

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ ФОКАЛЬНОГО ПЯТНА В ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ ПРИ ВНЕСЕНИИ АБЕРРАЦИЙ

© 2010 Е. А. Пелевина¹, С. Н. Хонина²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет)

²Институт систем обработки изображений РАН

Показана возможность управления вкладом компонентов векторного электрического поля в фокальной области с помощью дополнительного введения пропускающих функций, аналогичных волновым абберациям с целью уменьшения поперечного размера центрального светового пятна фокусирующей системы с высокой числовой апертурой. На основе анализа матрицы поляризованного преобразования высокоапертурной линзы и численного моделирования фокусирующей системы в приближении Дебая доказана возможность уменьшения размера фокального пятна, а также теневой области. Показана эффективность использования пропускающей функции, согласованной с полиномами Цернике для формирования субволнового центрального пятна.

Размер фокального пятна, базис Цернике, высокоапертурная фокусирующая система, абберации.

Введение

В последнее время появилось много работ, посвящённых уменьшению поперечного размера фокального пятна высокоапертурной фокусирующей системы [1-5]. Наименьший поперечный размер фокального пятна был получен при радиальной поляризации, когда вклад продольного компонента в суммарную интенсивность на оси является максимальным.

Существуют различные способы уменьшить вклад поперечных компонент в общую интенсивность на оптической оси, в том числе введение кольцевой апертуры, пропускающей излучение только в периферийной части линзы [1, 2], и более энергетически эффективное дополнение фазовыми оптическими элементами [3-5].

Большое количество работ посвящено изучению влияния различных аббераций на высокоапертурные оптические системы. В работах [6, 7] было проведено исследование влияния сферической абберации и дефокусировки. Было выяснено, что пик интенсивности является более узким, чем предсказано классической теорией. Работы [8, 9] посвящены анализу и развитию теории Нейбор-Цернике. В них

показано применение данной теории к высокоапертурным фокусирующим системам. В [8] была расширена скалярная теория и показана возможность изменения размера фокального пятна в системе. В [10] показано использование SIL-линз для компенсации аббераций в оптической системе. В частности, показано, что ширина фокального пятна по уровню полуспада интенсивности (FWHM) в такой системе сопоставима с результатом, полученным для высокоапертурной системы без SIL-линзы. Несколько работ посвящены исследованию влияния аббераций различных порядков на пучки с разной поляризацией [11-14]. Так в [11] было изучено влияние первичной сферической абберации на острую фокусировку линейно- и циркулярно-поляризованных пучков Гаусса-Лагерра. Получено, что при линейной поляризации наличие абберации снижает интенсивность в фокальной точке и увеличивает её в боковых лепестках. Для циркулярно-поляризованного пучка абберации приводят к увеличению размеров центрального темного пятна наряду с уменьшением интенсивности на периферии светлого кольца.

Поэтому интересно рассмотреть возможность аналогичного выделения отдельного компонента электрического поля с целью достижения наиболее компактной осевой локализации интенсивности на основе дополнительного введения пропускающих функций, аналогичных волновым aberrациям.

Базис Цернике и его свойства

Существует полное множество ортонормированных функций с угловыми гармониками в круге радиуса r_0 , которые используют для описания волновых aberrаций. Это круговые полиномы Цернике [15]:

$$\Psi_{nm}(r, \theta) = \sqrt{\frac{n+1}{r_0^2}} R_n^m(r) \exp(im\theta), \quad (1)$$

где

$$R_n^m(r) = \sum_{p=0}^{(n-m)/2} (-1)^p (n-p)! \times \left[p! \left(\frac{n+m}{2} - p \right)! \left(\frac{n-m}{2} - p \right)! \right]^{-1} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{n-2p} \cdot \quad (2)$$

В формуле (2) приведены радиальные полиномы Цернике $R_n^m(r)$. Их свойства:

$$\mathbf{P}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2(\theta) \cos(\phi) - 1 & \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\phi) - 1 & \sin(\theta) \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\phi) - 1 & 1 + \cos^2(\theta) \cos(\phi) - 1 & \sin(\theta) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) \cos(\theta) & -\sin(\theta) \cos(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\theta, \phi) \\ b(\theta, \phi) \\ c(\theta, \phi) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_n^{-m}(r) &= R_n^m(r); \\ R_n^{\pm 1}(r_0) &= 1; \\ R_{2k+1}^{2l}(r) &= 0, \quad R_{2k+1}^{2l+1}(r) = 0, \quad |m| \leq n; \\ R_0^0(r) &= 1. \end{aligned}$$

Полиномы Цернике часто используются для описания волновых aberrаций оптических систем [8, 10]. Аналогично отдельные полиномы Цернике можно представить в виде суперпозиции нескольких aberrаций [16].

Непараксиальная векторная модель в приближении Дебая

Для высокоапертурной фокусирующей оптической системы векторное электрическое поле в однородной диэлектрической среде вблизи фокуса можно описать в приближении Дебая [17]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\theta, \phi, z) &= \\ &= -\frac{if}{0} \int_0^2 \int_0^2 B(\theta, \phi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \phi) \exp \times \\ &\times [ik(\sin(\theta) \cos(\phi) -) + z \cos(\theta)] \times \\ &\times \sin(\theta) d\theta d\phi, \end{aligned} \quad (3)$$

где (θ, ϕ, z) – цилиндрические координаты фокальной области с началом координат в фокусе; (θ, ϕ) – сферические угловые координаты выходного зрачка; $B(\theta, \phi)$ – функция пропускания; $T(\theta)$ – функция аподизации зрачка; $\mathbf{P}(\theta, \phi)$ – поляризационное преобразование.

Приближение Дебая верно, если фокусное расстояние оптической системы значительно превышает длину волны и поле (3) рассматривается вблизи фокуса.

Поляризационное преобразование для компонент электрического вектора в (3) имеет следующий вид:

где $a(\theta, \phi)$, $b(\theta, \phi)$, $c(\theta, \phi)$ – функции поляризации для x-, y- и z- компонент падающего пучка.

Линейная x-поляризация

Поскольку большинство современных лазеров генерируют излучение с линейной поляризацией, то остаётся актуальным вопрос прямого уменьшения размера фокального пятна при линейной поляризации, без использования устройств преобразования поляризации.

При линейной x-поляризации коэффициенты поляризации освещающего пуч-

ка равны $a(\theta) = 1$; $b(\theta) = 0$; $c(\theta) = 0$ и поляризацонное преобразование (4) сводится к виду

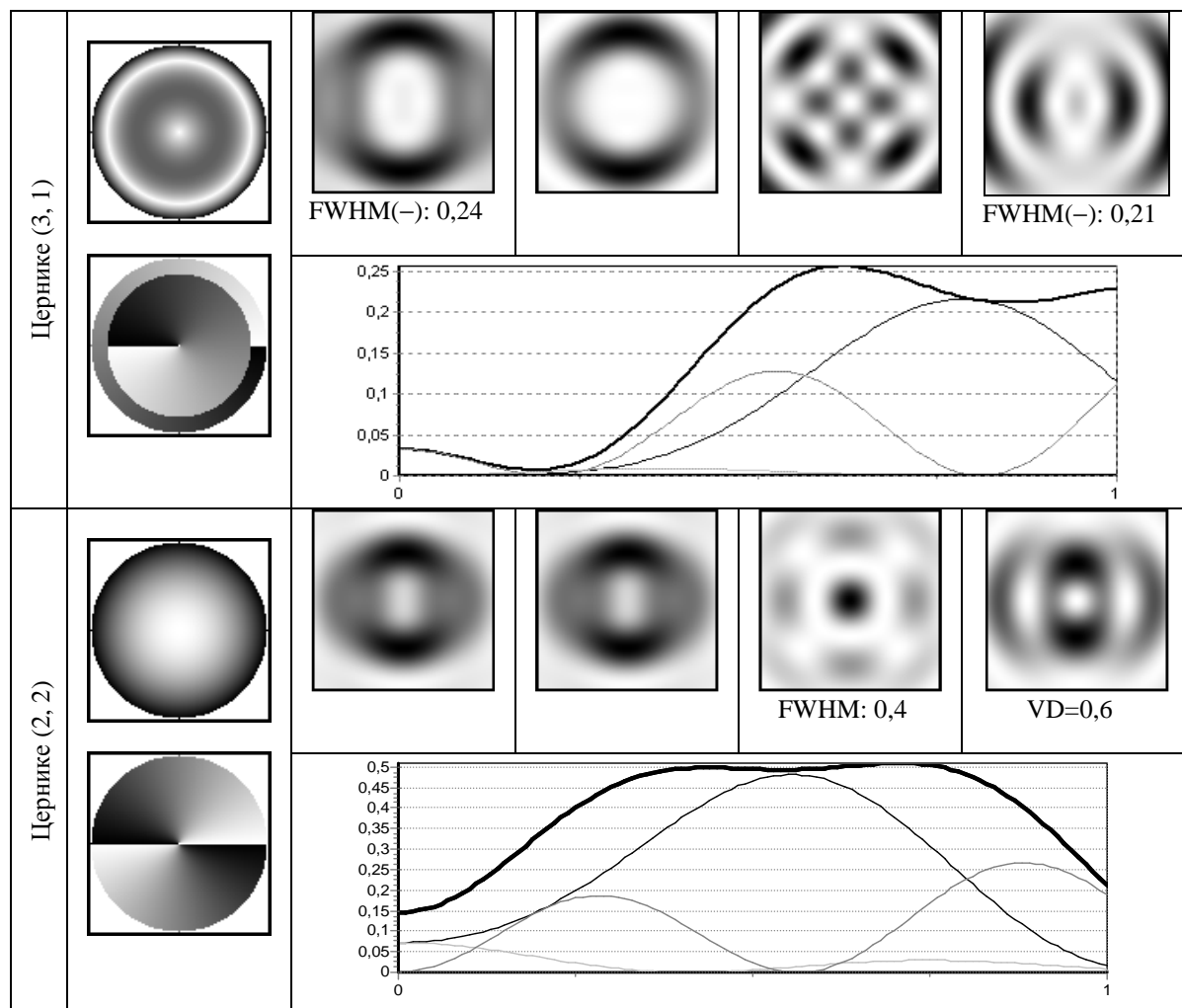
$$P(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2(\theta) \cos(\varphi - 1) \\ \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\varphi - 1) \\ -\cos(\theta) \sin(\theta) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Результаты, полученные для выражения (3) с поляризацонным вектором (5) в отсутствии каких-либо дополнительных функций пропускания ($B(\theta, \varphi) = 1$), что соответствует полиному Цернике (0,0)), при использовании в качестве функций пропускания вихревой функции вида $\exp(im\varphi)$ с равномерной амплитудой,

а также полиномов Цернике (1), приведены в табл. 1. На всех графиках толстой линией чёрного цвета показано сечение вдоль оси x в фокальной плоскости полной интенсивности электрического поля, тонкой линией черного и светло-серого цвета - поперечные компоненты (x и y), а тёмно-серого - продольная компонента. В таблице также приведены значения полной ширины по полуспаду интенсивности в горизонтальном направлении $FWHM(-)$. Кроме того, для оценки возможности формирования вихревой теневой области малого размера используется параметр VD , показывающий диаметр теневой воронки между двумя максимумами (световыми барьерами).

Таблица 1. Результаты моделирования при линейной x -поляризации падающего излучения

| | Амплитуда, фаза $B(\theta, \varphi)$ | $ E ^2$ | $ E_x ^2$ | $ E_y ^2$ | $ E_z ^2$ |
|--------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------|-------------------|
| Цернике (0, 0) | | FWHM(-): 0,74 | FWHM(-): 0,56 | | |
| | | | | | |
| $\exp(im\varphi), m = 1$ | | | | | FWHM(-): 0,36 |
| | | | | | |



Как следует из приведённых результатов, при острой фокусировке линейно-поляризованного излучения фокальное пятно вытягивается вдоль оси поляризации. Введение в качестве пропускающей функции вихревой фазовой сингулярности первого порядка $\exp(im)$, $m=1$ позволяет получить компактное пятно только для z -компонента [18]. Однако при использовании дополнительно амплитудных вариаций, которые обеспечивает радиальная часть рассматриваемых функций Цернике (2), удаётся получить компактное световое пятно в общей фокальной интенсивности. При этом наблюдается существенный рост энергии в боковых лепестках.

Использование полинома Цернике (2,2) с вихревой фазовой сингулярностью второго порядка $m=2$ обеспечивает нулевое значение на оптической оси для про-

дольного компонента (E_z), причём диаметр теневой зоны $VD=0,6$.

Радиальная поляризация

При радиальной поляризации излучения, падающего на высокоапертурную фокусирующую систему, коэффициенты записываются как


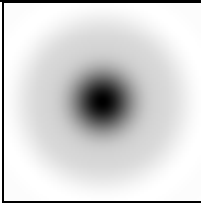
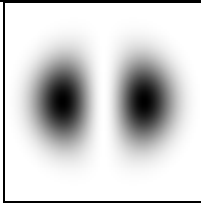
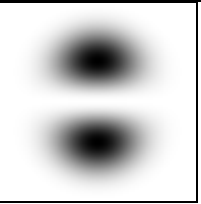
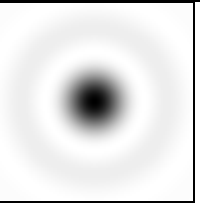
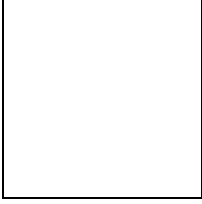
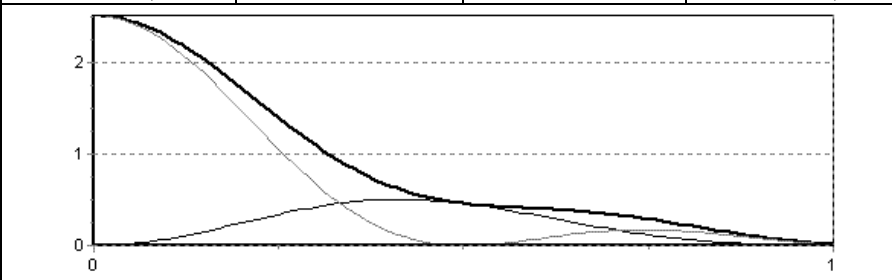
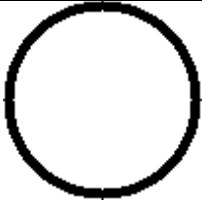
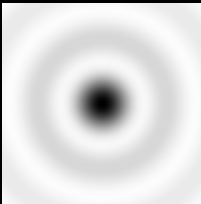
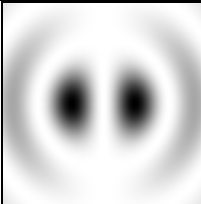
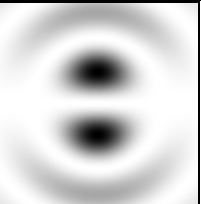
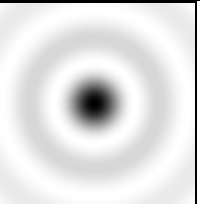
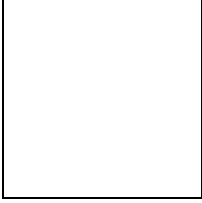
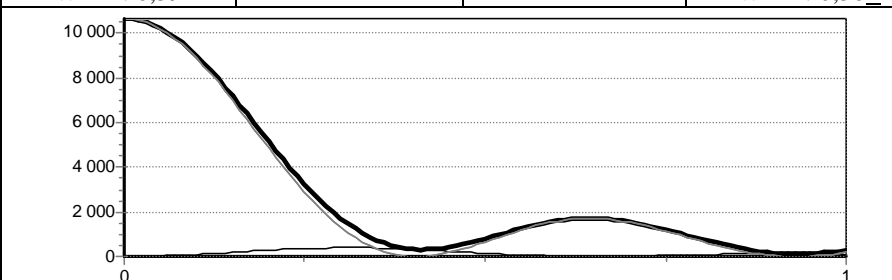
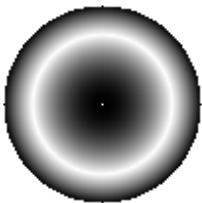
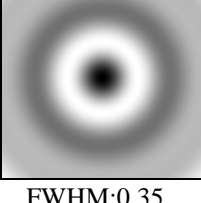
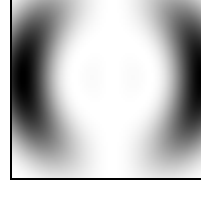
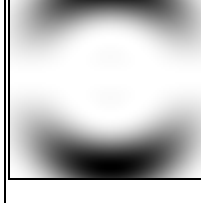
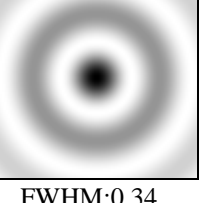
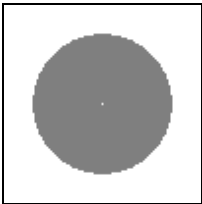
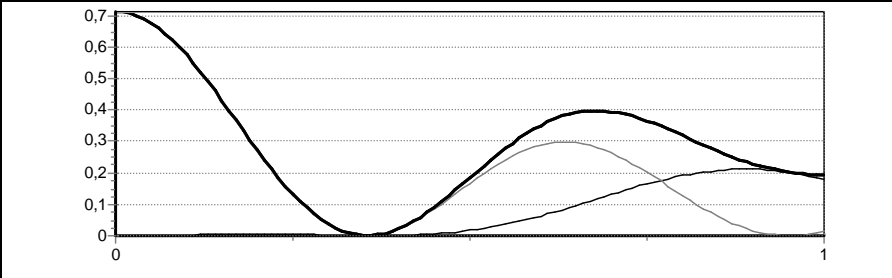
$$a(\theta) = \cos \theta; b(\theta) = \sin \theta; c(\theta) = 0,$$

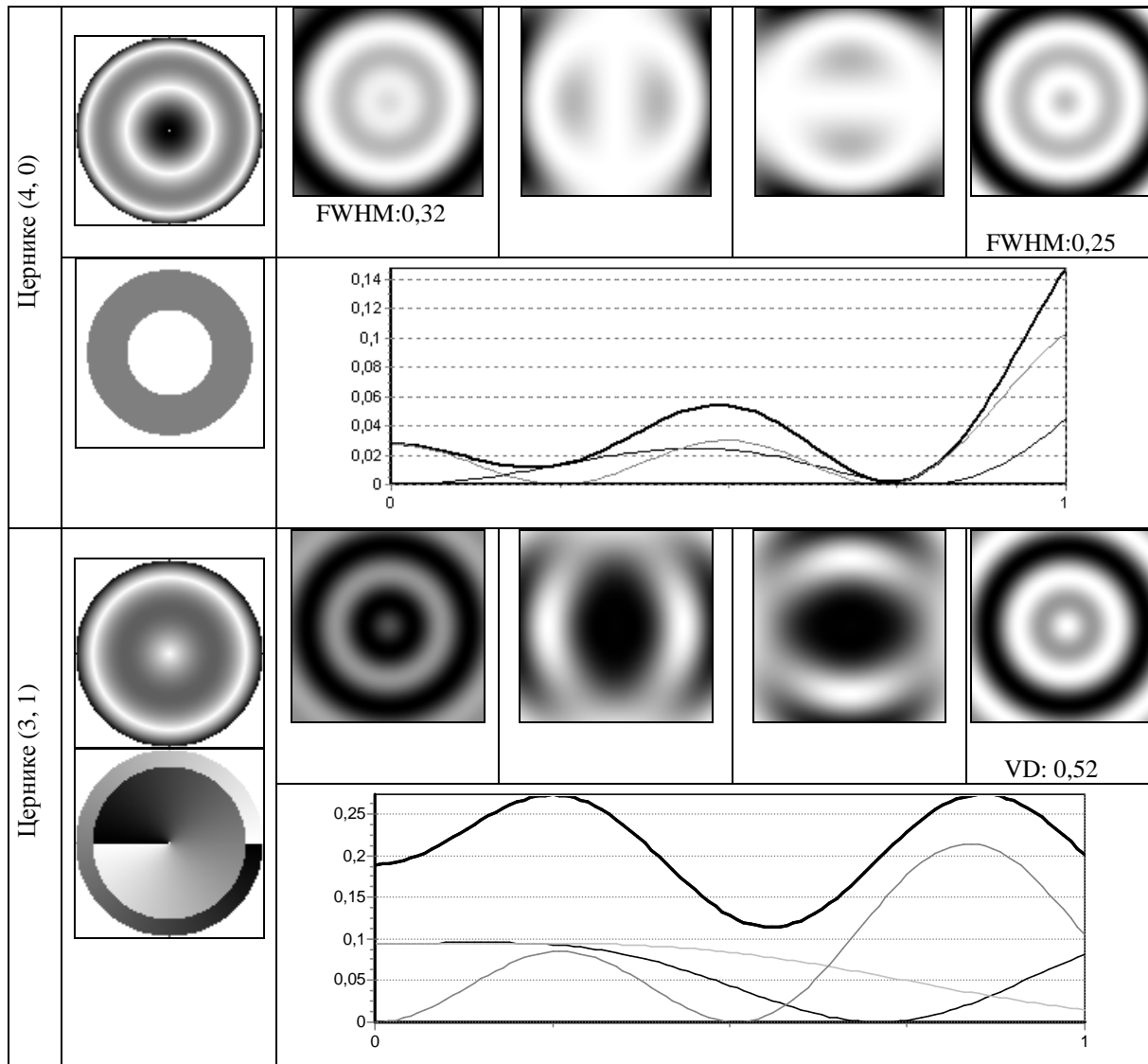
и тогда вектор поляризации примет вид

$$\mathbf{P}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В табл. 2 приведены сравнительные результаты численного моделирования для линзы без aberrаций, с наложением узкой кольцевой апертуры и при использовании функции пропускания, пропорциональной полиномам Цернике (2,0), (3,1) и (4,0).

Таблица 2. Результаты моделирования при радиальной поляризации падающего излучения

| | Амплитуда, фаза $B(\theta, \phi)$ | $ E ^2$ | $ E_x ^2$ | $ E_y ^2$ | $ E_z ^2$ |
|--------------------|---|---|---|--|---|
| Цернике (0, 0) |  |  FWHM: 0,54 |  |  |  FWHM: 0,45 |
| |  |  | | | |
| Кольцевая апертура |  |  FWHM: 0,39 |  |  |  FWHM: 0,38 |
| |  |  | | | |
| Цернике (2,0) |  |  FWHM: 0,35 |  |  |  FWHM: 0,34 |
| |  |  | | | |



Как видно из приведённых результатов, при острой фокусировке радиально поляризованного излучения фокальное пятно остаётся круглым. Известен простой способ уменьшения размера фокального пятна с помощью узкой кольцевой апертуры [1,2], однако в этом случае теряется большое количество входной энергии, которая блокируется апертурой в центральной части линзы. Введение функций пропускания, согласованных с функциями Цернике, позволяет существенно уменьшать размер фокального пятна без таких существенных энергетических потерь. Причём возможно достижение ситуации, когда уровень интенсивности в боковых лепестках не слишком высок.

Использование полинома Цернике (3,1) с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка $m=1$ обеспечивает нулевое значение на оптической оси для E_z -компоненты с диаметром теневой зоны $VD=0,52$, что меньше, чем было достигнуто для линейной поляризации.

Круговая поляризация

Круговая (циркулярная) поляризация также является распространённым и простым в реализации типом поляризации.

Для круговой поляризации входного поля коэффициенты с учётом нормировки равны

$$a(\) = 1/\sqrt{2}; \quad b(\) = \pm i/\sqrt{2}; \quad c(\) = 0,$$

а вектор поляризации в (4) примет вид

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [1 + \cos^2(\theta) \cos(\phi) - 1] \pm i[\sin(\theta) \cos(\phi) \cos(\phi) - 1] \\ [\sin(\theta) \cos(\phi) \cos(\phi) - 1] \pm i[1 + \sin^2(\theta) \cos(\phi) - 1] \\ -\sin(\theta) [\cos(\phi) \pm i \sin(\phi)] \end{bmatrix}. \tag{7}$$

В табл. 3 приведены сравнительные результаты численного моделирования для линзы без aberrаций и линзы с

aberrациями на примере различных полиномов Цернике при круговой поляризации.

Таблица 3. Результаты моделирования при круговой поляризации падающего излучения

| | Амплитуда, фаза $B(\theta, \phi)$ | $ E ^2$ | $ E_x ^2$ | $ E_y ^2$ | $ E_z ^2$ |
|----------------|--------------------------------------|------------|-----------|---------------|------------|
| Цернике (0, 0) | | | | | |
| | | FWHM: 0,59 | | FWHM(-): 0,47 | VD: 0,75 |
| Цернике (3, 1) | | | | | |
| | | FWHM: 0,35 | | | FWHM: 0,26 |
| Цернике (2, 2) | | | | | |
| | | | | | VD: 0,6 |

Наиболее интересные результаты в этом случае получаются для E_z -компонента: при использовании функции пропускания, согласованной с функцией Цернике (3,1) можно получить в этом компоненте круглое центральное световое пятно очень малого размера: FWHM: 0,26 . Также использование полинома Цернике (3,1) обеспечивает формирование теневой зоны $VD=0,6$, меньшей, чем в случае использования системы без aberrаций ($VD=0,75$). Данный факт может быть полезен при использовании материалов, избирательно чувствительных к различным компонентам электрического поля [19]. Картина суммарной интенсивности при этом существенно искажена вкладом поперечных компонент.

Азимутальная поляризация

В случае азимутальной поляризации коэффициенты входного поля записываются как

$$a(\theta) = \sin \theta ; b(\theta) = -\cos \theta ; c(\theta) = 0,$$

а вектор поляризации в (4) примет вид

$$P(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Из выражения (8) видно, что в этом случае продольный компонент отсутствует.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты численного моделирования для линзы без aberrаций и линзы с использованием в качестве пропускающей функции полинома Цернике (1,1) при азимутальной поляризации. Заметим, что использование вихревых функций с порядком сингулярности $|m| \neq 1$ будет приводить к формированию в центре фокальной плоскости абсолютного нуля интенсивности [18], т.к. в этом случае все компоненты на оптической оси будут равны нулю.

Таблица 4. Результаты моделирования при азимутальной поляризации падающего излучения

| | Амплитуда, фаза $B(\theta, \phi)$ | $ E ^2$ | $ E_x ^2$ | $ E_y ^2$ | $ E_z ^2$ |
|----------------|-----------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Цернике (0, 0) | | | | | |
| | | VD: 0,75 | | | |
| Цернике (1, 1) | | | | | |
| | | FWHM: 0,46 | | FWHM: 0,36 | |

В данном случае отсутствие продольного компонента позволяет при использовании функции пропускания, согласованной с функцией Цернике (1,1), получить в общей интенсивности круглое центральное световое пятно меньше дифракционного предела ($FWHM=0,46$) с низким уровнем интенсивности в боковых лепестках. Этот факт также был обнаружен в [18].

Заключение

В работе рассмотрено введение пропускающих функций, соответствующих волновым абберациям, в высокоапертурных фокусирующих системах с различной поляризацией в модели Дебая. В результате подтверждена возможность уменьшения размера фокального пятна. Причём уменьшение фокального пятна для линейной поляризации вдоль одного направления оказывается меньшим, чем для радиальной поляризации: для линейной поляризации получено вытянутое фокальное пятно шириной по уровню полуспада интенсивности вдоль оси поляризации $FWHM(-)=0,24\lambda$, для радиальной поляризации получено круглое пятно диаметром по полуспаду интенсивности $FWHM=0,32\lambda$.

Недостатком такого подхода является перераспределение энергии в боковые лепестки. Использование азимутальной поляризации в сочетании с наличием вихревой фазовой функции первого порядка позволяет получить в общей интенсивности круглое центральное световое пятно меньше дифракционного предела ($FWHM=0,46$) с низким уровнем интенсивности в боковых лепестках.

Также нужно отметить, что в отдельных компонентах электрического вектора уровень боковых лепестков не столь существенный, как в суммарной интенсивности. В частности, при круговой поляризации для z -компонента получено круглое фокальное пятно с диаметром по полуспаду интенсивности $FWHM_z=0,26\lambda$, что очень близко

к результатам с радиальной поляризацией ($FWHM_z=0,25\lambda$), для получения которой необходимы достаточно сложные или дорогостоящие устройства. Данный факт может быть полезен при использовании материалов, избирательно чувствительных к различным компонентам электрического поля [19].

Также показано, что можно уменьшать размеры не только светового пятна, но и теневой области.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

Библиографический список

1. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot [Text] / S. Quabis // Opt. Commun. - 2000. - V. 179. - P. 1-7.
2. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam [Text] / R. Dorn // Phys. Rev. Lett. - 2003. - V. 91. - P. 233901.
3. **Sheppard, C.J.R.** Annular pupils, radial polarization, and superresolution [Text] / Colin J. R. Sheppard and Amarjyoti Choudhury // Appl. Opt. - 2004. - Vol. 43, Issue 22. - P. 4322-4327.
4. **Хонина, С.Н.** Исследование применения аксиконов в высокоапертурной фокусирующей системе [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. -2010. -Т. 34, № 1. - С. 35-51.
5. **Хонина, С.Н.** Управление вкладом компонент векторного электрического поля [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. - 2010. - Т. 34, № 1. - С. 58-68.
6. **Visser, T.D.** Spherical aberration and the electromagnetic field in high-aperture systems [Text] / T.D. Visser,

S.H. Wiersma // *J. Opt. Soc. Am. A.* - 1991. - V. 8, No. 9. - P. 1404-1410.

7. **Visser, T.D.** Diffraction of converging electromagnetic waves [Text] / T.D. Visser, S.H. Wiersma // *J. Opt. Soc. Am. A.* - 1992. - V. 9, N 11. - P. 2034-2047.

8. **Braat, J.J.M.** Extended Nijboer-Zernike approach to aberration and birefringence retrieval in a high-numerical-aperture optical system [Text] / J.J.M. Braat, P. Dirksen, A.J.E.M. Janssen, S. van Haver, A.S. van de Nes // *Opt. Soc. Am. A.* - 2005. - V. 22, N 12. - P. 2635-2650.

9. **Braat, J.J.M.** Energy and momentum flux in a high-numerical-aperture beam using the extended Nijboer-Zernike diffraction formalism [Text] / J.J.M. Braat, S. van Haver, A.J.E.M. Janssen, P. Dirksen // *Journal of the European Optical Society. - Rapid Publications 2.* 07032. - P. 1-13.

10. **Rao, R.** Field confinement with aberration correction for solid immersion lens based fluorescence correlation spectroscopy [Text] / R. Rao, J. Mitic, A. Serov, R.A. Leitgeb, T. Lasser // *Optics Communications.* - 2007. - Vol. 271. - P. 462-469.

11. **Singh, R.K.** Effect of primary spherical aberration on high-numerical-aperture focusing of a Laguerre-Gaussian beam [Text] / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *J. Opt. Soc. Am. A.* - 2008. - V. 25, N 6. - P. 1307-1318.

12. **Singh, R.K.** Tight focusing of vortex beams in presence of primary astigmatism [Text] / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *J. Opt. Soc. Am. A.* - 2009. - V. 26, N 3. - P. 576-588.

13. **Singh, R.K.** Focusing of linearly-, and circularly polarized Gaussian background

vortex beams by a high numerical aperture system afflicted with third-order astigmatism [Text] / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *Optics Communications.* - 2008. - Vol. 281. - P. 5939-5948.

14. **Singh, R.K.** Structure of a tightly focused vortex beam in the presence of primary coma [Text] / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *Optics Communications.* - 2009. - Vol. 282. - P. 1501-1510.

15. **Born, M.** Principles of Optics [Text] / M. Born, E. Wolf - Pergamon Press, Oxford, 1968.

16. **Sheppard, C.J.R.** Orthogonal aberration functions for high-aperture optical systems [Text] / Colin J.R. Sheppard // *J. Opt. Soc. Am. A.* - 2004. - Vol. 21, N 5. - P. 832-838.

17. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system [Text] / B. Richards and E. Wolf // *Proc. R. Soc. London Ser. A.* - 1959. - V. 253. - P. 358-379.

18. **Хонина, С.Н.** Анализ возможности субволновой локализации света и углубления фокуса высокоапертурной фокусирующей системы при использовании вихревой фазовой функции пропускания [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // *Электромагнитные волны и электронные системы.* - 2010. - № 11. - С. 6-25.

19. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field [Text] / T. Grosjean and D. Courjon // *Optics Express.* - 2006. - Vol. 14, Issue 6. - P. 2203-2210.

hury // *Appl. Opt.* - 2004. - Vol. 43, Issue 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, N1. - P. 35-51. - [in Russian].

5. **Khonina, S.N.** Control by contribution of components of vector electric field in focus of a high-aperture lens by means of

References

1. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot // *Opt. Commun.* - 2000. - Vol. 179. - P. 1-7.

2. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam // *Phys. Rev. Lett.* - 2003. - Vol. 91. - P. 233901.

3. **Sheppard, C.J.R.** Annular pupils, radial polarization, and superresolution / Colin J. R. Sheppard and Amarjyoti Choud-

- binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34, N 1. – P. 58-68. – [in Russian].
6. **Visser, T.D.** Spherical aberration and the electromagnetic field in high-aperture systems / T.D. Visser, S.H. Wiersma // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 1991. - Vol. 8, N 9. - P. 1404-1410.
7. **Visser, T.D.** Diffraction of converging electromagnetic waves / T.D. Visser, S.H. Wiersma // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 1992. - Vol. 9, N 11. - P. 2034-2047.
8. **Braat, J.J.M.** Extended Nijboer-Zernike approach to aberration and birefringence retrieval in a high-numerical-aperture optical system / J.J.M. Braat, P. Dirksen, A.J.E.M. Janssen, S. van Haver, A.S. van de Nes // *Opt. Soc. Am. A*. - 2005. - Vol. 22, N 12. - P. 2635-2650.
9. **Braat, J.J.M.** Energy and momentum flux in a high-numerical-aperture beam using the extended Nijboer-Zernike diffraction formalism / J.J.M. Braat, S. van Haver, A.J.E.M. Janssen, P. Dirksen // *Journal of the European Optical Society*. - 2007. - Rapid Publications 2. 07032. - P. 1-13.
10. **Rao, R.** Field confinement with aberration correction for solid immersion lens based fluorescence correlation spectroscopy / R. Rao, J. Mitic, A. Serov, R.A. Leitgeb, T. Lasser // *Optics Communications*. - 2007. – Vol. 271. - P. 462–469.
11. **Singh, R.K.** Effect of primary spherical aberration on high-numerical-aperture focusing of a Laguerre-Gaussian beam / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 2008. - Vol. 25, N 6. - P. 1307-1318.
12. **Singh, R.K.** Tight focusing of vortex beams in presence of primary astigmatism / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 2009. - Vol. 26, N 3. - P. 576-588.
13. **Singh, R.K.** Focusing of linearly-, and circularly polarized Gaussian background vortex beams by a high numerical aperture system afflicted with third-order astigmatism / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *Optics Communications*. - 2008. – Vol. 281. - P. 5939–5948.
14. **Singh, R.K.** Structure of a tightly focused vortex beam in the presence of primary coma / R.K. Singh, P. Senthilkumaran, K. Singh // *Optics Communications*. - 2009. – Vol. 282. - P. 1501–1510.
15. **Born, M.** Principles of Optics / M. Born, E. Wolf - Pergamon Press, Oxford, 1968.
16. **Sheppard, C.J.R.** Orthogonal aberration functions for high-aperture optical systems / Colin J.R. Sheppard // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 2004. - Vol. 21, N 5. - P. 832-838.
17. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards and E. Wolf // *Proc. R. Soc. London Ser. A*. - 1959. - Vol. 253. - P. 358–379.
18. **Khonina, S.N.** Possibility analysis of subwavelength light localization and focus extending for high-aperture focusing system using vortical phase transmission function / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Electromagnetic waves and electronic systems*. - 2010. - N 11. - P. 6-25. – [in Russian].
19. **Grosjean, T.** Photopolymers as vectorial sensors of the electric field / T. Grosjean and D. Courjon // *Optics Express*. - 2006. - Vol. 14, Issue 6. - P. 2203-2210.

**REDUCTION OF THE FOCAL SPOT SIZE IN HIGH-APERTURE
FOCUSING SYSTEMS AT INSERTING OF ABERRATIONS**

© 2010 E.A. Pelevina¹, S. N. Khonina²

¹Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

²Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

Possibility of control by the contribution of components of vector electric field in focal area by means of transmission functions similar to the wavefront aberration for the purpose of reduction of the cross-section size of the central light spot of focusing system with the high numerical aperture is shown. By analysis of a matrix of polarizing transformation of a high-aperture lens and numerical modeling of focusing system in Debay approach the possibility of reducing the size of the focal spot and shadow area is proved. Efficiency of use Zernike polynomials for formation of a subwavelength central spot is shown.

Size of a focal spot, Zernike basis, high aperture focusing system, aberrations.

Информация об авторах

Пелевина Екатерина Александровна, студент. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: yekaterina.pelevina@gmail.com.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Pelevina Ekaterina Aleksandrovna, student. Samara State Aerospace University after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: yekaterina.pelevina@gmail.com.

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, leading researcher. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru.