можно с помощью четвертьволновой и векторной волновых пластинок [10]. Ранее было отмечено, что гибридные пучки вида (1) могут найти свое применение в задачах манипуляции

микрочастицами [10]. Моделирование осуществлялось с помощью формулы Ричардса-Вольфа:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\rho, \psi, z) &= -\frac{if}{\lambda} \int_0^{\theta_0} \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \\ &\times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}(\rho, \psi, z)$  — напряжённость электрического поля в фокусе,  $B(\theta, \varphi)$  — амплитуда электрического поля в выходном зрачке широкоапертурной оптической системы ( $\theta$  — полярный угол,  $\varphi$  — азимутальный),  $T(\theta)$  — функция аподизации линзы,  $f$  — фокусное расстояние,  $k=2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны (в моделировании считалась равной 633 нм),  $\theta_0$  — максимальный полярный угол, определяемый числовой апертурой линзы ( $NA = \sin \theta_0$ ),  $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$  — вектор поляризации, для напряжённости электрического поля имеющий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\theta, \varphi) &= \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} a(\theta, \varphi) + \\ &+ \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} b(\theta, \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a(\theta, \varphi)$  и  $b(\theta, \varphi)$  — функции, описывающие состояние поляризации  $x$ - и  $y$ -компонент напряжённостей фокусируемого пучка (1).

На рис. 1 показаны распределения полной интенсивности  $I$  (а) и её отдельных составляющих  $I_x = |E_x|^2$  (б),  $I_y = |E_y|^2$  (в),  $I_z = |E_z|^2$  (г) в фокальной плоскости при фокусировке плоской волны с гибридной поляризацией с  $m=1$  плоской дифракционной линзой с числовой апертурой  $NA = \sin(\theta_{\max}) = 0,95$ . На рис. 2 и 3 показаны распределения для  $m = 2$  и 5, соответственно.

Моделирование показало, что в фокусе интенсивность имеет  $2(m + 1)$  локальных максимумов, в центре фокального пятна наблюдается нулевая интенсивность. Также видно, что составляющие  $I_x$ ,  $I_y$  имеют  $2m$  локальных максимумов, а  $I_z$  имеют форму кольца и нулевое значение в центре.

Стоит отметить, что при смене знака порядка  $m$ , знак меняется только у функции поляризации для  $x$ -компоненты вектора Джонса, а так как она умножается на мнимую единицу, то получается эквивалент смены направления поляризации (замена  $i$  на  $-i$  или правой на левую поляризацию). Т.е. в тех секторах, где поляризация была круговая, она так и осталась круговой, но со сменой направления по всему профилю пучка, и на интенсивности это никак не сказалось.

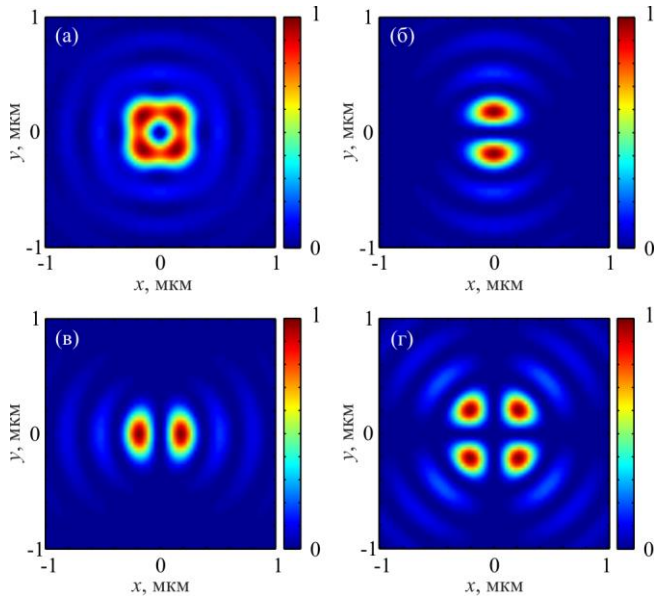


Рис. 1. Распределения а) полной интенсивности  $I$  и её отдельных составляющих б)  $I_x$ , в)  $I_y$ , г)  $I_z$  для порядка  $m = \pm 1$

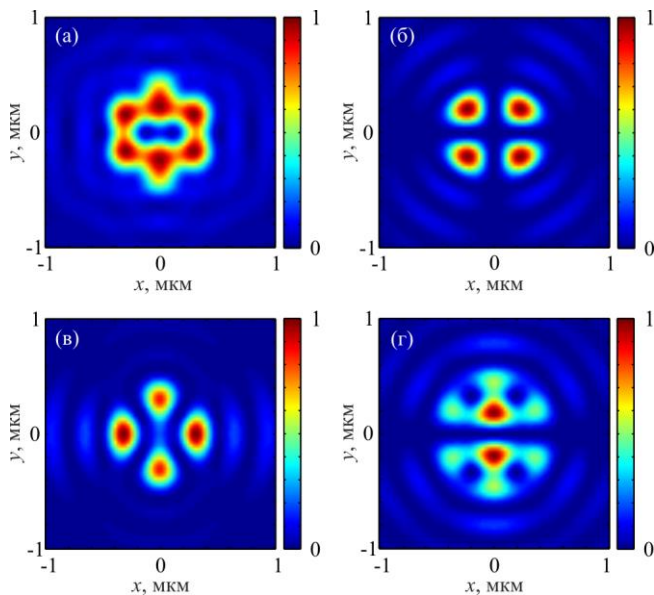


Рис. 2. Распределения а) полной интенсивности  $I$  и её отдельных составляющих б)  $I_x$ , в)  $I_y$ , г)  $I_z$  для порядка  $m = \pm 2$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе с помощью формул Ричардса-Вольфа рассмотрена острая фокусировка гибридного векторного пучка, сочетающего в себе свойства цилиндрического векторного пучка высокого порядка с пучком с круговой поляризацией. Показано, что в фокусе образуется распределение интенсивности в виде неравномерного кольца — если порядок пучка равен  $m$ , то в фокусе интенсивность имеет  $2(m + 1)$  локальных максимумов. При этом распределение интенсивности для отрицательных порядков совпадает с распределением интенсивности для положительных порядков.

Также отмечено, что при отрицательных значениях порядка пучка  $m$ , распределения интенсивности

полностью совпадают с их положительными эквивалентами.

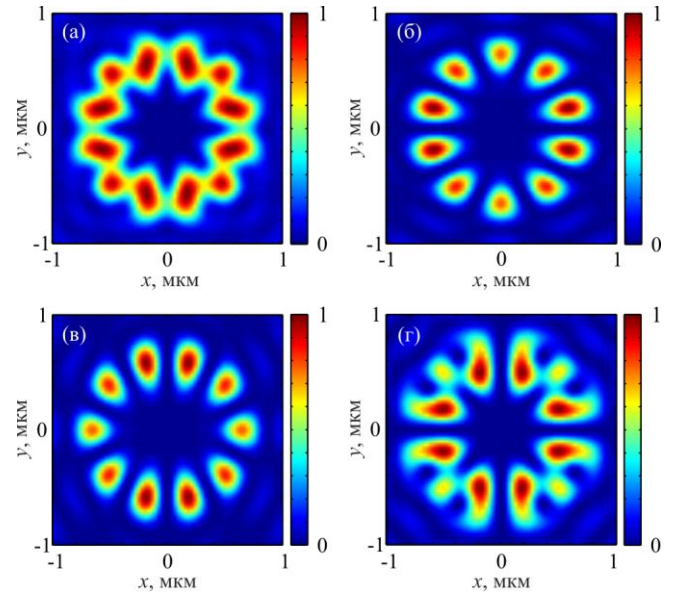


Рис. 3. Распределения а) полной интенсивности  $I$  и её отдельных составляющих б)  $I_x$ , в)  $I_y$ , г)  $I_z$  для порядка  $m = \pm 5$

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 22-12-00137).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] D'Errico, A. Topological features of vector vortex beams perturbed with uniformly polarized light / A. D'Errico, M. Maffei, B. Piccirillo, C. de Lisio, F. Cardano, L. Marrucci // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7(1). – P. 40195.
- [2] Gao, X.-Z. 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 // *Photonics Res.* – 2017. – Vol. 5. – P. 640.
- [3] Wang, X.L. A new type of vector fields with hybrid states of polarization / X.L. Wang, Y.N. Li, J. Chen, C.S. Guo, J.P. Ding, H.T. Wang // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 10786-10795.
- [4] Hu, K. Tight focusing properties of hybridly polarized vector beams / K. Hu, Z. Chen, J. Pu // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29. – P. 1099-1104.
- [5] Lerman, G.M. Generation and tight focusing of hybridly polarized vector beams / G.M. Lerman, L. Stern, U. Levy // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 27650-27657.
- [6] Hu, H. The tight focusing properties of spatial hybrid polarization vector beam / H. Hu, P. Xiao // *Optik*. – 2013. – Vol. 124. – P. 2406-2410.
- [7] Khonina, S.N. Vortex beams with high-order cylindrical polarization: features of focal distributions / S.N. Khonina // *Applied Physics B*. – 2019. – Vol. 125. – 100. – DOI: 10.1007/s00340-019-7212-1.
- [8] Richards, B. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.
- [9] Debay, P. Das Verhalten von Lichtwellen in der Nähe eines Brennpunktes oder einer Brennlinie / P. Debay // *Annalen der Physik*. – 1909. – Vol. 335(14). – P. 755-776.
- [10] Kotlyar, V.V. Spin-Orbital Conversion of a Strongly Focused Light Wave with High-Order Cylindrical-Circular Polarization / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, E.S. Kozlova, A.G. Nalimov // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 6424.