

МАКСИМИЗАЦИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКЕ ДИФРАКЦИОННЫМ АКСИКОНОМ

Савельев Д.А.

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

Аннотация

Проведено моделирование дифракции линейно-поляризованных гауссовых мод на бинарном дифракционном аксиконе с высокой числовой апертурой методом FDTD. Показана возможность увеличения продольной электрической компоненты электромагнитного поля в фокусе за счёт использования высших гауссовых мод.

Ключевые слова: гауссовы моды, дифракционный аксикон, FDTD, Меер.

Из скалярной теории дифракции известно, что аксикон формирует бесселевский пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности (FWHM) равен [1]:

$$\text{FWHM} = 0,36\lambda/NA, \quad (1)$$

где NA – числовая апертура аксикона.

Это на 30% меньше, чем диаметр диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой ($\text{FWHM} = 0,51\lambda/NA$). Т.о. вполне естественно использование аксикона в оптических изображающих системах [2].

В работе [3] было рассмотрено применение радиальной поляризации для формирования светового пятна, состоящего в основном из одной продольной компоненты, которое позволило достичь предсказанное скалярной теорией сверхразрешение по сравнению с линзой [1]. Т.о., при использовании материалов, чувствительных только к продольной компоненте [4], данное направление исследований представляется перспективным.

В данной работе рассматривается бинарный дифракционный микроаксикон с числовой апертурой $NA = \alpha_0 = 0,95$:

$$\tau_b(r) = \begin{cases} \exp\{i \arg[\cos(k\alpha_0 r)]\}, & r \leq R, \\ 0, & r > R, \end{cases} \quad (2)$$

с радиусом $R = 4,25\lambda$, освещённый гауссовым пучком с линейной поляризацией. Внешний вид аксикона представлен на рис. 1



Рис. 1. Структура бинарного дифракционного аксикона

Для моделирования распространения мод Гаусса-Эрмита в работе использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD). Для реализации данного метода используется пакет “Меер”, который моделирует распространение электромаг-

нитного поля через различные структуры с использованием уравнений Максвелла [5].

Длина волны $\lambda = 0,532$ мкм. Размер расчётной области $x, y \in [-6,5\lambda; 6,5\lambda]$, $z \in [-6\lambda; 6\lambda]$. Толщина поглощающего слоя PML – 2λ , шаг дискретизации по пространству – $\lambda/30$, шаг дискретизации по времени – $\lambda/(60c)$, где c – скорость света. Ширина подложки равна 8λ . Показатель преломления аксикона и подложки, в которой выполнен бинарный рельеф вида (2), равен $n = 1,46$. Для него и данной длины волны высота микрорельефа составляет:

$$h = \frac{\pi}{k(n-1)} \approx 1,087\lambda. \quad (1)$$

Для получения усреднённых по времени картин интенсивности было проведено исследование выбора оптимального времени моделирования. Тактом мы будем называть временной период, соответствующий длине волны. Были рассмотрены временные диапазоны 30, 50 и 70 тактов (рис. 2). Т.к. результаты для 30 и 70 тактов совпали, то был выбран временной диапазон моделирования 30 тактов.

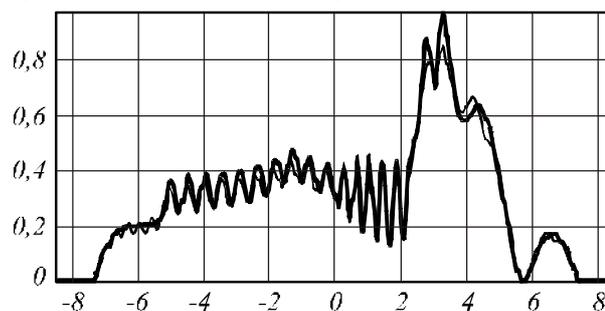


Рис. 2. График распределения интенсивности вдоль оси распространения для Гауссова пучка: 30 тактов (тонкая линия), 50 тактов (толстая линия), 70 тактов (пунктирная линия)

Результаты исследований приведены в табл. 1. Преодоление дифракционного предела (для диска Эйри) получено в следующих случаях: при освещении Гауссовым пучком в общей интенсивности в направлении, перпендикулярном поляризации ($\text{FWHM} = 0,44\lambda$), при освещении модой Гаусса-Эрмита (1, 0) в продольной компоненте вдоль оси поляризации ($\text{FWHM} = 0,43\lambda$).

Таблица 1. Сравнение двух типов входных пучков

	Мода Гаусса – Эрмита (0,0)	Мода Гаусса – Эрмита (1,0)
Входной пучок		
Распространение в плоскости		
Осевое распределение		
Распределение в плоскости максимальной интенсивности	$ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$	$ E_x ^2 + E_y ^2 + E_z ^2$
	$ E_z ^2$	$ E_z ^2$
	X: $FWHM_{all}^x = 0,44\lambda$, $FWHM_z^x = 0,57\lambda$	X: $FWHM_{all}^x = 0,76\lambda$, $FWHM_z^x = 0,73\lambda$
	Y: $FWHM_{all}^y = 0,86\lambda$	Y: $FWHM_{all}^y = 1,49\lambda$, $FWHM_z^y = 0,43\lambda$
	<i>тонкая линия – общая интенсивность, толстая линия – компонента z</i>	

Как видно из результатов, приведённых в табл. 1, использование моды Гаусса–Эрмита (1, 0) позволяет увеличить вклад продольной компоненты электромагнитного поля в фокусе, что соответствует результатам, полученным в [6]. Максимизация продольной компоненты может быть использована при оптическом манипулировании для ориентации молекул.

Литература

1. **Kalosha, V.P.** Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha, I. Golub // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32. – P. 3540-3542.
2. **Котляр, В.В.** Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксионов / В.В. Котляр, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика.* – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 52-60.
3. **Хонина, С.Н.** Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Вологовский, М.А. Ананьин // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2010. – № 12(3). – С. 15-25.
4. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, N 6. – P. 2203-2210.
5. **Oskooi, A.F.** Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson // *Computer Physics Communications.* – 2010. – Vol. 181. – P. 687-702.
6. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – Vol. 27, N 10. – P. 2188-2197.

References

1. **Kalosha, V.P.** Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha, I. Golub // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32. – P. 3540-3542.
2. **Kotlyar, V.V.** Simulation of sharp-focusing radially polarized laser mode with a conical and binary microaxicons / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeyev // *Computer Optics.* – 2009. – V. 33, N 1. – P. 52-60. – (In Russian).
3. **Khonina, S.N.** Algorithms for fast calculation of diffraction radial vortex laser fields on the micro-aperture / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy, M.A. Ananin // *Proceedings of Samara Scientific Center of RAS.* – 2010. – N 12(3). – P. 15-25. – (In Russian).
4. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, N 6. – P. 2203-2210.
5. **Oskooi, A.F.** Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson // *Computer Physics Communications.* – 2010. – Vol. 181. – P. 687-702.
6. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – Vol. 27, N 10. – P. 2188-2197.

MAXIMIZING LONGITUDINAL ELECTRIC COMPONENT OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD BY TIGHTLY FOCUSING USING DIFFRACTION AXICON

D. A. Savelyev

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Simulation diffraction of linearly polarized Gaussian modes on binary diffractive axicon with high numerical aperture by method FDTD is realized. It is shown the possibility of amplification of the longitudinal electric component of the electromagnetic field at the focus through the use of higher Gaussian modes.

Key words: gaussian modes, diffractive axicon, FDTD, Meep.

Сведения об авторе



Савельев Дмитрий Андреевич, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: оптическая и цифровая обработка изображений, дифракционная оптика, сингулярная оптика.

E-mail: dmitrey.savelyev@yandex.ru

Savelyev Dmitry Andreevich, post-graduate student of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: optical and digital image processing, diffractive optics, singular optics.