

Дифракция Гауссова пучка на градиентной линзе с дробной степенью зависимости от радиуса

Д.А. Савельев^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В данной работе рассмотрена дифракция Гауссова пучка с круговой поляризацией на градиентной микролинзе, состоящей из слоев субволновой толщины, с дробной степенью зависимости от радиуса. Численно с помощью метода конечных разностей во временной области оценены параметры формируемых фокальных отрезков по глубине фокуса и поперечному размеру при изменении параметров рассматриваемой градиентной микролинзы.

Ключевые слова: дифракционная оптика; лазерные пучки; субволновые структуры; градиентная линза; FDTD; круговая поляризация

1. Введение

При передаче информации по оптическим волокнам соединение между волокнами удобнее делать при использовании градиентных элементов [1,2], являющихся предметом изучения градиентной оптики [3]. Обычно такие элементы являются в какой-то мере аналогом линзы, которая формирует короткий фокус. Как правило, используется два градиентных элемента: один на выходе, который рассеивает лазерный пучок и один на входе, который собирает лазерный пучок [4]. Однако требуется достаточно точное их согласование [5,6]. Тем не менее, градиентные линзы имеют ряд преимуществ, из-за плоских поверхностей, что делает их полезными, в том числе при использовании для световой коллимации из волокна [4]. Таким образом, распространение световых лучей по кривой позволяет использовать градиентные элементы для лучшего фокуса [7-10].

Одним из преимуществ использования аксиконов является формирование протяженного фокуса [11,12], в том числе, с субволновым поперечным размером [13,14]. В работе [15] был предложен новый дифракционный оптический элемент (фраксикон) – аксикон, фазовая функция которого представима в виде степенной функции от радиуса. Показатель степени предполагался любым положительным действительным числом, в том числе дробным. Конический аксикон и параболическая линза являются частными случаями фраксикона [16, 17].

Расчет дифракции Гауссова пучка на слоистой линзе, коническом аксиконе и дифракционном аксиконе, согласованных между собой, показал, что слоистая линза с линейным изменением показателя преломления имеет преимущество перед дифракционным аксиконом с той же числовой апертурой, так как позволяет формировать более узкие фокальные отрезки [18,19]. В данной работе рассматриваются особенности фокусировки Гауссова пучка на градиентной линзе с дробной степенью зависимости от радиуса. Для численного моделирования дифракции рассматриваемых лазерных пучков используется метод конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием высокопроизводительных вычислений [20]. В отличие от интегрального расчета распространения полей в параболической среде [21, 22], метод FDTD позволяет учесть слоистый характер рассматриваемой градиентной линзы.

2. Дифракция Гауссова пучка на градиентной линзе

Параметры моделирования: длина волны $\lambda = 1,55$ мкм., размер вычислительной области $x, y, z \in [-4,5\lambda; 4,5\lambda]$. Шаг дискретизации по пространству – $\lambda/21$, шаг дискретизации по времени – $\lambda/(42c)$, где c – скорость света. Толщина поглощающего слоя PML равна $0,65\lambda$. В качестве входного лазерного излучения используется фундаментальная Гауссова мода с круговой поляризацией. Для сравнения дифракции входного пучка на градиентной линзе также рассматривается дифракция Гауссова пучка на дифракционном аксиконе. Показатель преломления для линзы меняется от максимального значения в центре ($n = 3,47$) до минимального ($n = 1,5$) на краю, по следующему закону:

$$N(r) = n_0(1 - \alpha r^\beta), \quad (1)$$

где $n_0 = 3,47$ – значение центрального слоя (максимальное), r – радиус структуры, α, β – варьируемые параметры.

Пусть ширина линзы вдоль оси распространения лазерного пучка будет обозначена как L (зафиксируем размер, $L = 1,55\lambda$). Разность фаз между центральным лучом и лучом, проходящим на расстоянии от центра, для дифракционного аксикона равна:

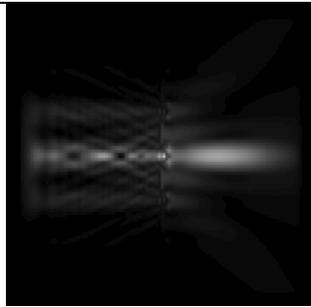
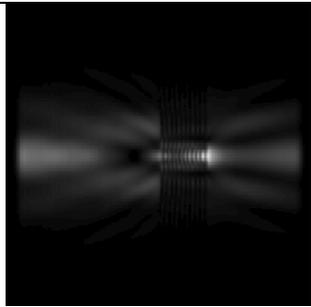
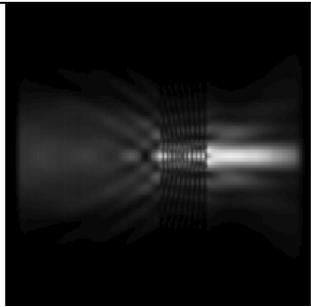
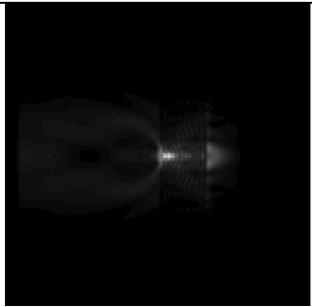
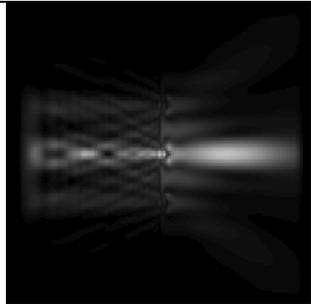
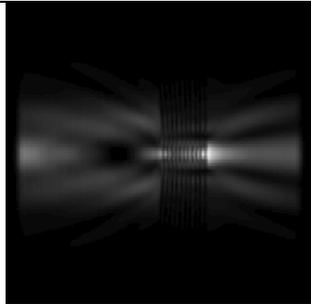
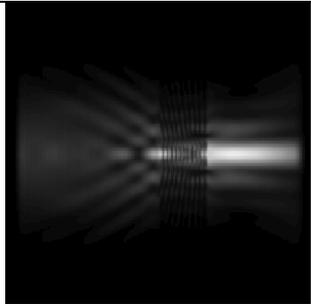
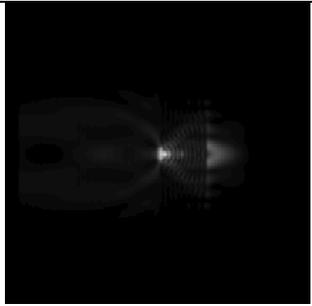
$$\Delta\varphi_{\text{оф}} = -k \cdot NA \cdot R, \quad (2)$$

где NA – числовая апертура аксикона, R – радиус аксикона. Числовая апертура аксикона равна:

$$NA = n_0 L \alpha . \quad (3)$$

Для оценки параметров формируемых фокальных отрезков рассматривается полуширина по полуспаду интенсивности (FWHM) и глубина фокуса (DOF). Численные результаты моделирования (интенсивность) для градиентной линзы и согласованного с ней дифракционного аксикона представлены в таблице 1.

Таблица 1. Дифракция Гауссова пучка на градиентной линзе и дифракционном аксиконе

α	Дифракционный аксикон	Градиентная линза		
		$\beta = 0,5$	$\beta = 1$	$\beta = 1,5$
0,12	 DOF = 3,23λ FWHM = 0,75λ	 DOF = 0,32λ FWHM = 0,46λ	 DOF = 2,85λ FWHM = 0,68λ	 DOF = 0,74λ FWHM = 0,82λ
0,11	 DOF = 2,95λ FWHM = 1,06λ	 DOF = 0,87λ FWHM = 0,56λ	 DOF = 3,2λ FWHM = 0,67λ	 DOF = 0,81λ FWHM = 0,82λ

Для градиентной линзы при $\beta = 0,5$ увеличение α ведет к уменьшению размера фокального пятна при уменьшении длины световой иглы, при $\beta = 1,5$ увеличение α также приводит к уменьшению длины световой иглы, но размер фокального пятна по FWHM остается неизменным.

Следует отметить, что наиболее компактное фокальное пятно было получено для градиентной линзы при $\alpha = 0,12$ и $\beta = 0,5$. Зафиксируем данные параметры и будем варьировать ширину L градиентной линзы. Результаты численного моделирования приведены в таблице 2. Уменьшение ширины линзы в 1,55 раза вызвало увеличение длины светового отрезка в 12 раз.

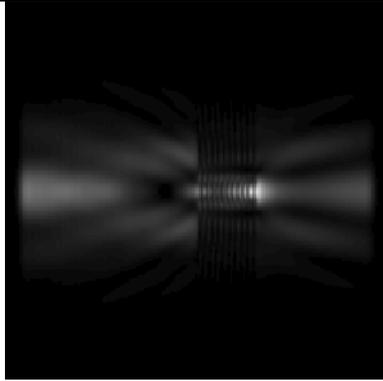
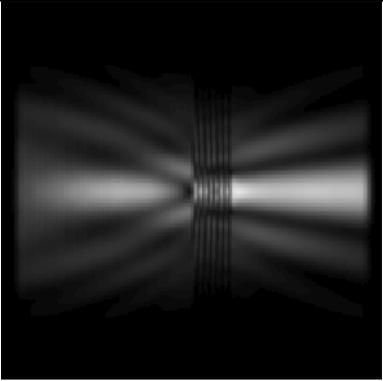
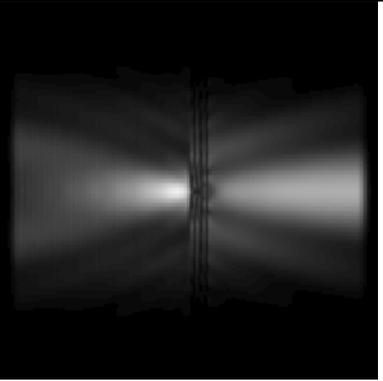
3. Заключение

В данной работе численно с помощью метода FDTD выполнено сравнительное исследование дифракции Гауссова пучка на градиентной микролинзе с дробной степенью зависимости от радиуса и дифракционном аксиконе. Проведено исследование влияние на глубину фокуса и поперечный размер формируемых световых отрезков изменения варьируемых параметров α , β , ширины градиентной линзы L . Показано, что с помощью градиентной линзы можно формировать более узкие фокальные отрезки. Наиболее компактное фокальное пятно для градиентной линзы с дробной степенью зависимости от радиуса было получено при $\alpha = 0,12$, $\beta = 0,5$, $L = 1,55\lambda$.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-07-00825, 16-29-11698) и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Таблица 2. Изменение ширины L градиентной линзы при $\alpha = 0,12$; $\beta = 0,5$

$L = 1,55$	$L = 1$	$L = 0,5$
		
DOF = $0,32\lambda$ FWHM = $0,46\lambda$	DOF = $3,87\lambda$ FWHM = $0,7\lambda$	DOF = $4,04\lambda$ FWHM = $1,7\lambda$

Литература

- [1] Emkey, W. Analysis and evaluation of graded-index fiber lenses / W. Emkey, C. Jack // *Journal of Lightwave Technology*. – 1987. – Vol. 5(9). – P. 1156-1164.
- [2] Chien, H.T. The comparison between the graded photonic crystal coupler and various couplers / H.T. Chien, C. Lee, H.K. Chiu, K.C. Hsu, C.C. Chen, J.A. Ho, C. Cho // *Journal of Lightwave Technology*. – 2009. – Vol. 27(14). – P. 2570-2574.
- [3] Tomlinson, W. J. Applications of GRIN-rod lenses in optical fiber communication systems / W.J. Tomlinson // *Applied Optics*. – 1980. – Vol. 19(7). – P. 1127-1138.
- [4] Tearney, G. J. Scanning single-mode fiber optic catheter–endoscope for optical coherence tomography / G. Tearney, S. Boppart, B. Bouma, M. Brezinski, N. Weissman, J. Southern, J. Fujimoto // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21(7). – P. 543-545.
- [5] Gilsdorf, R. W. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses / R.W. Gilsdorf, J.C. Palais // *Applied Optics*. – 1994. – Vol. 33(16). – P. 3440-3445.
- [6] Kotlyar, M.I. Photonic crystal lens for coupling two waveguides / M.I. Kotlyar, Y.R. Triandaphilov, A.A. Kovalev, V.A. Soifer, M.V. Kotlyar, L. O’Faolain // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48(19). – P. 3722-3730.
- [7] Kurt, H. The focusing effect of graded index photonic crystals / H. Kurt, E. Colak, O. Cakmak, H. Caglayan, E. Ozbay // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 93(17). – P. 171108.
- [8] Котляр, В.В. Моды планарного градиентного гиперболического секансного волновода / В.В. Котляр, А.А. Ковалев, Я.Р. Триандафилов, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34. – №. 2. – С. 146-154.
- [9] Котляр, В.В. Градиентные элементы микрооптики для достижения сверхразрешения / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33. – №. 4. – С. 369-378.
- [10] Savelyev, D.A. Layered lens with a linear dependence of the refractive index change / D.A. Savelyev, A.V. Ustinov, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // XIII International Scientific and Technical Conference on Optical Technologies in Telecommunications. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – P. 98070P-98070P-7.
- [11] McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // *JOSA*. – 1954. – Vol. 44(8). – P. 592-597.
- [12] Durnin, J.E. Diffraction-free beams / J.E. Durnin, Jr J.J. Miceli, J.H. Eberly // *Physical review letters*. – 1987. – Vol. 58. (15). – P. 1499.
- [13] 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.
- [14] 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*. – 2012. – Vol. 21(1). – P. 17-26.
- [15] 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.
- [16] Khonina, S.N. Fractional axicon as a new type of diffractive optical element with conical focal region / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy // *Precision Instrument and Mechanology*. – 2012. - Vol. 2 (4). - P. 132-143.
- [17] Устинов, А.В. Фраксикон как гибридный элемент между параболической линзой и линейным аксиконом / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38. – №. 3. – С. 402-411.
- [18] Savelyev, D.A. Simulation of linear gradient lenses for subwavelength focusing of Gaussian beams / D.A. Savelyev // *Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015), CEUR Workshop Proceedings*. – 2015. – Vol. 1490. – P. 97-104.
- [19] Savelyev, D.A. Diffraction of the Gaussian beam on layered lens and similar a conical and diffraction axicons / D.A. Savelyev // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2016. – Vol. 1638. – P. 117-124.
- [20] 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*. – IOP Publishing, 2014. – Vol. 490(1). – P. 012213.
- [21] Khonina, S.N. Propagation of laser vortex beams in a parabolic optical fiber / S.N. Khonina, A.S. Striletz, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar // *Proceedings of SPIE*. – 2010. - Vol. 7523. – P. 75230B-12p
- [22] Kirilenko, M.S. Propagation of vortex eigenfunctions of bounded Hankel transform in a parabolic fiber / M.S. Kirilenko, O.A. Mossoulina, S.N. Khonina // *IEEE Proceedings of International Conference on Laser Optics*. – 2016. - P. R4-32; DOI: 10.1109/LO.2016.7549787