

Преобразование векторного Гауссова пучка аксиконом с субволновым периодом

Д.А. Савельев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной работе рассмотрена дифракция Гауссова пучка с линейной поляризацией на дифракционном аксиконе с числовой апертурой равной 1,5. Численно с помощью метода конечных разностей во временной области исследовано изменение картин дифракции при варьировании высоты рельефа рассматриваемого оптического элемента. Показано, что с помощью дифракционного аксикона можно проводить поляризационные преобразования в ближней зоне.

1. Введение

Оптика ближнего поля (near-field optics) [1-3] является одним из направлений, эффективно используемых для достижения сверхразрешения. В этом случае не имеется каких-либо ограничений на размер светового пятна, так как локализация лазерного излучения может быть сколь угодно малой. Однако, как было показано в работах [4-8], компактность локализации света существенно зависит от размера деталей рельефа поверхности [4-6] или размера острия фокусирующего элемента [7, 8].

Хорошо известно, что аксикон формирует бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности (FWHM) равен $0,36$ длины волны, деленную на числовую апертуру [9], что на 37% меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой (NA).

Из-за наличия в ближней зоне затухающих поверхностных волн можно сформировать фокусное пятно много меньше длины волны, что вызывает интерес при использовании аксиконов для острой фокусировки [10-16]. В частности, в работе [14] было показано значение затухающих волн при фокусировке поля в фокальное пятно значительно меньше дифракционного предела. В работах [15, 16] при использовании модели тонкого оптического элемента рассмотрена фокусировка лазерных пучков аксиконами с числовой апертурой вплоть до $NA = 1,2$.

В данной работе исследуется преобразование векторного Гауссова пучка с помощью бинарного дифракционного аксикона с периодом меньше длины волны в 3D модели. Числовая апертура аксикона равна 1.5. Для численного моделирования дифракции рассматриваемого лазерного излучения используется метод конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием высокопроизводительных вычислений [17], реализованный в программном пакете Meep [18].

2. Преобразование Гауссова пучка дифракционным аксиконом

Параметры моделирования: длина волны λ равна 0,532 мкм., размер вычислительной области по x , y , z – 4 мкм. Толщина поглощающего слоя RML равна 0,7 мкм. В качестве входного лазерного излучения используется фундаментальная Гауссова мода с линейной поляризацией. Показатель преломления аксикона и подложки, в которой выполнен бинарный рельеф, равен $n = 1,7$. Внешний вид рассматриваемого пучка и оптического элемента приведен на рисунке 1. На рисунке 2 показаны продольные сечения при изменении высоты рельефа аксикона h .

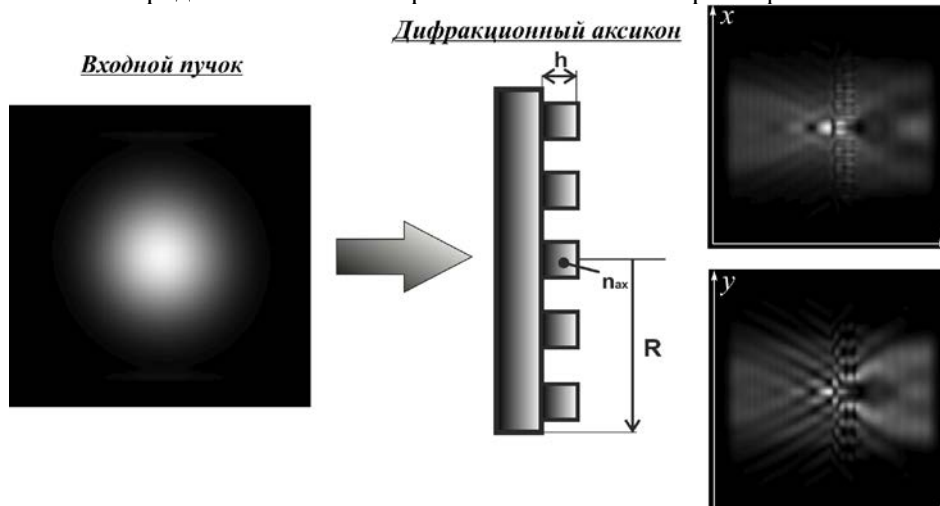


Рисунок 1. Входной пучок и рассматриваемый оптический элемент.

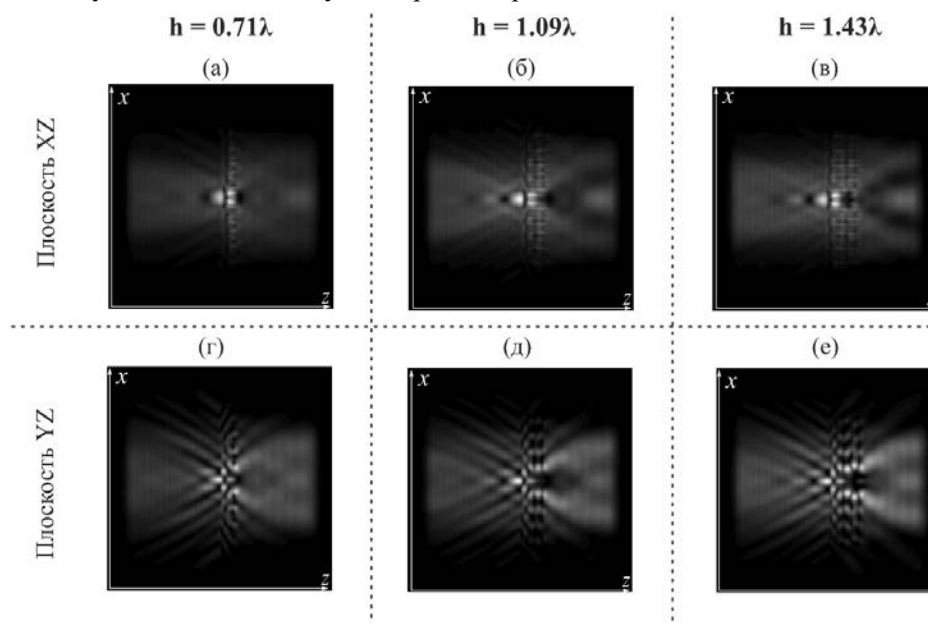


Рисунок 2. Продольные сечения при изменении высоты аксикона h , интенсивность: в плоскости XZ (а) $h = 0.71\lambda$, (б) $h = 1.09\lambda$, (в) $h = 1.43\lambda$; в плоскости YZ (г) $h = 0.71\lambda$, (д) $h = 1.09\lambda$, (е) $h = 1.43\lambda$.

На рисунке 2 высота элемента $h = 0.71\lambda$ – высота рельефа, соответствующая фазовому скачку π радиан, $h = 1.43\lambda$ соответствует фазовому скачку 2π радиан, $h = 1.09\lambda$ – выбранное промежуточное значение высоты. Следует отметить, что при $h < 1.43\lambda$ наблюдается формирование теневого пятна рядом с оптическим элементом.

Рассмотрим покомпонентное разложение общей интенсивности в плоскости XY (поперечное сечение). Результаты численного моделирования для $h = 0.71\lambda$ показаны на рисунке 3, для $h = 1.09\lambda$ приведены на рисунке 4.

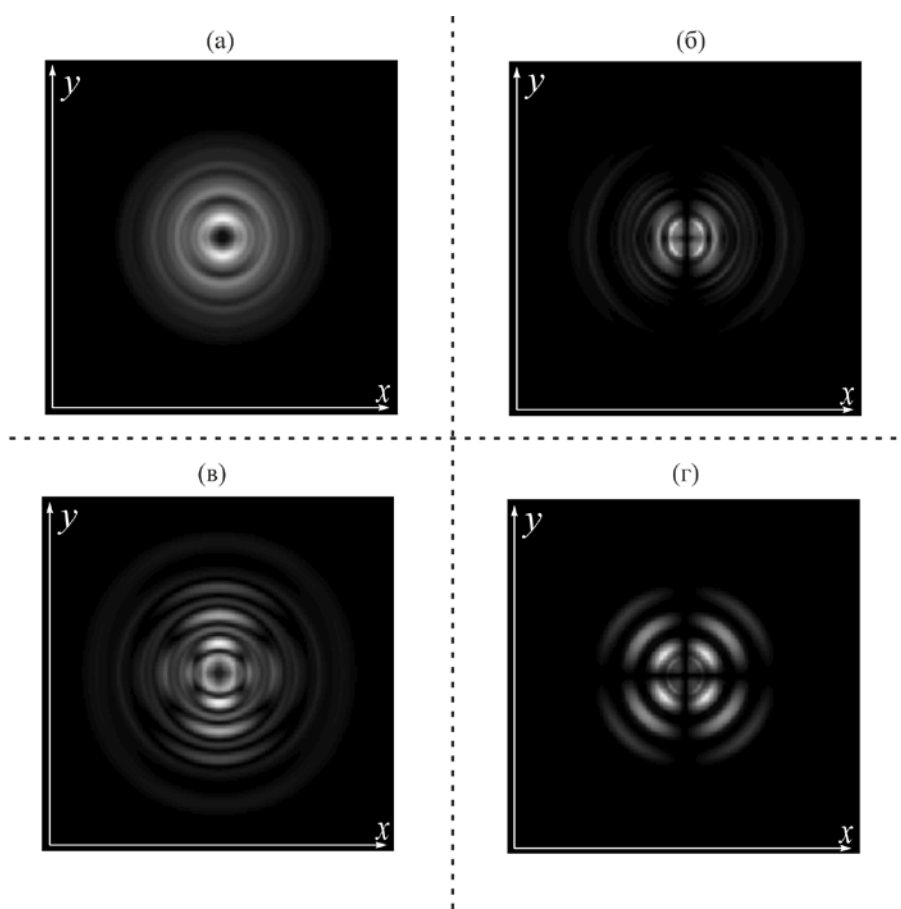


Рисунок 3. Поперечное сечение для случая $h = 0,71\lambda$: (а) общая интенсивность, (б) интенсивность компоненты z , (в) интенсивность компоненты x , (г) интенсивность компоненты y .

На рисунках 3-4 можно наблюдать поляризационные преобразования фундаментальной Гауссовой моды вблизи рассматриваемого оптического элемента. Размер теневого пятна по полуширине по полуспаду интенсивность (FWHM) для случая $h = 1,09\lambda$ больше. Продольная компонента четче выражена.

Как правило, при прохождении линейно-поляризованного поля через аксикон с высокой числовой апертурой происходит некоторое перераспределение энергии в ортогональные компоненты векторного поля. При этом в продольную компоненту поля поступает значительно больше энергии, чем в поперечную компоненту, ортогональную к изначальной поляризации [4, 10–13]. В нашем случае, в продольную компоненту поля пошло меньше энергии, чем в поперечную компоненту. Также стоит отметить, что независимо от высоты рельефа аксикона перераспределение энергии между компонентами электромагнитного поля происходит одинаковым образом.

3. Заключение

В данной работе численно с помощью метода FDTD выполнено сравнительное исследование дифракции Гауссова пучка на аксиконе с субволновым периодом. Проведено исследование влияние на параметры формируемых световых отрезков изменения высоты рассматриваемого оптического элемента. Показано, что с помощью дифракционного аксикона можно проводить поляризационные преобразования в ближней зоне, что, в частности, выражается в формировании теневого пятна рядом с элементом.

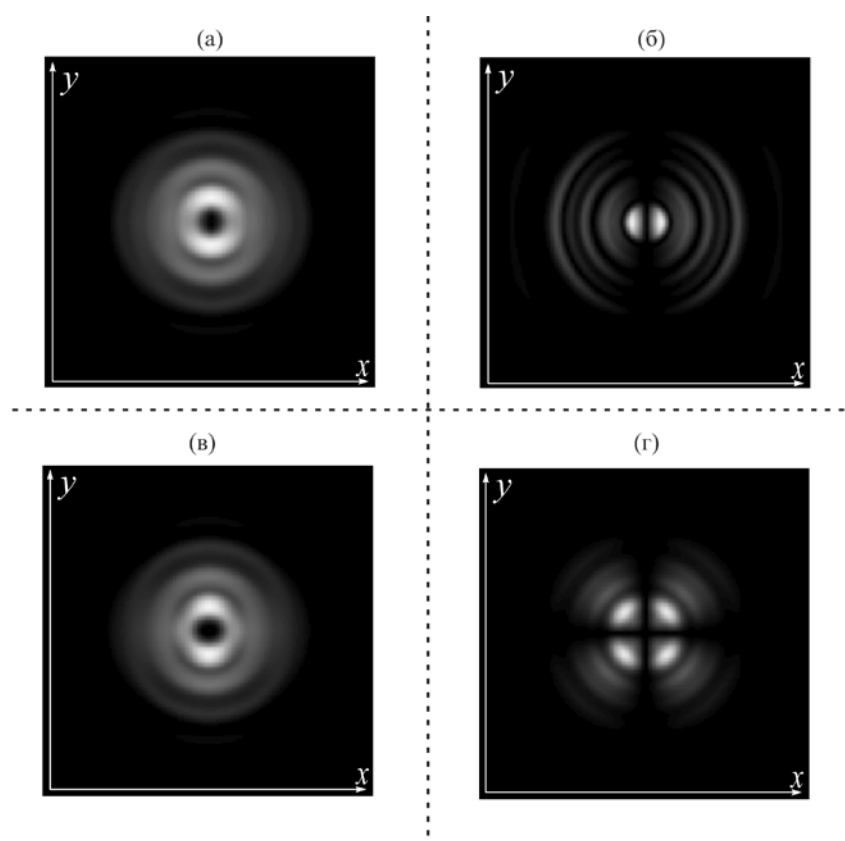


Рисунок 4. Поперечное сечение для случая $h = 1,09\lambda$: (а) общая интенсивность, (б) интенсивность компоненты z , (в) интенсивность компоненты x , (г) интенсивность компоненты y .

4. Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26), в рамках темы НИР № 0026-2018-0104 и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-07-00825, 16-29-11698) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

5. Литература

- [1] Paesler, M.A. Near Field Optics: Theory, Instrumentation and Applications / M.A. Paesler, P.J. Moyer. – New York: Wiley Interscience, 1996.
- [2] Pohl, D.W. Optics at the nanometre scale / D.W. Pohl // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* – 2004. – Vol. 362. – P. 701-717.
- [3] Novotny, L. The History of Near-field Optics / L. Novotny // *Progress in Optics.* – 2007. – Vol. 50(5). – P.137-184.
- [4] Khonina, S.N. Near-field propagation of vortex beams: models and computation algorithms / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.A. Kovalyov, S.G. Volotovskiy // *Optical Memory and Neural Networks.* – 2014. – Vol. 23(2). – P. 50-73. DOI: 10.3103/S1060992X14020027.
- [5] Хонина, С.Н. Острая фокусировка лазерного излучения с помощью двухзонного аксиального микроэлемента / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев, А.В. Устинов // *Компьютерная оптика.* – 2013. – Т. 37, №2. – С. 160-169. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-2-160-169.
- [6] Khonina, S.N. Very compact focal spot in the near-field of the fractional axicon / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // *Optics Communications.* – 2017. – Vol. 391. – P. 24-29. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.12.034.

- [7] Khonina, S.N. Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev, D.A. Savelyev, A.V. Ustinov // *Optics Express*. – Vol. 25(16). – P. 19052-19064. DOI: 10.1364/OE.25.019052.
- [8] Degtyarev, S.A. Singular laser beams nanofocusing with dielectric nanostructures: theoretical investigation / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, A.V. Ustinov, S.N. Khonina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33(12). – P. 2480-2485. DOI: 10.1364/JOSAB.33.002480.
- [9] Kalosha, V.P. Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha, I. Golub // *Optics letters*. – 2007. – Vol. 32(24). – P. 3540-3542. DOI: 10.1364/OL.32.003540.
- [10] Khonina, S.N. Diffraction at binary microaxicons in the near field / S.N. Khonina, P.G. Serafimovich, D.A. Savelyev, I.A. Pustovoi // *Journal of Optical Technology*. – 2012. – Vol. 79(10). – P. 626-631. DOI: 10.1364/JOT.79.000626.
- [11] Khonina, S.N. Narrowing of a light spot at diffraction of linearly-polarized beam on binary asymmetric axicons / S.N. Khonina, D.V. Nesterenko, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2012. – Vol. 21(1). – P. 17-26. DOI: 10.3103/S1060992X12010043.
- [12] Khonina, S.N. High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam / S.N. Khonina D.A. Savelyev // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2013. – Vol. 117(4). – P. 623-630. DOI: 10.1134/S1063776113120157.
- [13] Khonina, S.N. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // *J. Opt.* – 2013. – Vol.15. – P. 085704 (9pp). DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
- [14] Merlin, R. Radiationless electromagnetic interference: evanescent-field lenses and perfect focusing / R. Merlin // *Science*. – 2007. – Vol. 317(5840). – P. 927-929. DOI: 10.1126/science.1143884.
- [15] Котляр, В.В. Моделирование фокусировки линейно-поляризованного света с помощью субволнового бинарного аксикона / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.А. Ковалев, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 183-189.
- [16] Устинов, А.В. Анализ дифракции лазерного излучения на аксиконе с числовой апертурой выше предельной / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 213-222.
- [17] Savelyev, D.A. The calculation of the diffraction of the laser beams with a phase singularity on the micro-axicons with using high-performance computing / D.A. Savelyev, S.N. Khonina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 490(1). – P. 012213. DOI: 10.1088/1742-6596/490/1/012213.
- [18] 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(3). – P. 687-702. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.11.008.

Transformation of a Gaussian vector beam by an axicon with a subwave period

D.A. Savelyev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. We considered the diffraction of a Gaussian beam with linear polarization on a diffraction axicon with a numerical aperture equal to 1.5. Numerically (using the method of finite differences in the time domain) we made a study of the change in diffraction patterns with variations in the height of the relief of the optical element. We shown that using a diffraction axicon it is possible to carry out polarization transformations in the near zone.

Keywords: Gaussian beam, FDTD, polarization transformation, subwavelength diffraction axicon.