

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УГЛА РАСКРЫВА НА ФОКУСИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ МИКРОАКСИКОНА

© 2012 С.А. Дегтярев

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

Поступила в редакцию 22.05.2012

С помощью разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) была исследована зависимость интенсивности и размера фокального пятна от угла раскрыва конического микроаксикона. Показана возможность получения острой фокусировки линейно-поляризованного лазерного пучка с вихревой фазовой структурой.

Ключевые слова: острая фокусировка, микроаксикон, линейная поляризация, вихревой пучок, преодоление дифракционного предела

Известно, что аксикон формирует бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности равен $\text{FWHM} = 0.36\lambda$ [1, 2], что на 30% меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой. Т.о. вполне естественно использование аксикона в сверхразрешающих изображающих системах и для уплотнённой записи данных [3-5].

Однако при линейной поляризации излучения (которое производится большинством лазеров), освещающего аксикон, достижению сверхразрешения в суммарной интенсивности электромагнитного поля препятствует вклад продольной компоненты, усиливающийся при увеличении числовой апертуры и уширяющий поперечный размер светового пятна вдоль оси поляризации, поэтому во многих работах рассматривается радиально-поляризованный падающий пучок. При радиальной поляризации высокоапертурный аксикон формирует световое пятно, состоящее в основном из одной продольной компоненты, и позволяет достичь предсказанное скалярной теорией сверхразрешение по сравнению с линзой [3-7]. Данная ситуация особенно полезна при использовании материалов, чувствительных только к продольной компоненте [8].

В работах [9-12] было показано, что для линейно-поляризованного излучения, падающего на бинарный аксикон с высокой числовой апертурой, можно уменьшить размер центрального светового пятна вдоль линии поляризации с помощью линейного фазового скачка, перпендикулярного оси поляризации, или введения вихревой фазы.

Этот эффект был обнаружен для дифракци-

онного аксикона в приближении тонкого оптического элемента.

В данной работе рассматривался рефракционный микроаксикон, который может быть изготовлен, например, выращиванием в резисте. Для получения острой фокусировки было предложено использовать линейно-поляризованный лазерный пучок с вихревой фазовой зависимостью. Пучки такого вида можно получить с помощью вихревой фазовой пластинки, в отличие от радиально-поляризованных пучков, которые формируются сложной оптической схемой [13].

Численное моделирование осуществлялось с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) [14]. Авторами была получена зависимость размеров фокального пятна от угла раскрыва микроаксикона для Гауссова пучка, а также для лазерного пучка с вихревой структурой фазы.

1. ФОКУСИРОВКА ГАУССОВА ПУЧКА

Рассмотрим конический микроаксикон (рис. 1) с показателем преломления $n = 1.5$ радиусом $R = 3 \text{ мкм}$ в основании, размещенный в свободном пространстве.

При распространении лазерного пучка от основания к вершине за счёт внутреннего отражения от стенок аксикона происходит концентрация излучения возле оси симметрии элемента. Таким образом на острие аксикона происходит фокусировка введенного излучения.

Для моделирования процесса использовался пакет FullWAVE RSoft, реализующий разностное решение уравнений Максвелла в пространственно-временной области (FDTD – метод). Дискретизация по пространственным переменным выполнялась с шагом $\lambda/20$, по времени –

*Дегтярев Сергей Александрович, студент.
E-mail: sealek@gmail.com.*

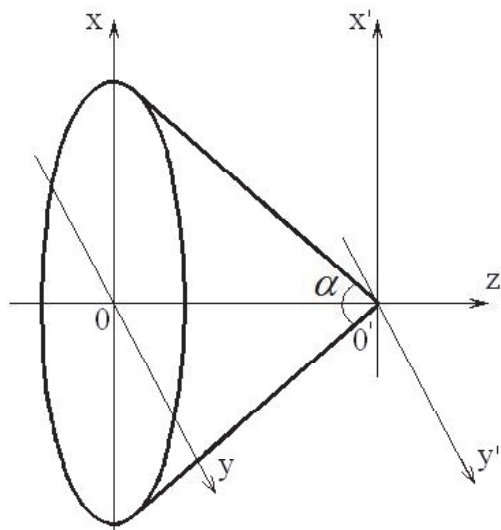


Рис. 1. Микроаксикон в Декартовой системе координат

$\lambda/(100c)$, где $\lambda = 1 \text{ мкм}$ – длина волны лазерного излучения, c – скорость света.

Для оценки фокусирующих свойств аксикона с различным углом раскрыва рассмотрим фокусировку гауссового пучка аксиконами с различными углами раскрыва. В качестве начального распределения электрического поля берется линейно-поляризованная вдоль оси x фундаментальная мода Гаусса (1):

$$E_x(r, \varphi, z=0, t=0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где (r, φ) – полярные координаты в плоскости $z=0, t=0$ (непосредственно в плоскости основания аксикона); A – нормирующий множитель; $\sigma = 1.5 \text{ мкм}$ – радиус перетяжки гауссовского пучка.

На рис. 2 приведено распределение интенсивности излучения в продольном сечении аксикона с высотой 2 мкм (угол раскрыва равен $112,62^\circ$).

На рис. 3 приведено распределение интенсивности в фокальном пятне, полученном при фокусировке моды Гаусса (1) микроаксиконом с углом раскрыва в $88,12^\circ$.

На рис. 3 видно, что фокальное пятно вытягивается вдоль оси x (оси поляризации), и разделяется на две части. В центре фокального пятна наблюдается провал интенсивности. Это связано с возрастанием z -компоненты колебаний напряженности электрического поля на краях фокального пятна.

Покажем в табл. 1 зависимость ширины фокального пятна FWHM от угла раскрыва аксикона. Диаметр основания аксикона равен 6 мкм. Также в табл. 1 приведена числовая апертура аксикона NA , рассчитанная по формуле (2) [15]:

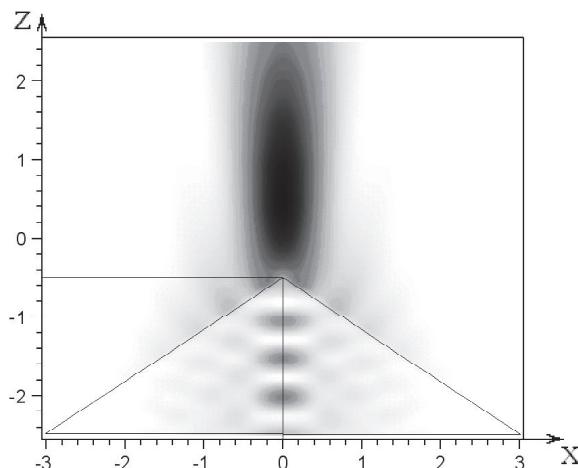


Рис. 2. Интенсивность излучения (негатив) в продольном сечении аксикона

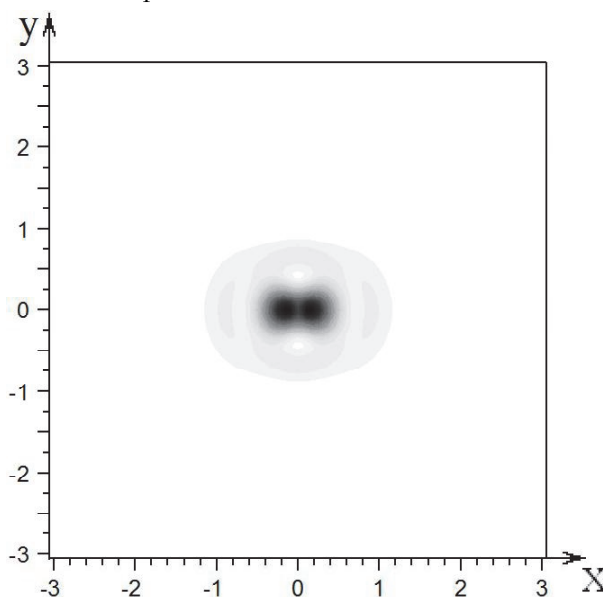


Рис. 3. Интенсивность излучения (негатив) на выходе из аксикона

$$NA = \frac{(h/R) \left(n - \sqrt{1 + (1 - n^2)(h/R)^2} \right)}{1 + (h/R)^2}. \quad (2)$$

Известно [15], что числовая апертура рассматриваемого аксикона не может превосходить числа 0,75. Максимальное значение числовой апертуры достигается при угле раскрыва аксикона в $96,38^\circ$. Если угол раскрыва аксикона меньше, чем $96,38^\circ$, то будет иметь место полное внутреннее отражение входных лучей от боковых стенок аксикона. Согласно дифракционной теории распространения света, после полного внутреннего отражения из боковой стенки аксикона будут выходить только затухающие волны. Для углов раскрыва, меньших $96,38^\circ$, числовая апертура теряет свой изначальный физический смысл и является комплексным числом.

Таблица 1. Зависимость интенсивности в центре фокального пятна, а также размеров пятна от угла раскрыва аксикона при фокусировке моды Гаусса (1)

Высота аксикона h , мкм	Угол раскрыва α , градусы	Числовая апертура NA	Интенсивность в центре I , условные единицы	FWHM _x , мкм	FWHM _y , мкм
2	112,62	0,385	865	0,857	0,627
2,2	107,49	0,442	954	0,772	0,605
2,3	105,05	0,476	982	0,762	0,598
2,4	102,68	0,514	997	0,756	0,591
2,5	100,39	0,56	1005	0,751	0,586
2,6	98,17	0,62	1018	0,764	0,581
2,7	96,03	0,746-0,056i	1065	0,784	0,043
2,8	93,95	0,748-0,149i	1084	0,77	0,043
2,9	91,94	0,749-0,2i	1084	0,765	0,426
3	90	0,75-0,25i	1126	0,766	0,42
3,1	88,12	0,749-0,29i	1175	0,76	0,422
3,2	86,30	0,748-0,324i	1145	0,74	0,4
3,3	84,54	0,747-0,356i	1102	0,742	0,415

Из табл. 1 видно, что максимальная интенсивность в фокальном пятне достигается при угле раскрыва аксикона, равном $88,12^\circ$. При этом линейный размер фокального пятна вдоль оси поляризации значительно превышает дифракционный предел.

2. ФОКУСИРОВКА ВИХРЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Рассмотрим фокусировку вихревого пучка вида (3) микроаксиконом.

$$E_x(r, \varphi, z=0, t=0) = Ar \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \exp(i\varphi). \quad (3)$$

Именно такой вид пучка выбран исходя из следующих соображений. В фундаментальную Гауссову моду легко внести фазовую зависимость $\exp(i\varphi)$ с помощью вихревой фазовой пластинки. При этом получим начальное распределение $\exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \exp(i\varphi)$, у которого в точке

сингулярности фазы имеется ненулевая амплитуда, что не только затрудняет вычисления, но и невозможно с точки зрения физики. Умножение на радиус пучка, r , обнуляет амплитуду в точке сингулярности фазы. На практике обнуление области сингулярности можно выполнить блокировкой излучения в центральной части.

На рис. 4 приведено распределение интенсивности в фокальном пятне, полученном при фокусировке вихревого пучка (2) микроаксиконом с углом раскрыва в $93,95^\circ$.

На рис. 4 видно, что фокальное пятно имеет самую высокую интенсивность в середине. Тем

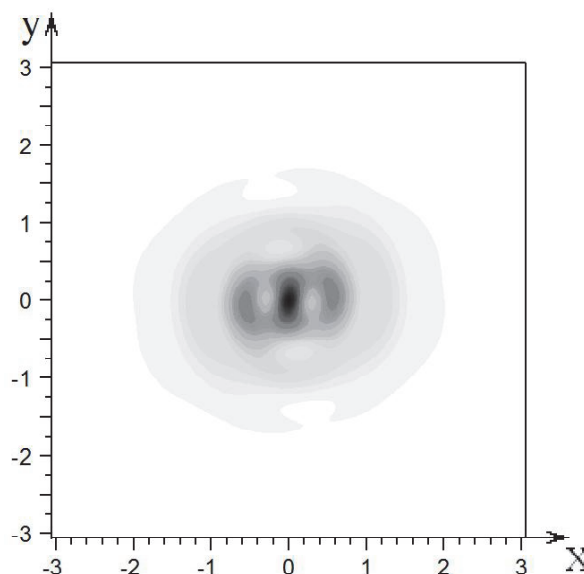


Рис. 4. Интенсивность излучения (негатив) на выходе из аксикона

не менее, достаточно сильно выражены боковые лепестки. Это связано с тем, что z-компонента колебаний напряженности электрического поля сфокусирована в центре пятна. А более слабая x-компонента распределена по периферии фокального пятна.

На рис. 5 приведены графики интенсивности электрического поля в сечении фокальных пятен, которые получаются при фокусировке вихревого пучка аксиконом с различными углами раскрыва. По графикам, подобным представленным на рис. 5, рассчитывались линейные размеры фокальных пятен FWHM_x.

На рис. 6 показано, что фокальное пятно формируется сразу на выходе из аксикона.

На рис. 6 видно, что на выходе из аксикона формируется максимум интенсивности. На ос-

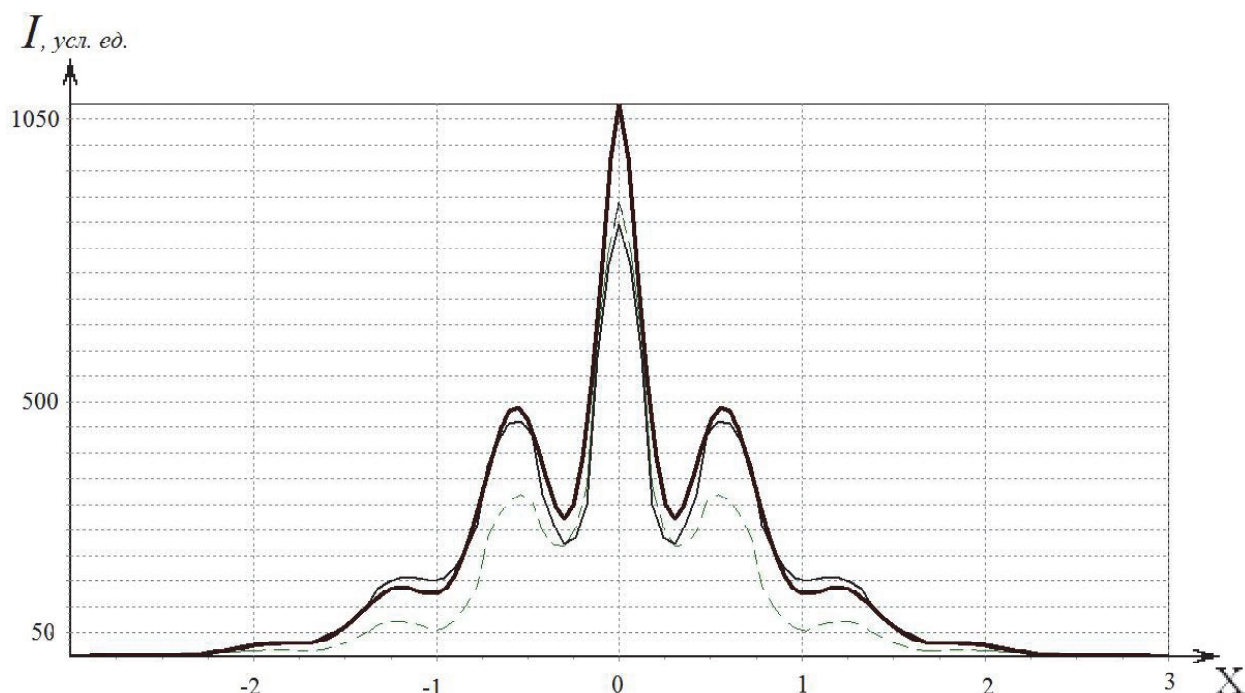


Рис. 5. График интенсивности излучения в центральном сечении фокального пятна для различных углов раскрыва:

толстая линия – угол раскрыва равен $93,95^\circ$; линия средней толщины – угол раскрыва равен $86,30^\circ$, тонкая пунктирная линия – угол раскрыва равен $100,39^\circ$

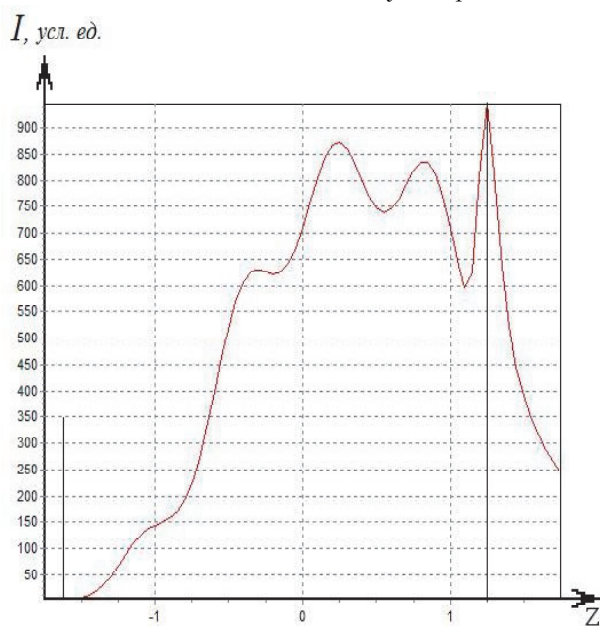


Рис. 6. График интенсивности излучения вдоль оптической оси аксикона (оси z).

Две вертикальные черты означают основание (слева) и вершину (справа) аксикона

новании этого можно сделать вывод, что фокальное пятно расположено сразу после выхода из аксикона, возле вершины.

Покажем в табл. 2 зависимость ширины фокального пятна FWHM от высоты аксикона. Как и в первом случае, диаметр основания аксикона равен 6 мкм.

Из табл. 2 видно, что максимальная интенсивность в фокальном пятне достигается при угле раскрыва, равном $93,95^\circ$

ВЫВОДЫ

1. В работе проведено моделирование фокусировки линейно-поляризованного излучения рефракционным микроаксиконом с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла.

2. Определены оптимальные углы раскрыва аксикона, при которых фокусировка Гауссова пучка (1) и вихревого пучка (2) является наиострейшей. Для Гауссова пучка – оптимальный угол раскрыва равен $88,12^\circ$ (размер фокального пятна: $FWHM_x = 0,76 \text{ мкм}$, $FWHM_y = 0,42 \text{ мкм}$), для вихревого пучка (2) – $93,95^\circ$ (размер фокального пятна: $FWHM_x = 0,3 \text{ мкм}$, $FWHM_y = 0,645 \text{ мкм}$).

3. Таким образом, в работе была показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка. Для этого достаточно внести в пучок вихревую фазовую зависимость и экранировать область сингулярности фазы (центральной части).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha and I. Golub // Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 3540-3542.
2. Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. 2009.

Таблица 2. Зависимость интенсивности в центре фокального пятна, а так же размеров пятна от угла раскрыва аксикона при фокусировке вихревого пучка (1)

Высота аксикона h , мкм	Угол раскрыва α , градусы	Числовая апертура NA	Интенсивность в центре I , условные единицы	FWHM _x , мкм	FWHM _y , мкм
2	112,62	0,385	290	0,301	2,57
2,5	100,39	0,56	845	0,3	0,757
2,6	98,17	0,62	922	0,302	0,69
2,7	96,03	0,746-0,056i	1050	0,301	0,64
2,8	93,95	0,748-0,149i	1080	0,303	0,645
2,9	91,94	0,749-0,2i	996	0,307	0,74
3	90	0,75-0,25i	905	0,312	0,742
3,2	86,30	0,748-0,324i	890	0,308	0,58
3,5	81,20	0,741-0,414i	580	0,314	0,631

Т. 33. № 4. С. 401-411.

3. Helseth L.E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens system // Opt. Commun. 2001. V. 191. P. 161-172
4. Vector propagation of radially polarized Gaussian beams diffracted by an axicon / Y. Zhang, L. Wang, C. Zheng // J. Opt. Soc. Am. A. 2005. Vol. 22. No. 11. P. 2542-2546.
5. Conical optics: the solution to conical light / T. Grosjean, F. Baida, D. Courjon // APPLIED OPTICS. 2007. Vol. 46. No. 11. P. 1994-2000.
6. Моделирование острой фокусировки радиально-поляризованной лазерной моды с помощью конического и бинарного микроаксиконов / В.В. Котляр, С.С. Стафеев // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 1. С. 52-60.
7. Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С.Н. - Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский, М.А. Аняншин // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т.12. № (3). С. 15-25.
8. Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // Opt. Express. 2006. Vol. 14. No. 6. P. 2203-2210.
9. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 58-68.
10. Расчёт дифракции линейно-поляризованного ограниченного пучка с постоянной интенсивностью на высокоапертурных бинарных микроаксиконов // С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский, А.А. Ковалёв // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 4. С. 443-460.
11. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка на бинарных микроаксиконов с периодом близким к длине волны / Хонина С.Н., Нестеренко Д.В., Морозов А.А., Скиданов Р.В., Пустовой И.А. // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 11-21.
12. Optimization of focusing of linearly polarized light / Khonina S. N. Golub I. // Opt. Lett. 2011. Vol. 36. No. 3. P. 352-354.
13. Generation of radially polarized mode in Yb fiber laser by using a dual conical prism / J. Li, K. Ueda, M. Musha, A. Shirakawa, and L. Zhong // Opt. Lett. **31**, 2969–2971 (2006).
14. Расчет дифракции на оптическом микрорельефе методом FDTD. / Д.Л. Головашкин, Н.Л. Казанский, С.А. Малышева. LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2011, 236 с.
15. Расчет комплексной функции пропускания рефракционных аксиконов / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. №. 4. С. 480-490.

THE INFLUENCE OF AXICON'S ANGLE SIZE ON FOCUSING ABILITY OF MICROAXICON

© 2012 S.A. Degtyarev

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

Dependence of intensity and focal spot size on the angle of the conical microaxicon has been studied using the difference method for solving Maxwell's equations (FDTD). It is shown the possibility of obtaining sharp focusing of linearly polarized laser beam with a vortex phase structure.

Key words: sharp focusing, microaxicon, linear polarization, vortical beam, diffraction limit overcoming.