

Исследование векторного гауссова пучка с цилиндрической поляризацией высокого порядка вблизи острого фокуса: спиновый эффект Холла

В.В. Котляр
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН, Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
kotlyar@ipsiras.ru

С.С. Стафеев
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН, Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
sergey.stafeev@gmail.com

А.А. Ковалёв
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН, Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
alanko.ipsi@mail.ru

В.Д. Зайцев
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника»
РАН, Самарский национальный
исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Самара, Россия
zaicev-vlad@yandex.ru

Аннотация— Известно, что у цилиндрического векторного пучка поляризация локально-линейна. В начальной и в фокальной плоскости такие пучки не имеют ни спинового, ни орбитального углового момента. В данной работе показано, что вблизи фокальной плоскости острогофокусированного гауссова пучка с цилиндрической поляризацией высшего порядка формируются области, в которых вектор линейной поляризации вращается, причём в соседних областях он вращается в разные стороны, то есть продольная составляющая векторов спинового углового момента в этих областях имеет противоположный знак. Такое разделение левого и правого вращения векторов поляризации является проявлением оптического спинового эффекта Холла.

Ключевые слова— спиновый эффект Холла, острый фокус, цилиндрический пучок, спиновый угловой момент, формализм Ричардса-Вольфа

1. ВВЕДЕНИЕ

В оптике хорошо известны цилиндрические векторные пучки (ЦВП) [1]. Во многих работах изучалась острая фокусировка ЦВП первого порядка [2], высших порядков [3] и дробного порядка [4]. В начальной плоскости и в фокусе ЦВП поляризация неоднородна и линейна в каждой точке поперечного сечения. На оптической оси в начальной плоскости такие пучки имеют точку поляризационной сингулярности, где направление вектора линейной поляризации [5] не определено. Распределение интенсивности ЦВП n -го порядка в остром фокусе имеет $2(n-1)$ локальных максимумов [5]. Спиновый угловой момент (СУМ) в начальной плоскости равен нулю. Равен нулю также и орбитальный угловой момент (ОУМ) в начальной плоскости и в фокусе.

В данной работе с помощью интегралов Дебая и численного моделирования показано, что вблизи острого фокуса формируются локальные субволновые области с эллиптической и круговой поляризацией разного знака.

2. ТЕОРИЯ

Для цилиндрического векторного пучка n -го порядка вектор Джонса электрического поля равен $E_n(\varphi) = [\cos n\varphi, \sin n\varphi]$, где (r, φ) – полярные координаты. С помощью интегралов Дебая [6], можно получить все декартовы компоненты векторов напряженности электрического поля в остром фокусе:

$$\begin{aligned} E_x(r, \varphi) &= i^{n-1} [\cos(n\varphi)I_{0,n} + \cos((n-2)\varphi)I_{2,n-2}], \\ E_y(r, \varphi) &= i^{n-1} [\sin(n\varphi)I_{0,n} - \sin((n-2)\varphi)I_{2,n-2}], \\ E_z(r, \varphi) &= 2i^n \cos((n-1)\varphi)I_{1,n-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнении (1) функции $I_{\nu,\mu}$ зависят только от радиальной и продольной координат r и z и равны

$$\begin{aligned} I_{\nu,\mu} &= \left(\frac{4\pi f}{\lambda}\right) \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^{3-\nu}\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ &\times \cos^{1/2}(\theta) A(\theta) e^{ikz \cos \theta} J_{\mu}(\xi) d\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число монохроматического света с длиной волны λ , f – фокусное расстояние фокусирующей линзы, z – ось распространения ($z = 0$ – фокальная плоскость), $\xi = kr \sin \theta$, $A(\theta)$ – амплитуда входного поля с цилиндрической симметрией.

Усреднённая по времени продольная составляющая вектора СУМ равна $S_z = 2\text{Im}(E_x^* E_y)$. Если подставить в это выражение поле (1) и учесть комплексность интегралов (2) вблизи фокуса, получим:

$$\begin{aligned} S_z &= \text{Im} \left\{ I_{0,n}^* I_{2,n-2} \sin(n\varphi) \cos((n-2)\varphi) \right\} \\ &- \text{Im} \left\{ I_{0,n}^* I_{2,n-2} \sin((n-2)\varphi) \cos(n\varphi) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

Вблизи фокуса ($kz \ll 1$), СУМ примет вид:

$$S_z \approx 2kz \sin(2(n-1)\varphi)(I_0 R_2 - I_2 R_0), \quad (5)$$

где введены обозначения: $R_0 = I_{0,n}(z=0)$, $I_0 = \bar{I}_{0,n}$,
 $R_2 = I_{2,n-2}(z=0)$, $I_2 = \bar{I}_{2,n-2}$,

$$\bar{I}_{\nu,\mu} = \left(\frac{4\pi f}{\lambda}\right) \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^{3-\nu}\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \cos^{3/2}(\theta) A(\theta) J_\mu(\xi) d\theta, \quad (6)$$

Как видно из (5), в самом фокусе ($z=0$) $S_z = 0$ и потому в каждой точке поляризация линейна. Однако при малых расфокусировках ($kz \ll 1$) $S_z \neq 0$ и появляются области с эллиптической поляризацией, если $n \neq 1$. В областях, где до фокуса ($z < 0$) СУМ был отрицательным ($S_z < 0$), за фокусом ($z > 0$) он становится положительным ($S_z > 0$), и наоборот. Согласно (5), вблизи фокальной плоскости, на окружности определенного радиуса с центром на оси распространения, располагаются центры $4(n-1)$ локальных областей с эллиптической поляризацией. В соседних областях вектор поляризации вращается в противоположных направлениях. Так как при $n \neq 1$ вблизи фокуса цилиндрического векторного пучка появляются пространственно разделённые области с левой и правой круговой поляризацией (области с разным «спином»), можно заключить, что вблизи фокуса (до и после него) возникает спиновый эффект Холла, хотя в самой фокальной плоскости этот эффект исчезает.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование проводилось с помощью (1) и сравнивалось непосредственно с расчётом двойных интегралов Дебая. На рис. 1 показаны распределения интенсивности, радиальной составляющей вектора Пойнтинга, продольных составляющих векторов СУМ и ОУМ острогофокусированного гауссова пучка с цилиндрической поляризацией 3-го порядка ($n=3$) в двух плоскостях – перед фокусом и за фокусом. Для расчёта использовались следующие параметры: длина волны $\lambda = 532$ нм, фокусное расстояние $f = 10$ мкм, числовая апертура $\theta_0 = 0,49\pi$ ($NA = 0,999$), расчётная область 4×4 мкм, продольная координата $z = -\lambda$ и $z = +\lambda$. Входное поле (гауссов пучок) задавалось в виде $A(\theta) = \exp[-(\sin \theta / \sin \alpha_0)^2]$ ($\alpha_0 = \pi/3$).

Несмотря на визуальное сходство распределений СУМ и ОУМ (столбцы 3 и 4 на рис. 1), они вычислялись совершенно по-разному: распределение СУМ вычислялось по формуле (4), а распределение ОУМ рассчитано по следующей формуле:

$$L_z = \text{Im} \left[E_x^* (\partial E_x / \partial \varphi) + E_y^* (\partial E_y / \partial \varphi) + E_z^* (\partial E_z / \partial \varphi) \right]. \quad (7)$$

Тем не менее полученные картины подтверждают, что ОУМ L_z и СУМ S_z компенсируют друг друга и что после прохождения фокальной плоскости вращение вектора поляризации меняет свое направление (то есть продольная составляющая СУМ меняет знак).

Рис. 1 также подтверждает наличие вблизи фокуса $4(n-1) = 8$ областей с разным направлением вращения вектора поляризации (4 тёмные области с левой эллиптической поляризацией и 4 светлые области с правой эллиптической поляризацией). Таким образом, моделирование подтверждает, что области с разным

«спином» вблизи фокуса пространственно разделены, то есть имеет место эффект Холла.

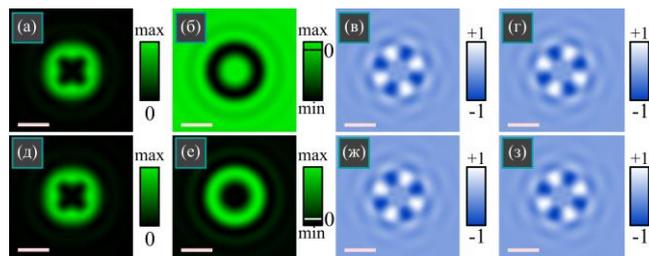


Рис. 1. Распределения интенсивности (столбец 1), радиальной составляющей вектора Пойнтинга (столбец 2), а также нормированных на максимум продольных составляющих векторов СУМ (столбец 3) и ОУМ (столбец 4) острогофокусированного гауссова пучка с цилиндрической поляризацией 3-го порядка перед фокусом (строка 1) и за фокусом (строка 2). На всех распределениях светлый и тёмный цвета означают соответственно максимум и минимум. Метки шкалы (в левом нижнем углу) обозначают 1 мкм

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что вблизи фокальной плоскости цилиндрического векторного пучка n -го порядка возникает $4(n-1)$ локальных области, расположенные на окружности, в которых вектор поляризации вращается в каждой точке, причём в соседних областях он вращается в разные стороны, так что продольная составляющая вектора СУМ меняет знак. Такое разделение левого и правого вращения векторов поляризации указывает на оптический спиновый эффект Холла. Это явление может быть использовано для определения порядка цилиндрического векторного пучка подсчётом областей с левой и правой круговой поляризацией вблизи фокуса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00137).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // Adv. Opt. Photon. – 2009. – Vol. 1. – P. 1–57.
- [2] Youngworth, K.S. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams / K.S. Youngworth, T.G. Brown // Opt. Express. – 2000. – Vol. 7. – P. 77–87.
- [3] Liu, J. Generation of arbitrary cylindrical vector vortex beams with cross-polarized modulation / J. Liu, X. Chen, Y. He, L. Lu, H. Ye, G. Chai, S. Chen, D. Fan // Results in Phys. – 2020. – Vol. 19. – P. 103455.
- [4] Stafeev, S.S. Tight focusing cylindrical vector beams with fractional order / S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, V.D. Zaitsev, V.V. Kotlyar // J. Opt. Soc. Am. B. – 2021. – Vol. 38. – P. 1090–1096.
- [5] Kotlyar, V.V. Tightly focusing vector beams containing V-points polarization singularities / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, S. Rasouli // J. Opt. Las. Techn. – 2022. – Vol. 145. – P. 107479.
- [6] Richards, B. Electromagnetic Diffraction in Optical Systems. II. Structure of the Image Field in an Aplanatic System / B. Richards, E. Wolf // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1959. – Vol. 253. – P. 358–379.