

# Нахождение оптимальных масок в задачах острой фокусировки лазерного излучения с радиальной поляризацией

Д.Ю. Калашников

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
kalashnikov434@mail.ru

**Аннотация**—Работа посвящена исследованию острой фокусировки лазерного излучения с радиальной поляризацией и нахождению оптимальной конфигурации бинарной фазовой маски для получения минимального размера фокусного пятна по полуспаду интенсивности в фокусе апланатического объектива. Моделирование проводилось по формулам Ричардса-Вольфа для радиально-поляризованного света. Оптимизация бинарной фазовой маски проводилась с помощью генетического алгоритма.

**Ключевые слова** — острая фокусировка, радиальная поляризация, суперосцилляции, бинарная фазовая маска, формулы Ричардса-Вольфа

## I. ВВЕДЕНИЕ

Острая фокусировка лазерного излучения – это фокусировка света линзами с высокой числовой апертурой, такая, при которой уже нельзя пренебречь векторной природой световой волны [1]. Большое количество оптических приборов и оптических устройств для работы используют острогофокусированный лазерный луч. Данная технология используется в различных областях применения, например, литография, конфокальная микроскопия, оптическое хранение данных. Так как принцип работы данных технологий часто основывается на использовании излучения с известной поляризацией, то первостепенное значение имеет учет векторной природы сфокусированного пучка. Большая часть лазеров, использующихся в настоящее время, имеют излучение с однородной поляризацией, но при помощи дополнительных внутрирезонаторных или внерезонаторных устройств может быть сформировано множество различных типов неоднородно поляризованных пучков с различными характеристиками [1]. Наиболее привлекательными для изучения являются пучки, которые имеют осевую симметрию всех характеристик излучения, в том числе поляризации – радиально и азимутально поляризованные пучки. Основным методом, с помощью которого анализируют сфокусированные поляризованные пучки, являются интегралы, полученные Ричардсом и Вольфом [2, 3].

В последние годы большое внимание уделялось исследованию теории суперосцилляций. Суперосциллирующие функции – это функции с ограниченным диапазоном частот, обладающие парадоксальным свойством – изменяться быстрее, чем их самая быстрая Фурье составляющая, на сколь угодно длительных интервалах. Математические исследования показывают, что эти функции чрезвычайно малы там, где

они быстро осциллируют. Недавний прогресс в разработке и внедрении суперосциллирующих линз продемонстрировал эффективность и потенциал для повышения пространственного разрешения в световой микроскопии [4, 5].

В данной работе исследуется острая фокусировка радиально-поляризованного лазерного излучения и с помощью генетического алгоритма находится оптимальная конфигурация бинарной фазовой маски для получения минимального размера фокусного пятна по полуспаду интенсивности в фокусе апланатического объектива.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Б. Ричардс и Е. Вольф в 1959 году предложили теорию, которая учитывает поляризационные эффекты в фокальной плоскости для линейно-поляризованного света [2]. Данные уравнения используются для расчета распределения интенсивности лазерного излучения в фокусе объективов, имеющих высокую числовую апертуру.

Интегралы Ричардса-Вольфа для радиально поляризованного света имеют следующий вид:

$$E_r(r, z) = A \int_0^\alpha l(\theta) T(\theta) \sin 2\theta e^{ikz \cos \theta} J_1(kr \sin \theta) d\theta, \quad (1)$$

$$E_z(r, z) = 2iA \int_0^\alpha l(\theta) T(\theta) \sin^2 \theta e^{ikz \cos \theta} J_0(kr \sin \theta) d\theta, \quad (2)$$

где  $l(\theta)$  – начальное распределение напряженности электрического поля в координатах выходного зрачка,  $J_m(x)$  – функция Бесселя порядка  $m$ ,  $T(\theta)$  – функция аподизации зрачка,  $A$  – константа,  $\alpha$  – максимальный угол, определяемый числовой апертурой. Из уравнений (1) и (2) следует, что сфокусированный радиально-поляризованный свет имеет радиально симметричное фокусное пятно.

Для апланатического объектива функция аподизации имеет вид:

$$T(\theta) = \sqrt{\cos \theta}. \quad (3)$$

Для того чтобы получить начальное распределение в координатах выходного зрачка, необходимо воспользоваться соотношением:

$$l(\rho) = l(fg(\theta)), \quad (4)$$

где  $l(\rho)$  – начальное распределение поля в цилиндрической системе координат,  $f$  – фокусное расстояние,  $g(\theta)$  – функция проекции луча, в частности, для апланатического объектива она имеет вид  $g(\theta) = \sin \theta$ .

В данной работе для фокусировки использовалась радиально-поляризованная мода Бесселя-Гаусса. С учетом уравнения (4) распределение напряженности электрического поля пучка Бесселя-Гаусса в координатах выходного зрачка для апланатического объектива будет иметь вид [4]:

$$l(\theta) = e^{-\frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{\sin^2 \alpha}} J_1 \left( 2\gamma \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right), \quad (5)$$

где  $\beta$  – параметр моды, равный отношению радиуса линзы к радиусу пучка,  $\gamma$  – параметр моды Бесселя,  $J_1(x)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка. Использование маски соответствует замене функции распределения амплитуды пучка  $l(\theta)$  Бесселя-Гаусса (5) в интегралах (1), (2) произведением  $l(\theta)K(\theta)$ , где  $K(\theta)$  – функция пропускания, которая задается формулой:

$$K(\theta) = e^{i\varphi(\theta)}. \quad (6)$$

Если положить значение  $\varphi(\theta) = 0$  или  $\varphi(\theta) = \pi$ , то для разных диапазонов углов  $\theta$  это соответствует бинарной маске, состоящей из двух областей с противоположными фазами. Например, пятizonная маска имеет следующий вид:

$$K(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta < \theta_1, & \theta_2 \leq \theta < \theta_3, & \theta_4 \leq \theta < \alpha, \\ -1, & \theta_1 \leq \theta < \theta_2, & \theta_3 \leq \theta < \theta_4, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\theta_i$  – некоторые углы.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Средствами языка программирования Python с помощью использования библиотек NumPy, SciPy была разработана программа для численного моделирования острой фокусировки лазерного излучения с неоднородной поляризацией.

С помощью интегралов Ричардса-Вольфа были рассчитаны компоненты электрического поля для нахождения распределения интенсивности в фокусе апланатического объектива с числовой апертурой 0,95. Результат показан на рис. 1а. Затем были рассчитаны компоненты электрического поля для нахождения распределения интенсивности в фокусе апланатического объектива с числовой апертурой 0,95, дополненного бинарной фазовой маской [4]. С помощью генетического алгоритма были подобраны оптимальные параметры для бинарных масок, состоящих из 108 и 150 зон. Размеры полученных фокусных пятен составили  $\text{FWHM} = 0,36\lambda$  (рис. 1б) и  $\text{FWHM} = 0,32\lambda$  (рис. 1в), соответственно. При использовании 150-зонной маски центральное пятно обладало меньшими размерами, но было окружено большими боковыми пиками.

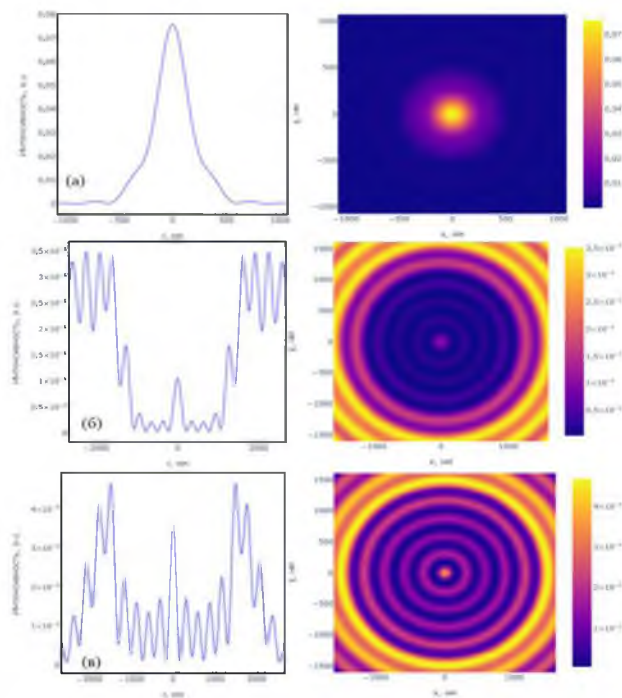


Рис. 1. Распределение интенсивности в фокальной плоскости при фокусировке радиально поляризованной моды R-TEM01 с параметром  $\beta = 1$  (а) и при фокусировке радиально поляризованного пучка Бесселя-Гаусса, прошедшего через бинарную фазовую маску, состоящую из 108 зон (б), 150 зон (в) апланатическим объективом с числовой апертурой равной 0,95.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен метод формирования суперосциллирующих распределений при фокусировке моды с неоднородной поляризацией. Было показано, что при использовании бинарной фазовой маски с большим количеством зон возможно добиться существенного уменьшения размеров фокусного пятна по полуспаду интенсивности. Данный оптический элемент работает подобно поляризационному фильтру, который ослабляет радиальное поле в центре пучка больше, чем продольное поле, таким образом, делая луч в фокальной области продольно поляризованным.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хонина, С. Н. Управление видом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 58–68.
- [2] 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. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1959. – Vol. 253. – P. 358–379.
- [3] Стафеев, С.С. Субволновая фокусировка лазерного излучения смешанной азимутально-линейной поляризации / С.С. Стафеев, А.Г. Наллимов, М.В. Котляр, Л. О'Фарлейн // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 458–466. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-458-466.
- [4] Wang, H. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics / H. Wang, L. Shi, B. Lukyanchuk, C. Sheppard, C.T. Chong // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 501–505.
- [5] Pant, B. Super-oscillatory spots with different inhomogeneous linear polarized states / B. Pant, H.K. Meena, B.K. Singh // Applied Optics. – 2023. – Vol. 62. – P. 9599–9604.