

АНАЛИЗ ОСЕВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ В КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОБОБЩЁННЫХ ЛИНЗ

О.А. Дюкарева¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: dukarevaola@gmail.com

Аннотация

В работе исследовано параксиальное распространение световых пучков, формируемых обобщенными линзами. Установлено, что суперпозиция линз с различной степенной фазовой зависимостью от радиуса позволяет формировать области пониженной интенсивности с возможностью контроля их размеров и осевых границ. Полученные результаты открывают возможности для гибкого управления пространственной структурой пучков.

Ключевые слова: обобщенная линза, фраксикон, аксикон, преобразование Френеля.

Введение

В современной фотонике наблюдается устойчивый рост интереса к обобщённым оптическим элементам [1, 2], позволяющим сочетать уникальные возможности формирования световых полей с технологической простотой реализации. Особое значение эти элементы приобретают в задачах управления пространственной структурой лазерного излучения, микроманипуляции, оптической когерентной томографии, прецизионной фокусировке, поляризационных преобразованиях, увеличении глубины резкости и метрологии [3, 4].

Параболические линзы, характеризующиеся высоким градиентом интенсивности, востребованы в задачах лазерной абляции и прецизионного сканирования микрообъектов [5]. Перспективным направлением является разработка гибридных структур, объединяющих функциональные возможности аксиконов и традиционных линз, что расширяет возможности управления пространственной структурой световых полей.

1. Моделирование

Для моделирования параксиального распространения пучков в свободном пространстве используется преобразование Френеля. Оптический элемент с комплексной функцией пропускания $f(r) = \exp(-i(kar)^q)$ ограничен радиусом линзы $R=3$ мм, где $k=2\pi/\lambda$ – волновое число излучения с длиной волны $\lambda=532$ нм.

Для линз с кубической фазовой зависимостью от радиуса ($q=3$) характерно увеличение поперечного размера центрального пятна с ростом расстояния от оптического элемента. В отличие от классических линз ($q=2$), они имеют резко возрастающую интенсивность и протяженное фокальное пятно на оси, при этом интенсивность спадает неравномерно.

Обобщенная линза с дробной степенной фазовой зависимостью от радиуса (например, суперлинейный фраксикон $q=1,5$) имеет схожий, но зеркальный паттерн распространения – интенсивность плавно нарастает до максимума, после чего резко падает до минимального значения. Поперечный размер центрального пятна уменьшается с ростом расстояния. Учитывая эти свойства, рассмотрим совокупность оптических элементов с разными q , комплексная функция пропускания которой записывается как:

$$f(r) = \sum_{n=1}^N c_n \exp(-i(k\alpha_n r)^{q_n}) \quad (1)$$

Продольное распространение пучка (1) представлено на рисунке 1. Вариация q позволяет получить промежуток низкой интенсивности между максимумами. Его протяженность зависит от параметра обобщенной линзы α и от дробной степени q (когда $1 < q < 2$). При смещении осевых максимумов ближе друг к другу значительную роль играет интерференция в области пересечения, поэтому в параксиальном случае протяженность такого промежутка заметно превосходит размеры самого оптического элемента. Для пучка (1) характерна острая фокусировка на оси. Существенное отличие между обобщенными линзами можно заметить в распределениях линий каустик. При $q=3$ она сильнее сходится к оптической оси.

Интересным свойством пучка (1) является наличие «отвесных стенок», ограничивающих осевую энергию. Несмотря на то, что поперечная энергия невелика, центральная область ограничена серией колец интенсивности, образованных совокупным действием отдельных элементов комбинированной обобщенной линзы. Энергетический вклад каждой отдельной обобщенной линзы может быть изменен с помощью вариации c_n .

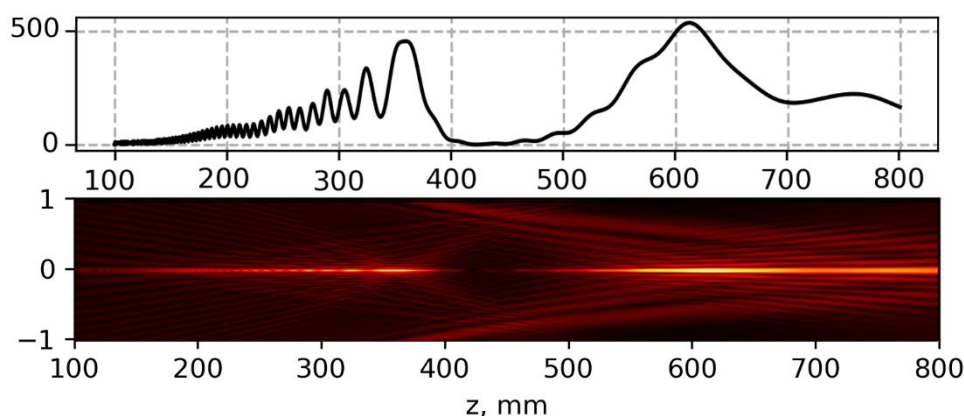


Рисунок 1 – Осевая интенсивность и продольное распространение амплитуды пучка (1) при $q_1=3$, $q_2=1,5$; $\alpha_1=0,000115$, $\alpha_2=0,0009$; $c_1=2$, $c_2=1$

Заключение

Проведено моделирование распространения пучков для оптических элементов с обобщенной степенной фазовой зависимостью. Показано, что параметр q определяет структуру картины интенсивности. Суперпозиция линз с различными q позволяет формировать области пониженной интенсивности между максимумами, протяженность которых определяется параметрами системы. Рассмотренные пучки характеризуются

острой фокусировкой, особенностями каустик и наличием «отвесных» границ интенсивности.

Полученные результаты демонстрируют возможность гибкого управления пространственным распределением энергии и перспективны для задач прецизионной лазерной обработки, оптического манипулирования и других приложений.

Список использованных источников

1. Ustinov, A. V. Generalized lens: calculation of distribution on the optical axis / A. V. Ustinov, S. N. Khonina // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37, № 3. – P. 307–315.
2. Application of vortex beams to 3D transform intensity distributions generated by binary generalized axicons / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, O.A. Dyukareva, A.P. Porfirev // *Applied Physics B*. – 2025. – V. 131, № 238. – P. 238.
3. Systems of generalized harmonic lenses for image formation / R. V. Skidanov, S. V. Ganchevskaya, V. S. Vasil'ev, V. A. Blank // *Journal of Optical Technology*. – 2022. – V. 89, № 3. – P. 132–136.
4. Combinations of generalized lenses that satisfy the edge-imaging condition of transformation optics / T. Tyc, J. Bělin, S. Oxburgh, C. D. White, E. N. Cowie, J. Courtial // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2020. – V. 37. – P. 305–315.
5. Parabolic refractive X-ray lenses / B. Lengeler, C. G. Schroer, B. Benner, A. Gerhardus, T. F. Günzler, M. Kuhlmann, J. Meyer, C. Zimprich // *J. Synchrotron Radiat*. – 2002. – V. 9, № 3. – P. 119–124.

ANALYSIS OF AXIAL INTENSITY DISTRIBUTION IN COMBINED SYSTEMS OF GENERALIZED LENSES

O.A. Dyukareva¹

*¹Samara University, Samara
e-mail: dukarevaola@gmail.com*

Abstract

This study examines the paraxial propagation of light beams generated by generalized lenses. It demonstrates that the superposition of lenses with different power-law phase dependence on radius enables the creation of low-intensity regions with precisely controllable sizes and axial boundaries. These findings provide new opportunities for flexible shaping and manipulation of the spatial structure of optical beams.

Keywords: generalized lens, fraxicon, axicon, Fresnel transformation.