

УДК 535.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО СВЕТОВОГО ПУЧКА С ПРОДОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО БИНАРНОГО АКSIKОНА

© 2014 Д.А. Савельев

Институт систем обработки изображений РАН, г.Самара

Поступила в редакцию 18.03.2014

Проведено численное моделирование дифракции лазерных пучков на основе метода конечных разностей во временной области. Определены характеристики и особенности дифракции на микро-аксиконе моды Гаусса – Лаггера (0,1) с линейной и круговой поляризацией. Показана возможность увеличения продольной электрической компоненты поля за счет увеличения радиуса элемента и размера входного пучка.

Ключевые слова: дифракционный аксикон, острая фокусировка, продольная компонента электрического поля, протяженный осевой отрезок.

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия особые типы поляризации электромагнитного излучения активно используются в различных приложениях. Особенно широко применяются так называемые цилиндрические пучки с радиальной и азимутальной поляризацией [1]. Причем особый интерес представляют радиально-поляризованное излучение, т.к. при острой фокусировке такого пучка в фокусе формируется мощная продольная компонента электрического поля.

В связи с поперечным характером распространяющейся плоской волны формирование продольно-поляризованного поля в свободном пространстве некоторое время считалось невозможным. Однако, теперь общеизвестно [2, 3], что любой поперечно ограниченный пучок имеет продольную компоненту даже в свободном пространстве. Разумеется, для параксиальных пучков эта компонента очень слабо выражена, и становится сравнимой с поперечными компонентами только при очень высокой числовой апертуре.

Уникальность радиальной поляризации в том, что она обеспечивает максимальное отношение интенсивности продольной компоненты к интенсивности поперечных компонент при острой фокусировке [4]. Данный эффект используется для уменьшения размеров фокального пятна [5-8], ориентированного изображения молекул [9, 10], генерации второй гармоники [11-13], в спектроскопии [14, 15], а также для ускорения частиц [16-18].

Таким образом, именно актуальность формирования продольно-поляризованного поля

объясняет повышенный интерес исследователей к радиально-поляризованным пучкам. Заметим, однако, что радиальная поляризация оптимальный, но не единственный способ возбуждения продольной компоненты в фокальной области. При линейной и круговой поляризации лазерные пучки с фазовой сингулярностью также обеспечивают формирование значительной продольной компоненты в режиме острой фокусировки [19-21].

Важным моментом при формировании продольно-поляризованного электрического поля является энергетическая эффективность. Известны оптические схемы, построенные на узкокольцевом диафрагмировании объектива, фокусирующего радиально-поляризованное излучение [5, 6, 22-24]. Это простой и удобный, но низкоэффективный способ формирования длинной (несколько десятков длин волн) продольно-поляризованной иглы.

Более энергетически выгодным является дополнение объектива фазовым дифракционным оптическим элементом [25, 26] или аксиконом [27], в том числе дифракционным [28]. Однако в этом случае световая игла будет длиной не более десятка длин волн.

Эффективный способ формирования протяженного светового пучка с преимущественно продольной поляризацией при освещении асимметричных высокоапертурных бинарных аксиконов линейно-поляризованным излучением был предложен в работе [29]. Было показано, что в этом случае продольно-поляризованный пучок имеет протяженность, пропорциональную радиусу аксикона. Это обеспечивает простой способ удлинения пучка без уменьшения его линейной интенсивности. Теоретически бесконечное увеличение входной энергией обеспечивает бесконечную протяженность пучка вдоль оптической оси.

*Савельев Дмитрий Андреевич, стажёр-исследователь
ЛЛИ ИСОИ РАН, аспирант СГАУ.
E-mail: dmitrey.savelyev@yandex.ru*

В данной работе исследуется возможность формирования протяженного светового пучка с преимущественно продольной поляризацией при дифракции лазерного излучения на бинарном аксиконе с высокой числовой апертурой. Моделирование выполнено на основе метода конечных разностей во временной области.

1. ДИФРАКЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ НА МИКРОАКСИКОНЕ С РАЗЛИЧНЫМ РАДИУСОМ

Рассмотрим высокоапертурный ($\alpha_0 = 0,95$) бинарный микроаксикон вида:

$$\tau_b(r) = \exp\{i \arg[\cos(k\alpha_0 r) \cos(m\phi)]\}. \quad (1)$$

Для моделирования дифракции различных пучков на аксиконе (1) использовался метод FDTD, реализованный в программном пакете Меер. Расчеты производились с использованием вычислительного кластера мощностью 775 GFlops.

Параметры моделирования: длина волны излучения $\lambda = 0,532$ мкм, максимальный радиус аксикона $R = 8,6625\lambda$, числовая апертура $NA = \alpha_0 = 0,95$. Размер расчётной области $x, y, z \in [-9\lambda; 9\lambda]$. Толщина поглощающего слоя PML со всех сторон окружающего расчетную область – $1,5\lambda$, шаг дискретизации по простран-

ству – $\lambda/40$, шаг дискретизации по времени – $\lambda/(80c)$, где c – скорость света. Источник находится на расстоянии $0,1\lambda$ перед рельефом аксикона, внутри подложки, которая занимает все пространство до PML со стороны, противоположной к рельефу. Время моделирования – 60 временных тактов. Показатель преломления аксикона и подложки, в которой выполнен бинарный рельеф вида (1), равен $n = 1,5$. В этом случае высота микрорельефа составляет:

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)} = \lambda. \quad (2)$$

В качестве входного пучка рассматривалась мода Гаусса-Лаггера (0,1) с радиусом $u = 3,5\lambda$:

$$G_{01}(r, \phi, z) = \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma(z)}\right) \exp[ikz - i2\eta(z)] \exp\left[\frac{im^2}{\lambda R(z)}\right] \exp\left[-\frac{r^2}{\sigma^2(z)}\right] \exp(i\phi). \quad (3)$$

Зафиксировав размер входного пучка, будем варьировать размер рельефа аксикона. Результат моделирования для у-поляризации приведен в табл. 1.

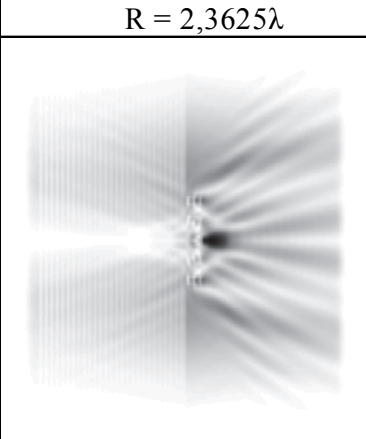
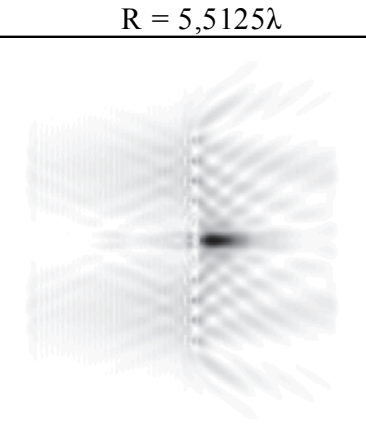
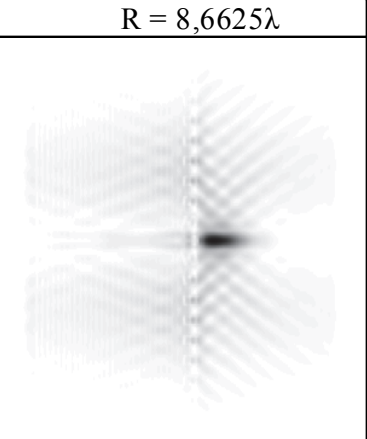



Следует отметить, что уменьшение радиуса рельефа приводит к перераспределению энергии продольной компоненты на оптической оси и уменьшению интенсивности световой иглы.

Так как во многих задачах требуется формирование симметричного пятна, рассмотрим также круговую поляризацию падающего излучения

Таблица 1. Распределение в плоскости YZ [$21\lambda \times 21\lambda$], у-линейная поляризация

	$R = 2,3625\lambda$	$R = 5,5125\lambda$	$R = 8,6625\lambda$
Общая интенсивность			
Компонента z			

Таблица 2. Распределение в плоскости YZ [$21 \lambda \times 21 \lambda$], круговая поляризация

	$R = 2,3625\lambda$	$R = 5,5125\lambda$	$R = 8,6625\lambda$
Общая интенсивность			
Компонента z			

для того же пучка (табл. 2). Будем рассматривать круговую поляризацию, направление которой противоположно направлению вихревой фазовой сингулярности.

Были получены схожие результаты – при фиксированном малом освещении увеличение размеров рельефа приводит к продлению z – компоненты.

2. ДИФРАКЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С РАЗЛИЧНЫМ РАДИУСОМ

В данном разделе рассматривается изменение радиуса светового пучка. Увеличим размер расчетной области, одновременно уменьшив число отсчетов на микрон. Укажем параметры моделирования, которые были изменены: радиус аксикона $R = 14,9625 \lambda$, размер расчётной области $x, y, z \in [-15,5 \lambda; 15,5 \lambda]$, шаг дискретизации по пространству – $\lambda/30$, шаг дискретизации по времени – $\lambda/(60c)$.

В табл. 3 приведены продольные сечения для моды Гаусса-Лаггера (0,1) с разным радиусом у при u-линейной поляризации. График для общей интенсивности приведен на рис. 1.

Как видно из табл. 3, при увеличении радиуса пучка удлиняется световой фокус, формируемый аксиконом. При этом центральная часть фокального распределения состоит в основном

из продольной компоненты (на оптической оси присутствует только z компонента). Таким образом, с помощью высокоапертурного аксикона можно формировать световую иглу, состоящую из продольной компоненты электрического поля. Протяженность этой иглы будет пропорциональна радиусу аксикона, полностью освещенного линейно-поляризованным пучком с вихревой фазовой сингулярностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали возможности формирования протяженного светового пучка с преимущественно продольной поляризацией при дифракции моды Гаусса – Лаггера (0,1) на бинарном аксиконе с высокой числовой апертурой. Моделирование было выполнено на основе метода конечных разностей во временной области.

В работе показана возможность формирования с помощью аксикона, освещенного лазерным пучком с линейной или круговой поляризацией протяженной световой иглы, состоящей из продольной компоненты электрического поля. Это достигается за счет внесения в освещающий пучок вихревой фазовой сингулярности, которая позволяет перераспределять энергию компоненты z, усиливая её интенсивность на оптической оси.

Протяженность световой иглы будет пропор-

Таблица 3. Распределение в плоскости YZ [$34 \lambda \times 34 \lambda$], у-линейная поляризация

	$\sigma = 3,5\lambda$	$\sigma = 5\lambda$	$\sigma = 14,56\lambda$
Входной пучок, $34\lambda \times 34\lambda$			
Общая интенсивность			
Компонента z			

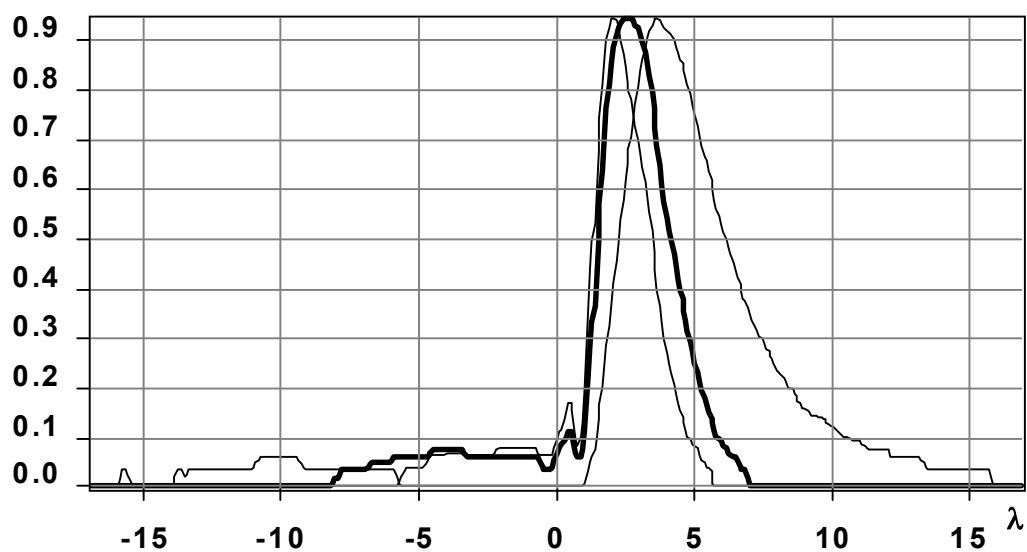


Рис. 1. График продольного распространения общей интенсивности, показано тонкой линией $\sigma = 3,5 \lambda$, толстой $\sigma = 5 \lambda$, пунктиром $\sigma = 14,56 \lambda$

циональна радиусу аксикона, полностью освещенного поляризованным пучком с вихревой фазовой сингулярностью и радиусу лазерного пучка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-00266, 14-07-31079 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // *Advances in Optics and Photonics*. 2009. Vol. 1. P. 1-57.
2. Richard B., Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system // *Proc. Roy. Soc. A*. 1959. Vol. 253. P. 358-379.
3. Longitudinal field components for laser beams in vacuum / L. Cicchitelli, H. Hora, R. Postle // *Phys. Rev. A* 1990. Vol. 41. P. 3727-3732.
4. Lerman G.M., Levy V. Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions // *Opt. Express*. 2008. Vol. 16. P. 4567-4581.
5. Focusing light to a tighter spot / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl, G. Leuchs // *Opt. Commun.* 2000. Vol. 179. P. 1-7.
6. Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 91. P. 233901.
7. Kozawa Y., Sato S. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams // *Journal of Optical Society of America A*. 2007. Vol. 24. P. 1793.
8. Хонина С.Н., Устинов А.В. Уменьшение размера фокального пятна при радиальной поляризации с помощью бинарного кольцевого элемента // *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36, №. 2. С. 219-226.
9. Orientational imaging of single molecules by annular illumination / B. Sick, B. Hecht, L. Novotny // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. P. 4482-4485.
10. Longitudinal field modes probed by single molecules / L. Novotny, M.R. Beversluis, K.S. Youngworth, T.G. Brown // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 86. P. 5251-5254.
11. Bouhelier A. Near-field second-harmonic generation induced by local field enhancement // *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90. P. 013903.
12. Biss D.P., Brown T.G. Polarization-vortex-driven second-harmonic generation // *Opt. Lett.* 2003. Vol. 28. P.923-925.
13. Yew E.Y.S., Sheppard C.J.R. Second harmonic generation polarization microscopy with tightly focused linearly and radially polarized beams // *Opt. Commun.* 2007. Vol. 275. P. 453-457.
14. Detection and characterization of longitudinal field for tip-enhanced Raman spectroscopy / N. Hayazawa, Y. Saito, S. Kawata // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. P. 6239-6241.
15. Light on the Tip of a Needle: Plasmonic Nanofocusing

for Spectroscopy on the Nanoscale / S. Berweger, J.M. Atkin, R.L. Olmon, M.B. Raschke // *J. Phys. Chem. Lett.* 2012. Vol. 3. P. 945? 952.

16. Romea R.D., Kimura W.D. Modeling of inverse Cherenkov laser acceleration with axicon laser beam focusing // *Physical Review D*. 1990. Vol. 42, №. 5. P. 1807.
17. Electron acceleration to GeV energy by a radially polarized laser / D. N. Gupta, N. Kant, D. E. Kim, H. Suk // *Physics Letters A*. 2007. Vol. 368. P. 402-407.
18. Вакуумное ускорение электронов релятивистски-сильным остророфокусированным лазерным импульсом радиальной поляризации / С.Г. Бочкарев, К.И. Попов, В.Ю. Быченко // *Физика плазмы*. 2011. Т. 37, №. 7. С. 648-660.
19. Хонина С.Н., Волотовский С.Г. Анализ возможности субволновой локализации света и углубления фокуса высокоапертурной фокусирующей системы при использовании вихревой фазовой функции пропускания // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2010. №. 11. С. 6-25.
20. Хонина С.Н., Волотовский С.Г. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34, №. 1. С. 58-68.
21. Савельев Д.А., Хонина С.Н. Максимизация продольной электрической компоненты при дифракции на бинарном аксиконе линейно-поляризованного излучения // *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36, №. 4. С. 511-517.
22. Sheppard C.J.R. Choudhury A. Annular pupils, radial polarization and superresolution // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43 P. 4322-4327.
23. Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam / K. Kitamura, K. Sakai, S. Noda // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, №. 5. P. 4518-4525.
24. Needles of longitudinally polarized light: guidelines for minimum spot size and tunable axial extent / H. Dehez, A. April, and Michel Piché // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, №. 14, P. 14891-14905.
25. Design of DOE for beam shaping with highly NA focused cylindrical vector beam / Y. Zhao, Q. Zhan, Y.-P. Li // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5636, P. 56-65.
26. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics / H. Wang, L. Shi, B. Lukyanchuk, C. Sheppard, C.T. Chong // *Nature Photonics*. 2008. Vol. 2. P. 501-505.
27. Improvement of lens axicon's performance for longitudinally polarized beam generation by adding a dedicated phase transmittance / K.B. Rajesh, Z. Jaroszewicz, P.M. Anbarasan // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, №. 26. P. 26799-26805.
28. Хонина С.Н., Волотовский С.Г. Исследование применения аксиконов в высокоапертурной фокусирующей системе // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34, №. 1. С. 35-51.
29. Хонина С.Н. Формирование осевого отрезка с уменьшенным поперечным размером для линейной поляризации освещающего пучка с помощью высокоапертурных бинарных аксиконов, не обладающих осевой симметрией // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34, №. 4. С. 461-468.

RESEARCH OF FORMATION OF EXTENDED LIGHT BEAM WITH LONGITUDINAL POLARIZATION USING BINARY AXICON WITH HIGH NUMERICAL APERTURE

© 2014 D.A. Savelyev

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

A numerical simulation of the diffraction of the laser beams on the basis of the finite-difference time-domain extended axial segment was held. We determined the characteristics and features of diffraction on micro-axicon mode Gauss - Laguerre (0.1) with linear and circular polarization. Shown the possibility increase the longitudinal electric field component at the expense of increase the radius of the element and size of the input beam.

Key words: diffractive axicon, sharp focusing, the longitudinal component of the electric field, extended axial segment.

Dmitry Savelyev, Trainee Researcher of Laser Measurements Laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), Post-Graduate Student of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. E-mail: dmitrey.savelyev@yandex.ru