

УДК 535.42

**ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ МИКРОАКСИКОНА**© 2012 С. А. Дегтярев<sup>1</sup>, С. Н. Хонина<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН

На основе разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка за счёт внесения в пучок вихревой фазовой зависимости.

*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. Таким образом, 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 продольного компонента, 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 одного продольного компонента, и позволяет достичь предсказанное скалярной теорией сверхразрешение по сравнению с линзой [3-7]. Данная ситуация особенно полезна при использовании материалов, чувстви-

тельных только к продольному компоненту [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 дифракционного аксикона в приближении тонкого оптического элемента.

В данной работе рассматривается рефракционный микроаксикон, который может быть изготовлен, например, выращиванием в резисте. Численное моделирование осуществляется с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла (FDTD) [13-17]. Показана возможность формирования компактного фокального пятна с помощью конического микроаксикона при линейной поляризации освещающего пучка за счёт внесения в пучок вихревой фазовой зависимости.

### 1. Фокусировка гауссового пучка микроаксином с различным углом раскрыва

Рассмотрим конический микроаксикон с показателем преломления  $n = 1,5$ , радиусом  $R = 3$  мкм в основании, размещённый в свободном пространстве. Высота аксикона  $h$  будет варьироваться в пределах от 2 до 4 мкм. 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 введённого 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 –  $\lambda/(100c)$ , где  $\lambda=1$  мкм – длина волны лазерного излучения,  $c$  – скорость света.

Для оценки фокусирующих свойств аксикона с различным углом раскрыва рассмотрим фокусировку гауссового пучка аксиконами с различной высотой. В качестве начального распределения электрического поля берётся линейно-поляризованная вдоль оси  $x$  фундаментальная мода Гаусса:

$$E_x(r, \mathbf{j}, z = 0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right), \quad (1)$$

где  $(r, \mathbf{j})$  – полярные координаты в плоскости  $z = 0$  (непосредственно в плоскости основания аксикона);  $A$  – нормирующий множитель;  $s = 1,5$  мкм – радиус гауссовского пучка. В работе предполагается взаимное расположение микроаксикона и осей координатной системы, показанное на рис. 1. Начальное распределение электрического поля задаётся в плоскости  $ХОУ$ . Излучение проходит через микроаксикон вдоль оси  $Z$ . Будем рассматривать распределение интенсивности излучения в двух плоскостях  $X'O'Y'$  и  $X''O''Y''$ , расположенных за аксиконем, как показано на рис. 1.

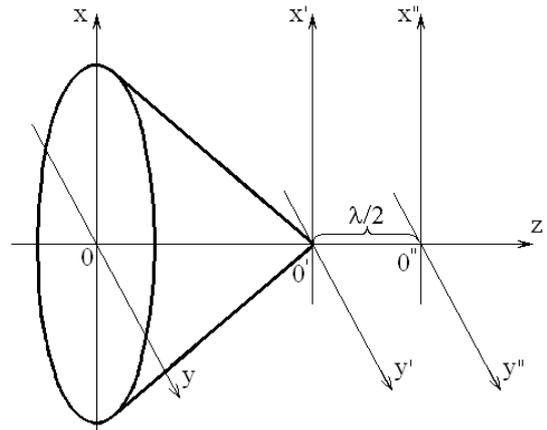


Рис. 1. Микроаксикон в Декартовой системе координат

Для анализа использовались усреднённые по времени значения интенсивности поля в расчётном пространстве. Так как поляризация лазерного излучения линейная, то при острой фокусировке нарушается осевая симметрия распределения поля.

На рис. 2 показаны картины усреднённых по времени продольных и поперечных сечений распределения квадратов модулей напряжённости электрического поля (негатив) для двух компонентов: поперечного  $|E_x(r, \mathbf{j}, z)|^2$ , продольного  $|E_z(r, \mathbf{j}, z)|^2$ , а также для полной интенсивности  $|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2$ . Эти картины получены в результате моделирования процесса распространения волн через аксикон радиусом 3 мкм и высотой 2 мкм (угол при вершине  $\alpha = 112,62^\circ$ ). Вид  $y$ -компонента в данном случае не приводится из-за незначительного вклада в общую интенсивность.

Как видно из рисунка, при линейной  $x$ -поляризации освещающего пучка происходит вытягивание фокального пятна вдоль оси поляризации. Особенно это заметно в ближней зоне дифракции. Также в этой зоне является существенным вклад продольного компонента напряжённости электрического поля, которая приводит к формированию структуры в виде двух световых пятен.

На рис. 3 и 4 приведены аналогичные результаты расчёта для аксиконов с

тем же радиусом 3 мкм, но большей высоты: угол при вершине  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 3) и  $\alpha = 73,74^\circ$  (рис. 4). Результаты, представленные на рис. 2...4, показывают, что с увеличением высоты аксикона увеличивается числовая апертура оптического элемента и вклад продольного компонента в общую интенсивность также увеличивается.

Для аксиконов на рис. 2 и 3 угол раскрыва менее критического  $\alpha = 96,38^\circ$

(для показателя преломления  $n=1,5$ ), соответствующего геометрическому полному внутреннему отражению лучей от поверхности аксикона. Однако теория распространения электромагнитных волн предсказывает даже в этом случае проникновение части энергии за границу аксикона в виде затухающих волн. Чем уже становится вершина, тем меньше энергии просачивается в свободное пространство.

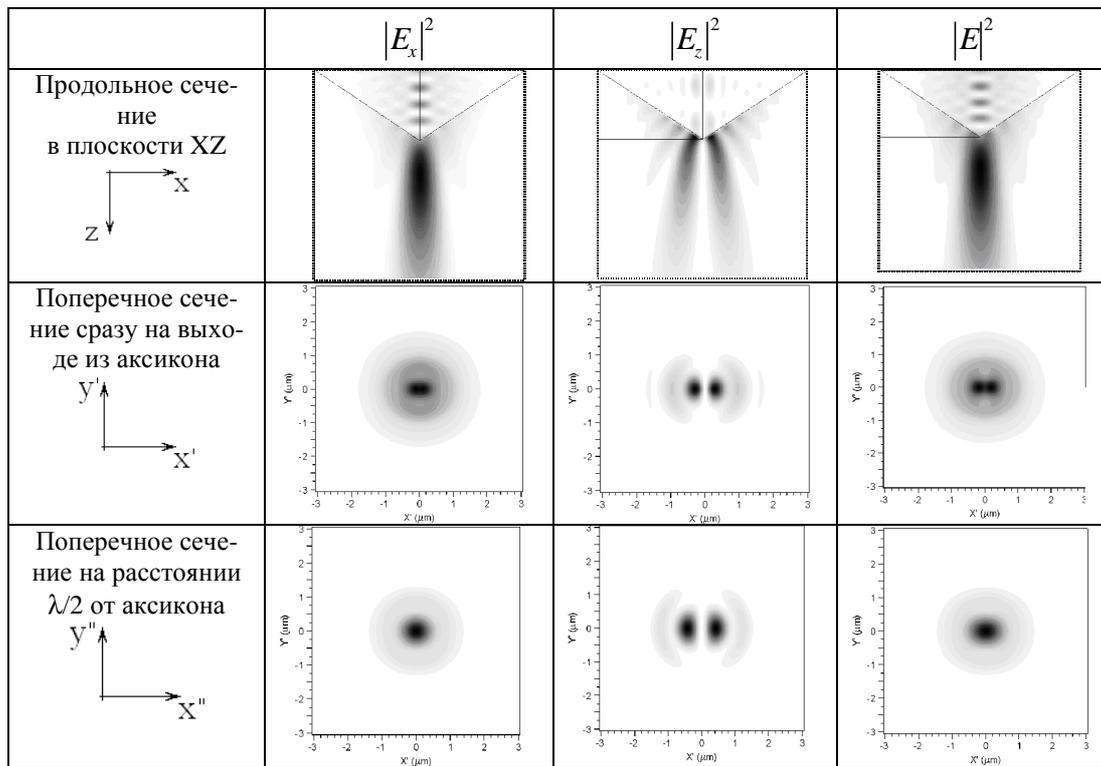


Рис. 2. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 2 мкм

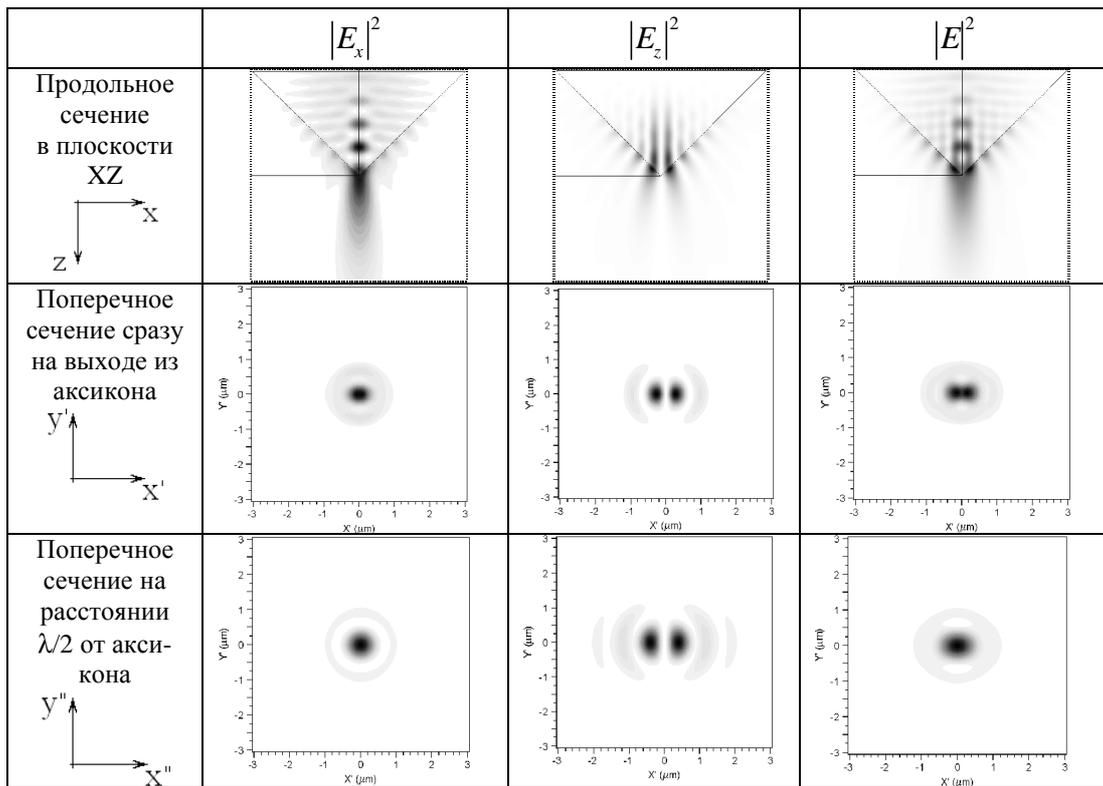


Рис. 3. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 3 мкм

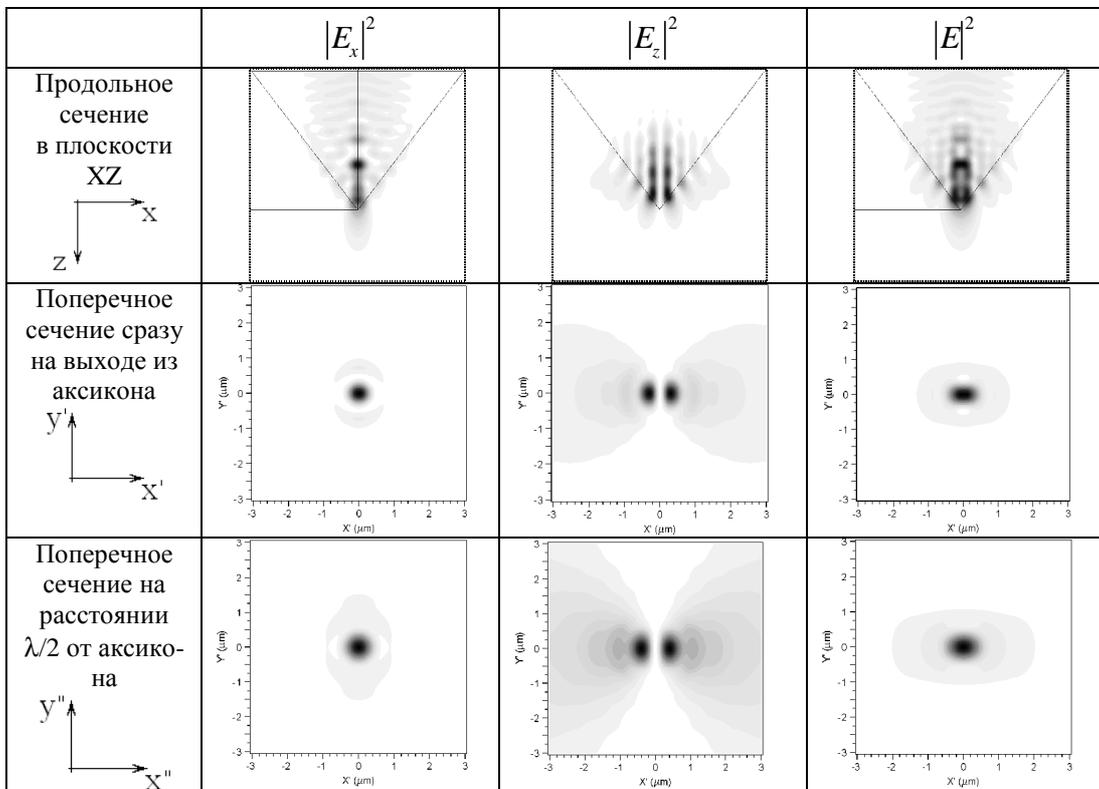


Рис. 4. Фокусировка гауссовского пучка аксиконом радиусом 3 мкм и высотой 4 мкм

На рис. 5 показано сечение вдоль оси  $x$  фокального пятна на выходе из аксикона с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности (full width at half maximum) вдоль оси  $x$ :  $\text{FWHM}_x=0,83\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $\text{FWHM}_x=0,70\lambda$  для  $a = 90^\circ$  и  $\text{FWHM}_x=0,69\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

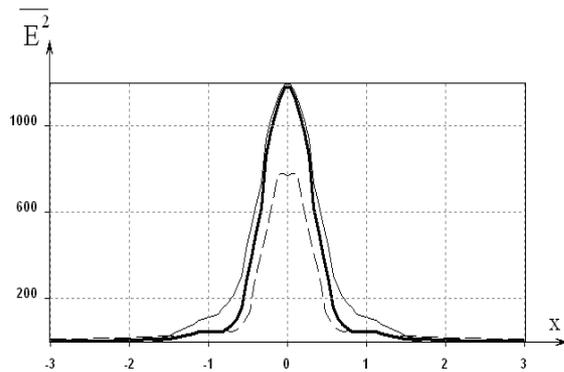


Рис. 5. Сечение фокального пятна вдоль оси  $x$  для аксикона с углом при вершине  $a = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $a = 90^\circ$  (толстая линия) и  $a = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

Как видно из приведённых результатов, мощный вклад продольного компонента приводит к уширению размеров фокального пятна при линейной поляризации. В работах [9-11] было предложено компенсировать это уширение с помощью перпендикулярного оси поляризации ли-

нейного фазового скачка или введения вихревой фазы.

На рис. 6 и 7 приведены результаты расчёта фокусировки освещающего пучка вида

$$E_x(r, j, z=0) = A \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \exp(ij) \quad (2)$$

с помощью аксикона с высокой числовой апертурой ( $a = 90^\circ$  на рис. 6 и  $a = 73,74^\circ$  на рис. 7).

Как видно из результатов, приведённых на рис. 6 и 7, при внесении в пучок вихревой фазовой составляющей поперечные компоненты приобретают кольцевую структуру, а продольный компонент представляет собой компактное пятно. Непосредственно на выходе из аксикона вклад продольного компонента очень велик, и он существенно влияет на вид общей интенсивности. Однако на небольшом удалении (полдлины волны) поперечные компоненты снова становятся преобладающими.

На рис. 6 и 7 видно, что из-за особенности в центре вихревого пучка при входе в аксикон формируется яркое световое пятно, связанное с чувствительностью (мощным откликом) продольного компонента на градиент фазы или резкие изменения в структуре оптического элемента [9-12].

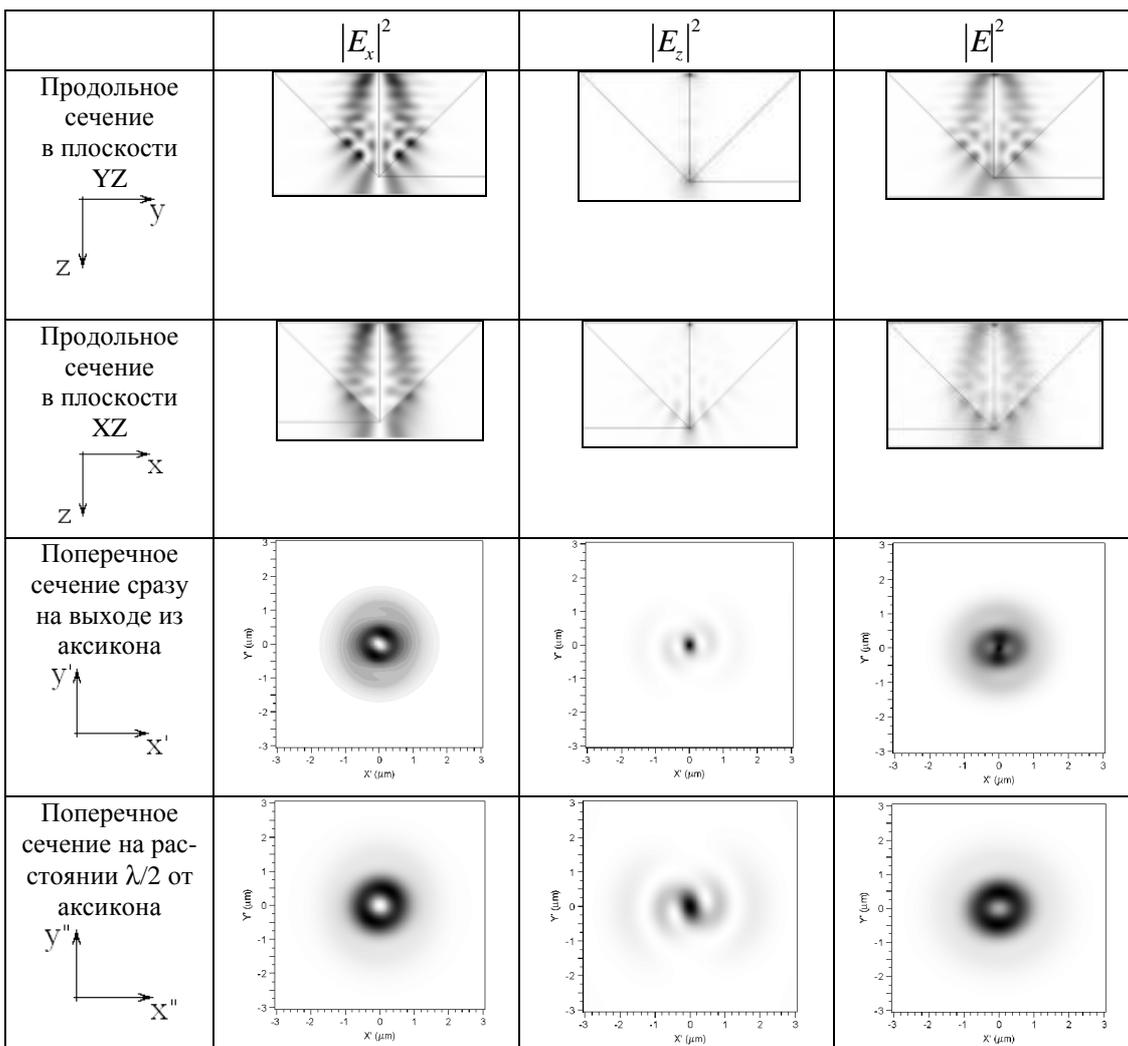


Рис. 6. Фокусировка вихревого Гауссова пучка аксиконом радиусом 3 мкм и  $\alpha = 90^\circ$

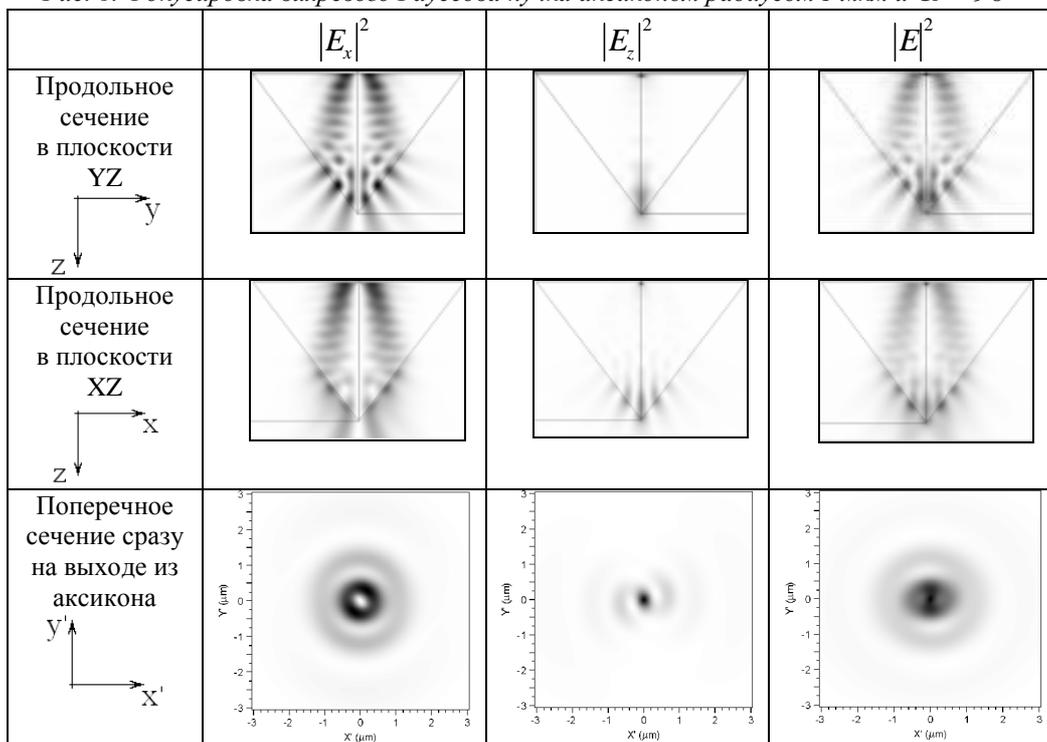


Рис. 7. Фокусировка вихревого Гауссова пучка аксиконом радиусом 3 мкм и  $\alpha = 73,74^\circ$

На рис. 8 показаны сечения вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) фокального пятна на выходе из аксиконов с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности:

$FWHM_x=2,02\lambda$ ,  $FWHM_y=1,79\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $FWHM_x=1,45\lambda$ ,  $FWHM_y=1,13\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$  и  $FWHM_x=1,08\lambda$ ,  $FWHM_y=0,98\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

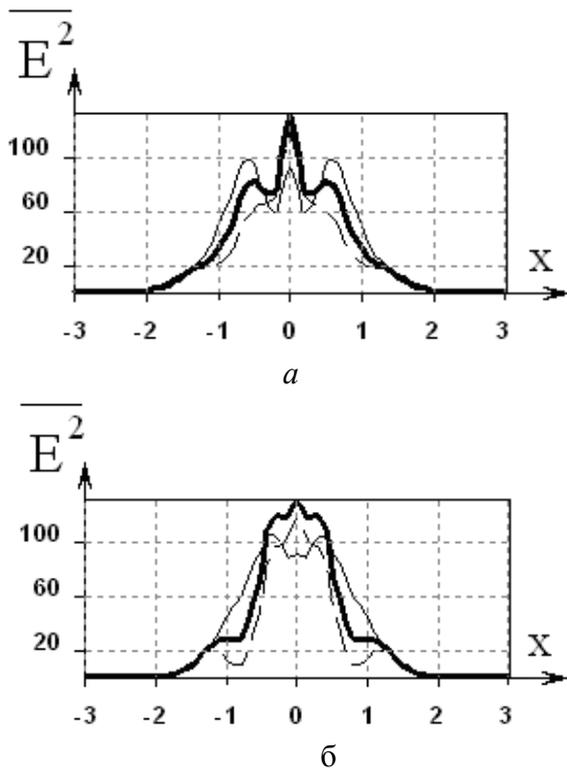


Рис. 8. Сечения фокального пятна вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) при фокусировке вихревого Гауссова пучка аксиконом с углом при вершине  $a = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $a = 90^\circ$  (толстая линия) и  $a = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

На рис. 8 хорошо видно появление острого пика на фоне довольно широкого светового пятна, но, к сожалению, высота этого пика недостаточна для большинства практических применений. Поэтому желательно дополнительно увеличить долю продольного компонента в фокальной области. Это можно сделать, используя вместо вихревого пучка с классической гаус-

совской амплитудой вихревой пучок следующего вида:

$$E_x(r, j, z=0) = A r \exp\left(-\frac{r^2}{s^2}\right) \exp(ij). \quad (3)$$

Умножение на радиальную координату позволяет убрать влияние вихревой особенности в центре пучка (рис. 9).

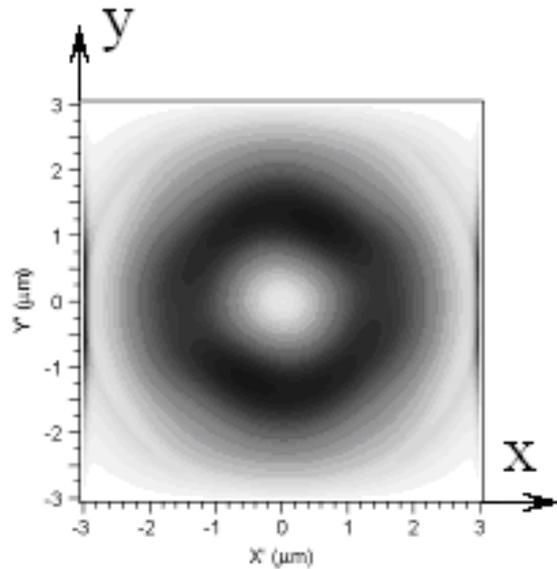


Рис. 9. Вихревой пучок (3) в основании аксикона (негатив)

На рис. 10 и 11 приведены результаты расчёта фокусировки освещающего пучка вида (3) с помощью аксиконов с различным углом раскрыва ( $a = 112,62^\circ$  на рис. 10 и  $a = 90^\circ$  на рис. 11).

На рис. 12 показаны сечения вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) фокального пятна на выходе из аксиконов с различным углом при вершине. Диаметр светового пятна по полуспаду интенсивности:

$FWHM_x=0,326\lambda$ ,  $FWHM_y=0,271\lambda$  для  $a = 112,62^\circ$ ,  $FWHM_x=0,293\lambda$ ,  $FWHM_y=0,726\lambda$  для  $a = 90^\circ$  и  $FWHM_x=0,313\lambda$ ,  $FWHM_y=0,98\lambda$  для  $a = 73,74^\circ$ .

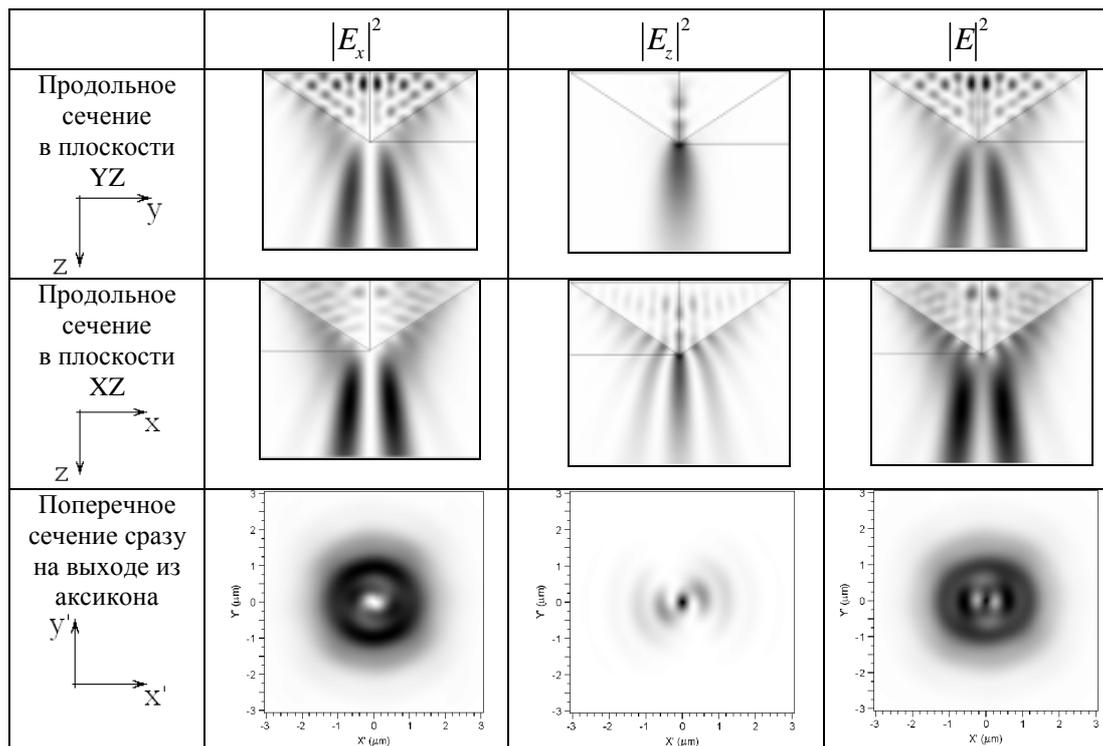


Рис. 10. Фокусировка вихревого пучка (3) аксиконом с  $\alpha = 112,62^\circ$

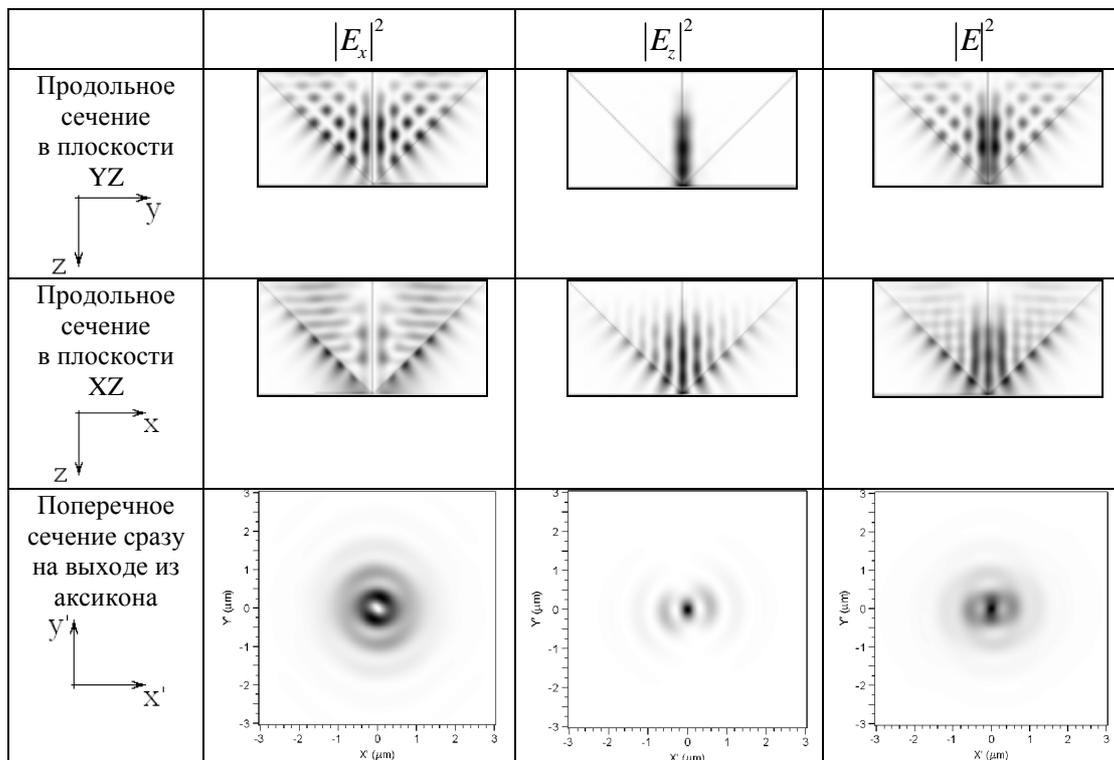


Рис. 11. Фокусировка вихревого пучка (3) аксиконом с  $\alpha = 90^\circ$

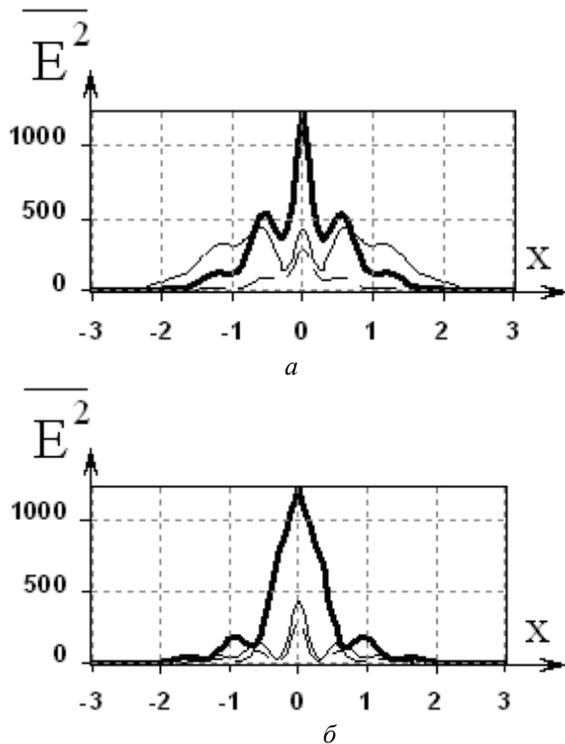


Рис. 12. Сечения фокального пятна вдоль оси  $x$  (а) и оси  $y$  (б) при фокусировке вихревого пучка (3) аксиконами с углом при вершине  $\alpha = 112,62^\circ$  (тонкая линия),  $\alpha = 90^\circ$  (толстая линия) и  $\alpha = 73,74^\circ$  (пунктирная линия)

Видно, что высота острого пика интенсивности в центре фокального пятна, изображённого на рис. 12, оказалась значительно больше, чем на рис. 8.

### Заключение

Проведено моделирование фокусировки линейно-поляризованного излучения рефракционным микроаксиконом с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла.

При фокусировке микроаксиконом лазерного Гауссова пучка при линейной  $x$ -поляризации происходит вытягивание фокального пятна вдоль оси поляризации. Особенно это заметно в ближней зоне дифракции и связано с большим вкладом продольного компонента напряжённости электрического поля.

Если на вход аксикона подаётся Гауссов пучок с вихревой фазовой структурой вида (2), у которого в области сингулярности фазы присутствует ненулевая амплитуда, то, несмотря на перераспреде-

ление вклада поперечного и продольного компонентов (т.е. продольный концентрируется в центре, а поперечные располагаются на периферии), в результирующем фокальном пятне мощные поперечные колебания на периферии сводят на нет острую фокусировку продольной составляющей.

Для того, чтобы уменьшить поперечные составляющие в фокальном пятне, предложено использовать вихревой лазерный пучок с кольцеобразной структурой амплитуды вида (3), т.е. в области сингулярности фазы должна быть нулевая амплитуда. При этом основной вклад в энергию фокального пятна вносит остророфокусированная продольная составляющая, что обуславливает острую фокусировку лазерного пучка вида (3) микроаксиконом.

Таким образом, 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).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и 11-07-13164-офи-м, а также государственных контрактов 07.514.11.4060, 07.514.11.4055.

### Библиографический список

1. Kalosha, V. P. Toward the sub-diffraction focusing limit of optical super-resolution / V. P. Kalosha and I. Golub // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – P. 3540-3542.
2. Хонина, С. Н. Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С. Н. Хонина, С. Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2009. – 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. Zhang, Y. 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. Grosjean, T. Conical optics: the solution to confine light / T. Grosjean, F. Baida, and D. Courjon // *APPLIED OPTICS.* – 2007. – Vol. 46, No. 11. – P. 1994-2000.
6. Котляр, В. В. 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. Хонина, С. Н. Алгоритмы быстрого расчёта дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский, М. А. Ананьин // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2010. – № 12(3). – С. 15-25.
8. Grosjean, T. Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean, D. Courjon // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, No. 6. – P. 2203-2210.
9. Хонина, С. Н. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / С. Н. Хонина, С. Г. Волотовский // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 58-68.
10. Хонина, С. Н. Расчёт дифракции линейно-поляризованного ограниченного пучка с постоянной интенсивностью на высокоапертурных бинарных микроаксиконов в ближней зоне / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский, А. А. Ковалёв // *Компьютерная оптика.* 2010. – Т. 34. – № 4. – С. 443-460.
11. Хонина, С. Н. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка на бинарных микроаксиконов с периодом, близким к длине волны / С. Н. Хонина, Д. В. Нестеренко, А. А. Морозов, Р. В. Скиданов, И. А. Пустовой // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35. – № 1. – С. 11-21.
12. Khonina, S. N. Optimization of focusing of linearly polarized light / Khonina S. N. and Golub I. // *Opt. Lett.* 2011. - Vol. 36, No. 3. – P. 352-354.
13. Головашкин, Д. Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Автометрия.* – 2006: Том 42. - № 6. - С. 78-85.
14. Головашкин, Д. Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Двумерный случай / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Автометрия.* – 2007: Том 43. - № 6. - С. 78-88.
15. Головашкин, Д. Л. Декомпозиция сеточной области при разностном решении уравнений Максвелла / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Математическое моделирование.* – 2007. - Том 19. - №2. - С. 48-58.
16. Головашкин, Д. Л. Решение задач компьютерной оптики на графических вычислительных устройствах / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский // *Вестник СГАУ.* – 2010. - № 4 (24). - С. 150-159.
17. Головашкин, Д. Л. Расчёт дифракции на оптическом микрорельефе методом FDTD. / Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский, С. А. Малышева // *LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия.* – 2011. - 236 с. ISBN-13: 978-3-8454-0996-2; ISBN-10: 3845409967).

## **SHARP FOCUSING OF A LINEARLY-POLARIZED VORTICAL BEAM BY MEANS OF A MICROAXICON**

© 2012 S. A. Degtyaryov<sup>1</sup>, S. N. Khonina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)  
<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences

The possibility of forming a compact focal spot with the help of a conical microaxicon in case of linear polarization of a lighting beam by introducing vertical phase dependence into the beam is shown on the basis of the difference method of solving Maxwell's equations.

*Sharp focusing, microaxicon, linear polarization, vortical beam, diffraction limit overcoming.*

### **Информация об авторах**

**Дегтярев Сергей Александрович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com). Область научных интересов: сингулярная оптика.

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт систем обработки изображений Российской академии наук. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru). Область научных интересов: сингулярная оптика, дифракционная оптика, оптический анализ изображений.

**Degtyaryov Sergei Alexandrovich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com). Area of research: singular optics.

**Khonina Svetlana Nikolaevna**, doctor of science, leading researcher, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru). Area of research: singular optics, diffractive optics, optical image processing.