

АНАЛИЗ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОАПЕРТУРНОЙ ЛИНЗЫ С НЕБОЛЬШИМ АСТИГМАТИЧЕСКИМ ИСКАЖЕНИЕМ

Зотеева О.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

Проведено численное исследование распределения интенсивности на оптической оси, формируемого линзой с высокой числовой апертурой. Показано, что в ближней зоне дифракции формируется световое пятно, размер которого меньше фокального. При этом часть энергии из центральной области уходит в боковые лепестки. Внесение небольшого астигматизма приводит к незначительному увеличению диаметра центрального светового пятна, не оказывая существенного влияния на общую картину распределения.

Ключевые слова: линза с высокой числовой апертурой, размер светового пятна, астигматизм.

В последнее время появляется множество работ, посвящённых уменьшению поперечного размера фокального пятна высокоапертурной фокусирующей системы [1–4]. В работе [5] было исследовано влияние дополнительной цилиндрической линзы на размеры фокального пятна при наличии в системы сферической линзы и показана возможность уменьшения поперечного размера пятна в такой оптической системе. В работе [6] показана возможность уменьшения фокального пятна в высокоапертурных фокусирующих системах путём введения пропускающих функций, соответствующих волновым aberrациям, в виде функций Цернике.

В данной работе проведено исследование влияния внесённого астигматизма на фокусирующие свойства линзы с высокой числовой апертурой.

Непараксиальная скалярная модель, основанная на теории Рэлея-Зоммерфельда, позволяет получать согласующиеся с экспериментами результаты на очень близких расстояниях от апертуры. В скалярной теории дифракции распределение электрического поля света в точке (x, y, z) задаётся выражением Рэлея-Зоммерфельда:

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \int \int_{-\infty}^{+\infty} E(x', y', 0) \frac{e^{ikr}}{r} \cos \theta dx' dy', \quad (1)$$

где $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}$, $\cos \theta = z/r$ – косинус угла между направлениями z и r . Аналитическое выражение для этого интеграла известно только для нескольких типов распределений, поэтому он вычисляется обычно численными методами.

В данной работе проводилось вычисление интеграла Рэлея-Зоммерфельда (1) для линзы, которая описывается следующей функцией пропускания:

$$t(x, y) = \exp\left(-ik \frac{(x^2 + y^2)}{2f}\right). \quad (2)$$

Скалярная величина в данном случае соответствует поперечным компонентам электрического поля

при линейной поляризации, или продольной компоненте при радиальной поляризации.

Параметры моделируемой системы: радиус линзы $R = 5$ мкм, фокусное расстояние $f = 2,4$ мкм, длина волны $\lambda = 1$ мкм, число отсчётов в поперечном сечении было равно 701 отсчётам, в продольном – 501 отсчётам.

Числовая апертура рассчитывалась по формуле

$$NA = \sin\left(\arctg \frac{R}{f}\right) \quad (3)$$

и была равна 0,9.

На рис. 1. приведены результаты моделирования. Размер светового пятна определялся по уровню полуспада интенсивности (FWHM). Как видно из результатов, размер светового пятна может быть меньше фокального в области затухающих волн (на расстоянии менее длины волны от линзы). Например, на расстоянии $z = 0,7\lambda$ световое пятно имеет боковые лепестки менее 25% и FWHM = 0,454 λ .

Определённый практический интерес вызывает случай внесения астигматизма. Математически это выражается в умножении комплексной функции пропускания линзы на $\exp(i\alpha xy)$, где α – искажающий астигматический коэффициент. Результаты моделирования при наличии небольшого астигматизма ($\alpha = 0,2$) приведены на рис. 2.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что внесение астигматизма путём добавления фазового искажения $\exp(i\alpha xy)$ не позволяет уменьшить поперечный размер фокального пятна, как это достигается в [5] за счёт дополнительной цилиндрической линзы. Даже наоборот, внесение такого астигматизма приводит к незначительному увеличению диаметра центрального светового пятна, но при этом общая картина распределения практически не меняется, что может быть важным при оценке допусков на юстировку оптических систем.

В дальнейшем планируется рассмотреть случаи более существенного астигматического искажения и других aberrаций с учётом векторного характера электромагнитного излучения.

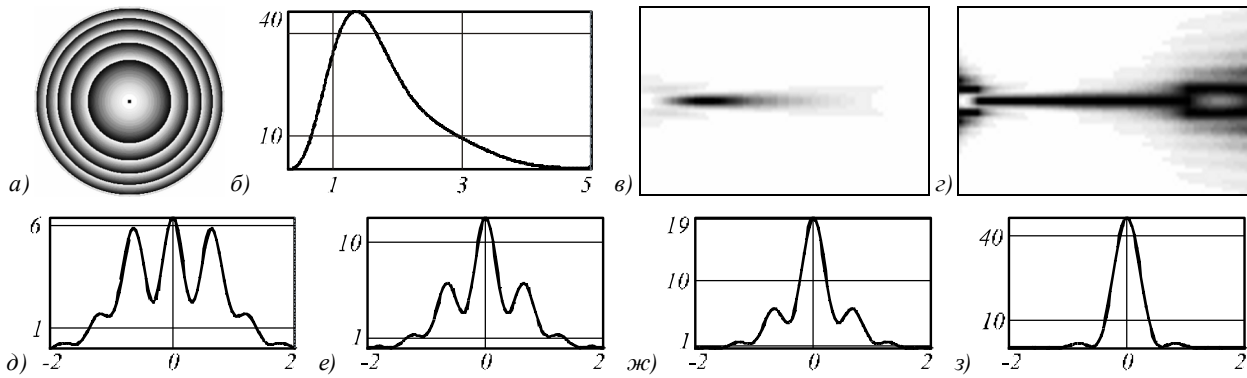


Рис. 1. Результаты моделирования для линзы: фаза входного распределения (а), график распределения вдоль оси Z (б), интенсивность и топология продольного распространения (в)–(з), а также графики поперечного сечения интенсивности при $z = 0,6\lambda$ ($FWHM = 0,437\lambda$) (д), $z = 0,7\lambda$ ($FWHM = 0,454\lambda$) (е), $z = 0,8\lambda$ ($FWHM = 0,464\lambda$) (ж), $z = 1,36\lambda$ ($FWHM = 0,51\lambda$) (з)

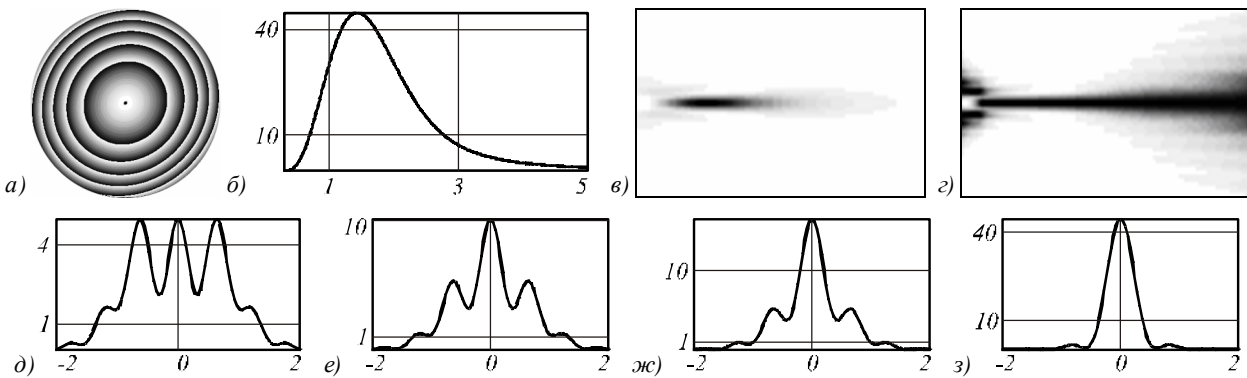


Рис. 2. Результаты моделирования для линзы с астигматизмом ($\alpha = 0,2$): фаза входного распределения (а), график распределения вдоль оси Z (б), интенсивность и топология продольного распространения (в)–(з), а также графики поперечного сечения интенсивности при $z = 0,6\lambda$ ($FWHM = 0,469\lambda$) (д), $z = 0,7\lambda$ ($FWHM = 0,471\lambda$) (е), $z = 0,8\lambda$ ($FWHM = 0,477\lambda$) (ж), $z = 1,36\lambda$ ($FWHM = 0,52\lambda$) (з)

Литература

1. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot / S. Quabis // Opt. Commun. – 2000. – V. 179. – P. 1-7.
2. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91. – P. 233901.
3. **Sheppard, Colin J.R.** Annular pupils, radial polarization, and superresolution / Colin J.R. Sheppard // Appl. Opt. – 2004. – V. 43(22). – P. 4322-4327.
4. **Хонина, С.Н.** Исследование применения акси-конов в высокоапертурной фокусирующей системе / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 35-51.
5. **Huang, B.** Three-Dimensional Super-Resolution Imaging by Stochastic Optical Reconstruction Microscopy / B. Huang, W. Wang, M. Bates, X. Zhuang // Science. – 2008. – Vol. 319. – P. 810-813.
6. **Хонина, С.Н.** Анализ влияния волновых aberrаций на уменьшение размеров фокального пятна в высокоапертурных фокусирующих системах / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Е.А. Пелевина // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 203-219.

References

1. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot / S. Quabis // Opt. Commun. – 2000. – V. 179. – P. 1-7.
2. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91. – P. 233901.
3. **Sheppard, Colin J.R.** Annular pupils, radial polarization, and superresolution / Colin J.R. Sheppard // Appl. Opt. – 2004. – V. 43(22). – P. 4322-4327.
4. **Khonina, S.N.** Investigation of axicon application in high-aperture focusing system / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Computer optics. – 2010. – Vol. 34, N 1. – P. 35-51. – (In Russian).
5. **Huang, B.** Three-Dimensional Super-Resolution Imaging by Stochastic Optical Reconstruction Microscopy / B. Huang, W. Wang, M. Bates, X. Zhuang // Science. – 2008. – Vol. 319. – P. 810-813.
6. **Khonina, S.N.** Analysis of wave aberration influence on reducing focal spot size in a high-aperture focusing system / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, E.A. Pevina // Computer optics. – 2011. – Vol. 35, N 2. – P. 203-219. – (In Russian).

**ANALYSIS OF THE FOCUSING PROPERTIES OF HIGH-APERTURE LENS
WITH SMALL ASTIGMATIC DISTORTION***O.V. Zoteeva**S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)***Abstract**

A numerical study of the intensity distribution on the optical axis, which is formed by a lens with high numerical aperture, is carried out. It is shown that a light spot with smaller size than the focal spot is formed in near-field domain. In this case the energy goes from the central region into the lateral lobes. Inserting a small astigmatism did not significantly affect the distribution pattern.

Key words: lens with high numerical aperture, light spot size, astigmatism.

Сведения об авторе

Зотеева Ольга Владимировна, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: оптическая и цифровая обработка изображений, дифракционная оптика, математическое моделирование, лазерное манипулирование.

E-mail: zoteeva_o@mail.ru.

Zoteeva Olga Vladimirovna, post-graduate student of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: optical and digital image processing, diffractive optics, mathematical modeling, laser manipulation.