

# Фокусировка цилиндрических векторных пучков с порядком от нуля до единицы и с порядком больше единицы

В.Д. Зайцев<sup>1,2</sup>, С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34а, Самара, Россия, 443086

## Аннотация

С помощью формул Ричардса-Вольфа показано, что при фокусировке векторных пучков с азимутальной поляризацией дробного порядка форма распределения интенсивности в фокусном пятне меняется от эллиптической к круглой и заканчивается кольцевой, в то время как форма распределения продольной компоненты вектора Пойнтинга (потока энергии) в фокусном пятне меняется от круглой к эллиптической и заканчивается кольцевой. Диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен 0,460 от длины волны, а диаметр осевого потока энергии для линейно поляризованного света равен 0,456. При этом обратный поток сохраняется в центре пятна при топологическом заряде пучка в промежутке от 1,55 до 2.

## Ключевые слова

Обратный поток энергии, цилиндрический векторный пучок, формулы Ричардса-Вольфа, острая фокусировка

## 1. Введение

Уникальные свойства, проявляемые цилиндрическими векторными пучками (ЦВП) при острой фокусировке, помогли ЦВП получить в настоящее время широкое распространение. Например, используя цилиндрические векторные пучки, можно сфокусировать излучение в пятно размерами меньше скалярного дифракционного предела [1], оптические иглы [2], световые туннели [3], цепочки фокусов [4].

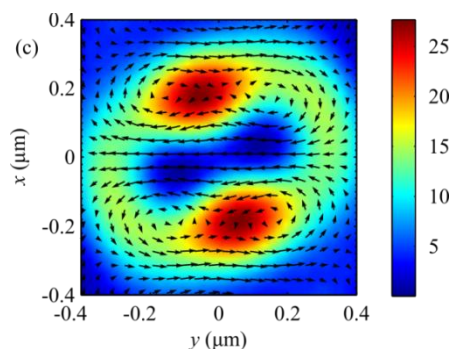
## 2. Моделирование

В данной работе рассмотрена фокусировка пучков с дробным порядком, изменяющимся от нуля до единицы с шагом  $\Delta m = 0,25$ , что образует переход от линейной поляризации к азимутальной. Исследование проводилось путем численного моделирования с помощью самостоятельно написанного программного обеспечения в среде Matlab.

Было показано, что поперечные компоненты вектора Пойнтинга равны нулю при целых значениях порядка пучка, при дробных значениях порядка пучка наблюдается два ярко выраженных центра с координатами  $x=0$  и  $y=\pm 0,1$  мкм, вокруг которых закручен поперечный поток в области фокуса. Вокруг верхнего центра поток вращается по часовой стрелке, а вокруг нижнего – против часовой. Также показано, что наименьшее фокусное пятно наблюдается при фокусировке азимутально-поляризованного оптического вихря. А вот сравнивая значения продольной проекции  $S_z$ , отметим, что наименьшее значение наблюдается для сфокусированного линейно-поляризованного пучка.

При исследовании влияния отклонения порядка пучка от  $m=2$ , выяснилось что, при увеличении порядка пучка больше единицы таких ярко выраженных центров вращения поперечного потока становится больше. Также оказалось, что обратный поток сохраняется в

центре пятна даже при значительном отклонении порядка пучка от  $m=2$  – сохраняется вплоть до  $m=1,55$ . При отклонении порядка пучка  $m$  от целого значения поперечные составляющие вектора Пойнтинга  $S_x$  и  $S_y$  также становятся ненулевыми, хотя при  $m=1$  и  $m=2$  они отсутствовали. Поток энергии в плоскости фокуса превращается из ламинарного в турбулентный. В отличие от дробных  $m \in (0,1)$  выраженных центров вращения поперечного потока становится больше (рис. 1).



**Рисунок 1:** Диаграмма интенсивности  $I$  с направлением вектора Пойнтинга  $S_r$  в фокальной области при фокусировке луча с порядком поляризации  $m = 1,9$

### 3. Заключение

С помощью моделирования острой фокусировки векторных пучков с азимутальной поляризацией дробного порядка  $0 < m < 1$  показано, что форма распределения интенсивности в фокусном пятне меняется от эллиптической к круглой ( $m=0,5$ ) и заканчивается кольцевой. А форма распределения продольной компоненты вектора Пойнтинга (потока энергии) в фокусном пятне меняется по-другому: от круглой к эллиптической и заканчивается кольцевой. Диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен  $0,460$  от длины волны, а диаметр осевого потока энергии для линейно поляризованного света равен  $0,456$ .

Так же было показано, что обратный поток сохраняется в центре пятна даже при значительном отклонении порядка пучка от  $m=2$  – сохраняется вплоть до  $m=1,55$ .

### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595), Российского Фонда Фундаментальных Исследований – грант 18-07-01122, грант 18-07-01380, грант 18-29-20003 и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Введение».

### 5. Литература

- [1] Dorn, R. Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.
- [2] Guan, J. Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus / J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, P. Jin // *Opt. Commun.* – 2017. – Vol. 404. – P. 118-123.
- [3] Zheng, C. Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates / C. Zheng, S. Su, H. Zang, Z. Ji, Y. Tian, S. Chen, K. Mu, L. Wei, Q. Fan, C. Wang, X. Zhu, C. Xie, L. Cao, E. Liang // *Appl. Opt.* – 2018. – Vol. 57. – P. 3802-3807.
- [4] Lin, J. Generation of longitudinally polarized optical chain by  $4\pi$  focusing system / J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma // *Opt. Commun.* – 2015. – Vol. 340. – P. 69-73.