

Моделирование и исследование формирования спиральных распределений интенсивности помощью дифракционных аксиконов

А.В. Глазкова¹

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

Аннотация. В данной работе мы демонстрируем возможность генерации спиральных спиральных распределений интенсивности с использованием дифракционных аксиконов. Исследуется влияние параметра аксикона α_0 (который фактически является числовой апертурой) и коэффициента m , который описывает порядок вихревой сингулярности.

1. Введение

Формирование спиральных световых пучков имеет важное значение при применении лазерного захвата частиц [1-5], в оптической микроскопии [6, 7], а также при оптической передаче информации [8-15].

Формировать вихревые пучки Бесселя можно с помощью спирального аксикона [16-19], дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [20-22], а также анизотропных оптических элементов [23-26]. Однако в работах, в которых рассматривается формирование данных пучков, подразумевается формирование не самого пучка, а его аппроксимация, т.к. формирование самого пучка не может быть создано, из-за того, что он неограничен и требует бесконечного количества энергии.

Свойства пучков Бесселя делают их чрезвычайно полезными для создания оптического пинцета, так как узкий бесселев пучок будет сохранять свое требуемое свойство компактной локализации излучения на относительно длинном расстоянии даже при частичном экранировании диэлектрическими частицами.

Сочетание аксикона с линзой позволяет не только варьировать поперечный и продольный размер осевого светового отрезка [27-31], но и управлять трехмерным распределением поля вблизи фокальной области [32, 33]

Имеется несколько преимуществ применения фазового аксикона в управлении трехмерным фокальным распределением: во-первых, данный элемент является «полноапертурным», и в отличие от кольцевых диафрагм не приводит к потере энергии, во-вторых, аксикон имеет фокусирующие свойства оптического элемента, и даже «слабый» аксикон увеличивает числовую апертуру используемого объектива [32], в третьих, данный элемент, в отличие от оптимизированных элементов [34-36], требующих высокую точность реализации, имеет простую параметрическую зависимость от величины периода или числовой апертуры. Номер вихревой сингулярности также будет сказываться на распределении поля, особенно в

фокальной плоскости [32, 33, 37]. Исследованию влияния этих двух параметров посвящена данная статья.

2. Моделирование и исследование формирования спиральной интенсивности

Возьмем в качестве оператора, моделирующего действие фокусирующей линзы, преобразование Фурье (1).

$$\iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y)e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy. \tag{1}$$

Во входной плоскости находится аксикон (состоит из двух аксиконов: рассеивающего и собирающего), описывающийся формулой (2).

$$f(r, \varphi) \approx \cos(k\alpha_0 + m\varphi) = 0.5[\exp(-ika_0 - im\varphi) + \exp(ika_0 + im\varphi)], \tag{2}$$

где α_0 – параметр аксикона.

Моделирование выполнялось в пакете Matlab R2014a.

Входной пучок с параметрами $m=2, \alpha_0=0.004$ показан на рисунке 1.



Рисунок 1. Входной пучок.

Затем, рассмотрим влияние параметра аксикона α_0 . Для этого установим параметр $m=4$. Распределение будем смотреть в фокальной плоскости. Результаты показаны в таблице 1.

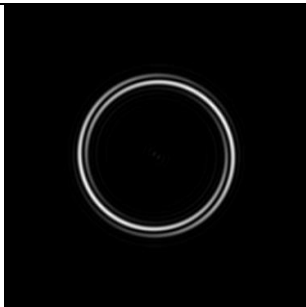
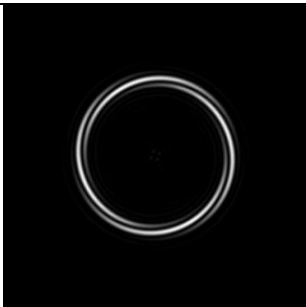
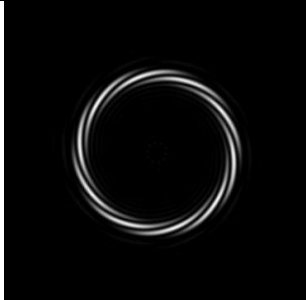
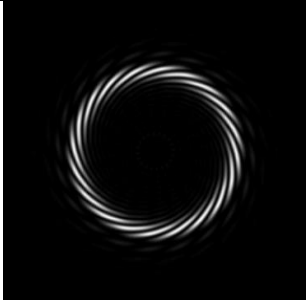
Таблица 1. Влияние параметра аксикона α_0 .

α_0	0.0005	0.001	0.003
α_0			
α_0	0.005	0.008	0.01
α_0			

Мы видим, что чем больше параметр аксикона α_0 , тем больше радиус кольца.

Далее, рассмотрим влияние коэффициента m , который описывает порядок вихревой сингулярности. Для этого установим параметр $\alpha_0=0,005$. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2. Влияние коэффициента m .

m	1	2
		
m	5	10
		

Мы видим, что коэффициент m влияет на количество спиралей в кольце – их $2m$ штук.

3. Заключение

В работе было проведено моделирование формирования спиральных распределений интенсивности, генерируемых в фокальной плоскости линзы с помощью дифракционных аксиконов. Исследовалось влияние параметра аксикона α_0 , который прямо пропорционален радиусу получившегося кольца и коэффициента m , который прямо пропорционален количеству получившихся спиралей на кольце.

4. Литература

- [1] Garcés-Chávez, V. Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle / V. Garcés-Chávez, K. Volke-Sepulveda, S. Chávez-Cerda, W. Sibbett, K. Dholakia // *Phys. Rev. A.* – 2002. – Vol. 66. – P. 063402.
- [2] Filkin, V.V. Micro-object manipulation by laser beams with nonzero orbital momentum / V.V. Filkin, S.N. Khonina, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, M.A. Rakhmatulin, V.G. Volostnikov, V.V. Yakutkin // *Proceedings of SPIE.* – 2003. – Vol. 5129. – P. 140-146.
- [2] Соيفер, В.А. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой / В.А. Соифер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.
- [4] Khonina, S.N. Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics.* – 2004. – V. 51(14). – P. 2167-2184.
- [5] Khonina, S.N. DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Turunen // *Proceedings of SPIE.* – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
- [6] Török, P. The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy / P. Török, P.R.T. Munro // *Opt. Express.* – 2004. – Vol. 12. – P. 3605-3617.

- [7] Khonina, S.N. How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy / S.N. Khonina, I. Golub // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2012. – Vol. 29(10). – P. 2242-2246. DOI: 10.1364/JOSAA.29.002242.
- [8] Gbur, G. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation / G. Gbur, R.K. Tyson // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2008. – Vol. 25. – P. 225-230. DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
- [9] Wang, T. Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere / T. Wang, J. Pu, Z. Chen // *Optics Communications.* – 2009. – Vol. 282(7). – P. 1255-1259. DOI: 10.1016/j.optcom.2008.12.027.
- [10] Malik, M. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding / M. Malik, M. O'Sullivan, B. Rodenburg, M. Mirhosseini, J. Leach, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, R.W. Boyd // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20(12). – P. 13195-13200. DOI: 10.1364/OE.20.013195.
- [11] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbit angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A.E. Willner // *Nature Photonics.* – 2012. – Vol. 6. – P. 488-496.
- [12] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shechepakina // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [13] Porfirev, A.P. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics.* – 2017. – Vol. 56(11). – P. E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [14] Kirilenko, M.S. Comparison of propagation of vortex and non-vortex laser beams in a random medium / M.S. Kirilenko, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Proceedings of SPIE.* – 2017. – Vol. 10342. – P. 103420B. DOI: 10.1117/12.2270658.
- [15] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Parandin // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [16] Dyson, J. Circular and spiral diffraction gratings / J. Dyson // *Proc. Royal Soc. A.* – 1958. – Vol. 248. – P. 93-106.
- [17] Qiong-Ge, S. Generalization and propagation of spiraling Bessel beams with a helical axicon / S. Qiong-Ge, Z. Ke-Ya, F. Guang-Yu, L. Zheng-Jun and L. Shu-Tian // *Chinese Physics B.* – 2012. – Vol. 21(1). – P. 014208.
- [18] Дегтярев, С.А. Формирование спиральной интенсивности бинарным вихревым аксиконом / С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина, В.В. Подлипов // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 237-242.
- [19] Degtyarev, S.A. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Applied Optics.* – 2016. – Vol. 55(12). – P. B44-B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
- [20] Vasara, A. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms / A. Vasara, J. Turunen, A.T. Friberg // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1989. – Vol. 6. – P. 1748-1754.
- [21] Khonina, S.N. Bessel-mode formers / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar // *Proceedings of SPIE.* – 1994. – Vol. 2363. – P. 184-190.
- [22] Khonina, S.N. Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Optik.* – 1999. – Vol. 110(3). – P. 137-144.
- [23] Khilo, N.A. Transformation of the order of Bessel beams in uniaxial crystals / N.A. Khilo, A.A. Ryzhevich, E.S. Petrova // *Quantum Electron.* – 2001. – Vol. 31(1). – P. 85-89.
- [24] Ciattoni, A. Circularly polarized beams and vortex generation in uniaxial media / A. Ciattoni, G. Cincotti, C. Palma // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2003. – Vol. 20(1). – P. 163-171.
- [25] Fadeyeva, T.A. Extreme spin–orbit coupling in crystal traveling paraxial beams / T.A. Fadeyeva, A.V. Volyar // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – Vol. 27. – P. 381-389.

- [26] Khonina, S.N. Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal / S.N. Khonina, A.A. Morozov, S.V. Karpeev // *Laser Phys.* – 2014. – Vol. 24. – P. 056101. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
- [27] Koronkevich, V. P. Lensacon / V. P. Koronkevich, I. A. Mikhaltsova, E.G. Churin [et al.] // *Applied Optics.* – 1993. – Vol. 34(25). – P. 5761-5772.
- [28] Parigger, C. Spherical aberration effects in lens axicon doublets: theoretical study / C. Parigger, Y. Tang, D.H. Plemmons [et al.] // *Applied Optics.* – 1997. – Vol. 36(31). – P. 8214-8221.
- [29] 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.
- [30] Хонина, С.Н. Линзакон: непараксиальные эффекты / С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, А.В. Устинов, С.Г. Волотовский // *Оптический журнал.* – 2011. – Т. 78, № 11. – С. 44-51.
- [31] Казанский, Н.Л. Анализ эффектов непараксиальности в линзаконных оптических системах / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина // *Автоматрия.* – 2017. – Т. 5. – С. 78-89. DOI: 10.15372/AUT20170508.
- [32] Хонина, С.Н. Исследование применения аксиконов в высокоапертурной фокусирующей системе / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 35-51.
- [33] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B.* – 2018. Vol. 124. – P. 191-203. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [34] Jabbour, T.G. Vector diffraction analysis of high numerical aperture focused beams modified by two- and three-zone annular multi-phase plates / T.G. Jabbour, S.M. Kuebler // *Optics Express.* – 2006. – Vol. 14(3). – P. 1033-1043.
- [35] Gao, X. Focusing properties of concentric piecewise cylindrical vector beam // X. Gao, J. Wang, H. Gu, W. Xu // *Optik.* – 2007. – Vol. 118. – P. 257-265.
- [36] Wang, H. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics / H. Wang, L. Shi, B. Lukyanchuk, C. Sheppard, C.T. Chong // *Nat. Photonics.* – 2008. – Vol. 2. – P. 501-505.
- [37] Choporova, Yu.Yu. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu.Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, V.S. Pavelyev, M.A. Scheglov, N.A. Vinokurov, B.O. Volodkin, V.N. Zhabin // *Physical Review.* – 2017. – Vol. A 96. – P. 023846.

Simulation and study of the formation of a spiral intensity distribution using diffraction axicons

A.V. Glazkova¹

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

Abstract. In this paper, we demonstrate the possibility of generating a spiral intensity distribution using diffractive axicons. The effect of the axicon parameter α_0 (which is actually a numerical aperture) and the coefficient m , which describes the order of the vortex singularity, are investigated.