

## ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЁТ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗОНДОМ

С.А. Дегтярев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

### Аннотация

В работе с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном пакете Comsol, выполнен трёхмерный расчёт фокусировки ТЕ-поляризованного Гауссова пучка с помощью конических диэлектрических зондов (тейперов) с малым углом при вершине от 8 до 27 градусов. Результаты расчётов показали, что в трёхмерной модели, равно как и в двумерной, конический зонд при малых изменениях угла при вершине может вместо фокусирующего становиться рассеивающим и наоборот. Однако интервалы значений углов раскрытия, обеспечивающие тейперу фокусирующие или рассеивающие свойства, в двумерном и трёхмерном случае отличаются друг от друга. Показано, что период перехода от фокусировки к рассеянию у трёхмерного тейпера примерно в два раза больше, чем у двумерного.

**Ключевые слова:** конический диэлектрический зонд, полное внутреннее отражение, действительный и мнимый фокусы, метод конечных элементов.

**Цитирование:** Дегтярев, С.А. Трёхмерный расчёт фокусировки лазерного излучения коническим диэлектрическим зондом / С.А. Дегтярев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 588-593. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-588-593.

### Введение

Простейший конический диэлектрический зонд представляет собой кусок оптического волокна, конически вытянутого с одной стороны [1].

Заметим, что угол при вершине таких конусов значительно меньше угла полного внутреннего отражения [2, 3], и, в отличие от рефракционных аксикон [4, 5], эти конусы не предназначены для формирования бездифракционных световых пучков с протяжённой глубиной фокуса [6, 7].

Конические зонды с малыми углами при вершине широко используются в оптике ближнего поля [1, 8–13]. Как правило, такие зонды покрыты тонким слоем металла и могут иметь или не иметь апертурное окно – зависит от способа применения такого зонда. Разрешение ближнепольного микроскопа в этом случае зависит, соответственно, от размера апертуры или кончика зонда, которые имеют наномасштабные характеристики. Такие структуры можно использовать для острой фокусировки [9, 11, 12], но энергетическая эффективность будет очень малой [14].

Для таких приложений, как субволновое микроstructuring поверхности, желательно увеличить долю пропускаемой энергии, не слишком ухудшая разрешение. В этом случае используют диэлектрические тейперы без покрытия с очень маленьким углом [15, 16]. Аналогичные устройства применяют для захвата и перемещения микрочастиц [17].

В работе [18] в рамках геометрикооптического анализа было показано, что аксиконы с малыми углами могут как фокусировать, так и создавать расходящееся излучение. Формирование действительного и мнимого фокусов периодически меняется при уменьшении угла при вершине. Причем для меньших углов эта смена происходит быстрее. Изменение угла на доли градусов приводит к существенному изменению картины. В этой же работе было выполнено двумерное моделирование с использованием метода конеч-

ных элементов, подтвердившее теоретические результаты.

Хотя двумерная модель иногда используется для расчётов распространения излучения в тейперах [19], более корректно выполнять трёхмерное моделирование [20], особенно при необходимости учёта поляризационных эффектов [21–24].

В данной работе с использованием метода конечных элементов (FEM) решения уравнения Гельмгольца выполнен расчёт фокусировки ТЕ-поляризованного Гауссова пучка с помощью диэлектрических микрорасходящих зондов с углом при вершине от 8 до 27 градусов.

### Численное моделирование

В работе [18] рассмотрена дифракция Гауссовых пучков на рефракционном аксиконе в случае, когда угол аксикона значительно меньше предельного, соответствующего полному внутреннему отражению. Данная особенность интересна тем, что обычно считается, что при малом угле раскрытия аксикон не пропускает падающее излучение. Однако в [18] было показано, что при малых углах раскрытия в аксиконе происходит несколько полных внутренних отражений и аксикон может являться как фокусирующим, так и рассеивающим и коллимирующим. Получены следующие формулы.

**Фокусировка** будет наблюдаться в узких диапазонах углов раскрытия аксикона  $\alpha_0$ , определяемых неравенствами:

$$\alpha_{\min}^{\text{real}} < \alpha_0 < \alpha_{\max}^{\text{real}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\max}^{\text{real}}$  находится из равенства:

$$n \cos \left[ (2p+1)\alpha_{\max}^{\text{real}} \right] = \cos \left( \alpha_{\max}^{\text{real}} \right), \quad (1a)$$

а  $\alpha_{\min}^{\text{real}}$  определяется из выражения:

$$n \cos \left[ (2p+1)\alpha_{\min}^{\text{real}} \right] = 1. \quad (1б)$$

Выражения (1a), (1б) дают границы при  $p$ -кратном внутреннем отражении,  $p \leq 1$ .

**Расфокусировка** при  $p$ -кратном внутреннем отражении будет наблюдаться в более широких диапазонах углов, определяемых неравенствами:

$$\alpha_{\min}^{app} < \alpha_0 < \alpha_{\max}^{app}, \quad (2)$$

$$\text{где } n \cos[(2p-1)\alpha_{\max}^{app}] = 1, p \geq 2, \quad (2a)$$

$$n \cos[(2p+1)\alpha_{\min}^{app}] = \cos(\alpha_{\min}^{app}), p \geq 1. \quad (2б)$$

Ход лучей, рассмотренный в [18], приведён на рис. 1.

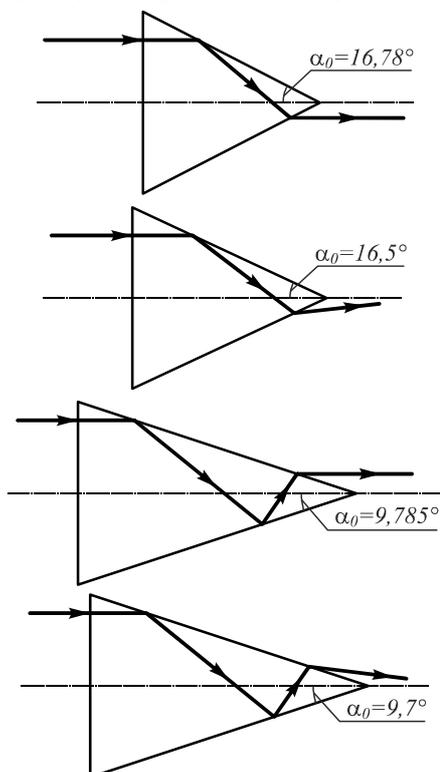


Рис. 1. Ход лучей при  $\alpha_0 = 16,78^\circ; 16,5^\circ; 9,785^\circ; 9,7^\circ$  (взято из [18])

Однако необходимо отметить, что геометрический подход, примененный в [18], не учитывает поляризации, коэффициентов Френеля, волновой природы света. Другой подход в [18], основанный на решении стационарных уравнений Максвелла, был применен только для двумерного цилиндрического случая. То есть фактически рассматривалась дифракция на клине бесконечной длины, а не на аксиконе. В настоящей статье рассмотрена дифракция на трёхмерном аксиконе. Общий вид схемы моделирования приведён на рис. 2.

Исходя из формул (1) и (2), а также расчётов статьи [18] в волновом случае, можно утверждать, что трёхмерный аксикон может быть рассеивающим, коллимирующим и фокусирующим при разных углах раскрытия.

В работе проведён расчёт дифракции Гауссова пучка на трёхмерном аксиконе при вариации угла раскрытия  $\alpha_0$  от 8 до 27 градусов. Картины дифракции представлены в табл. 1. Длина волны выбрана равной  $\lambda = 532$  нм. Высота аксикона равна  $7\lambda$ , радиус основания варьируется от  $0,984\lambda$  до  $3,567\lambda$  и определяется углом раскрытия аксикона. На рис. 3 приведено два гра-

фика зависимости амплитуды электрического поля на оптической оси после аксикона в двумерном случае (взято из [18]) и в трёхмерном случае (расчитано в настоящей работе) от угла раскрытия аксикона  $\alpha_0$ .

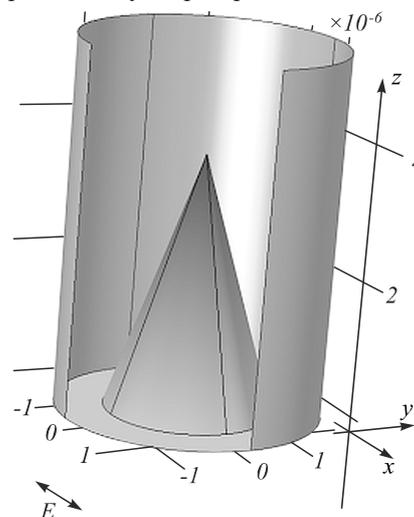


Рис. 2. Общий вид трёхмерной расчётной области: стеклянный аксикон (показатель преломления  $n = 1,5$ ), размещенный в вакууме (показатель преломления  $n = 1$ )

Можно видеть, что при дифракции Гауссова пучка на трёхмерном аксиконе и двумерном клине данные элементы ведут себя сходным образом в смысле возникновения максимумов и минимумов интенсивности на оси. Но при одинаковых значениях угла раскрытия у двумерного и трёхмерного аксикона могут наблюдаться противоположные действия: так, при  $\alpha_0 = 14^\circ$  у клина наблюдается минимум интенсивности, а у аксикона – максимум.

Анализ поведения графиков на рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что у трёхмерного аксикона период перехода от фокусировки к расфокусировке примерно в два раза больше, чем у двумерного.

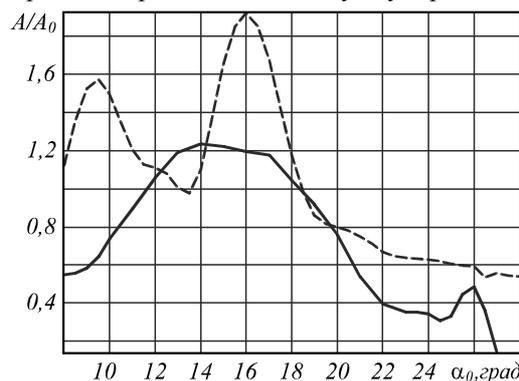


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды электрического поля на оптической оси после аксикона от угла раскрытия аксикона  $\alpha_0$  в двумерном случае (пунктирная линия) и в трёхмерном случае на расстоянии  $1,65$  длин волн (сплошная линия) от острия аксикона

На рис. 4 показаны картины дифракции на трёхмерном аксиконе (рис. 4а, в) и двумерном клине (рис. 4б, г) в сечении ZOY при двух углах раскрытия:  $\alpha_0 = 14^\circ$  (рис. 4а, б),  $\alpha_0 = 24,5^\circ$  (рис. 4в, г). Размер приведённых картин на рис. 4а составляет  $10\lambda \times 7,2\lambda$ , на

рис. 4в –  $10\lambda \times 8\lambda$ , на рис. 4б –  $20\lambda \times 10\lambda$ , 4г –  $20\lambda \times 11\lambda$ . Освещающий Гауссов пучок имел Х-поляризацию.

Из рис. 4 следует, что трёхмерный аксикон может быть как рассеивающим (при  $\alpha_0 = 24,5^\circ$ ), так и фокусирующим (при  $\alpha_0 = 14^\circ$ ). Следовательно, выводы, полученные для двумерного случая на основе геометрического и волнового подходов, вполне экстраполируются и на трёхмерную модель.

Для наглядности покажем на рис. 5 распределения амплитуды электрического поля в поперечном сечении на расстоянии  $1,65$  длины волны от острия аксикона для углов  $\alpha_0 = 14^\circ$ ,  $\alpha_0 = 24,5^\circ$ .

Из рис. 5 видно, что при прохождении излучения через аксикон с углом раскрыва  $\alpha_0 = 14^\circ$  основная энергия сконцентрирована у оптической оси, а при  $\alpha_0 = 24,5^\circ$  – основная энергия распродоточивается по периферии.

Табл. 1. Распределения амплитуды электрического поля для диапазона углов аксикона  $\alpha_0 \in [8^\circ; 27^\circ]$ , показатель преломления аксиконов  $n = 1,5$ , длина волны излучения  $\lambda = 532$  нм, высота аксиконов – 7 длин волн

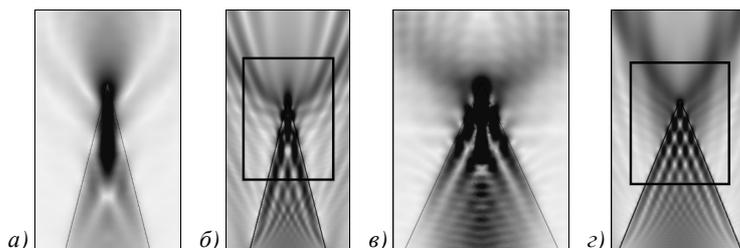
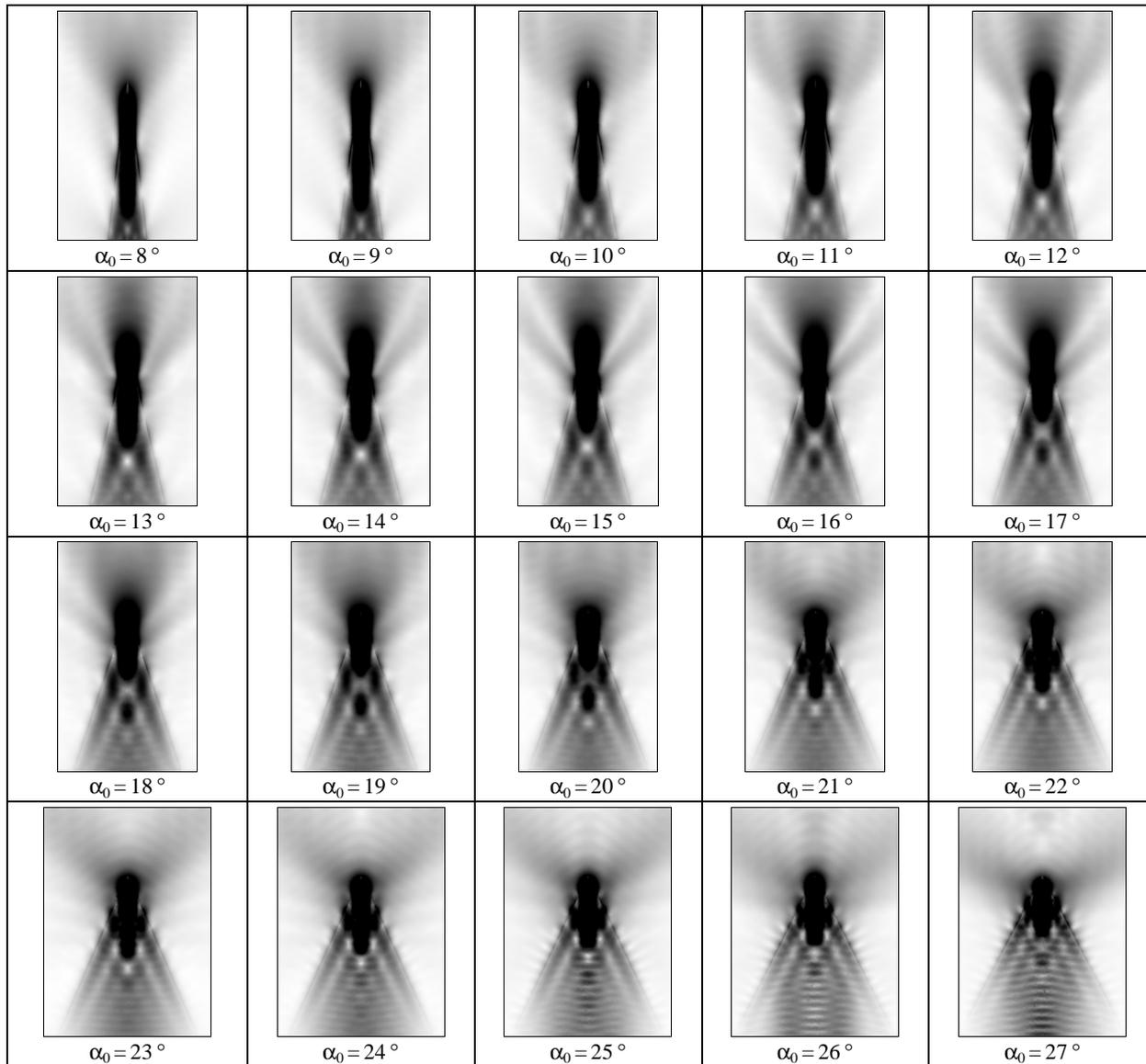


Рис. 4. Картина дифракции Гауссова пучка на трёхмерном аксиконе (а, в) и на двумерном клине (б, г) в сечении ZOY при угле раскрыва  $\alpha_0 = 14^\circ$  (а, б) и  $\alpha_0 = 24,5^\circ$  (в, г).

Размер приведённых картин составляет  $10\lambda \times 7,2\lambda$  (а),  $10\lambda \times 8\lambda$  (в),  $20\lambda \times 10\lambda$  (б),  $20\lambda \times 11\lambda$  (г)

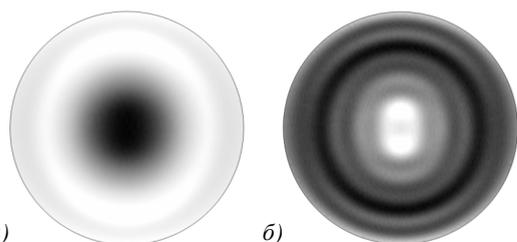


Рис. 5. Распределение амплитуды электрического поля в поперечном сечении на расстоянии  $1,65$  длины волны от острия аксикона при освещении основания Гауссовым пучком при угле раскрыва  $\alpha_0 = 14^\circ$  (а) и  $\alpha_0 = 24,5^\circ$  (б). Радиус расчётной области составляет  $4\lambda$

### Заключение

Рассмотрено действие конического диэлектрического зонда в трёхмерной модели при прохождении через него Гауссова пучка. Рассчитаны картины дифракции при вариации угла раскрыва конуса от  $8$  до  $27$  градусов.

Показано, что трёхмерный зонд с углом раскрыва  $\alpha_0 = 14^\circ$  является фокусирующим, а при  $\alpha_0 = 24,5^\circ$  – рассеивающим. Однако необходимо отметить, что в двумерном случае аксикон с углом раскрыва  $\alpha_0 = 14^\circ$  является рассеивающим.

Анализ дифракции Гауссова пучка на диэлектрическом тейпере в двумерном и трёхмерном случаях позволяет сделать вывод о том, что у трёхмерного аксикона период перехода от фокусировки к рассеянию излучения примерно в два раза больше, чем у двумерного.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, а также грантов РФФИ 16-37-00241, 16-07-00825.

### Литература

- Novotny, L. Principles of Nano-Optics / L. Novotny, B. Hecht. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – DOI: 10.1017/CBO9780511813535. – 539 p.
- Zhu, B. Inexpensive and easy fabrication of multi-mode tapered dielectric circular probes at millimeter wave frequencies / B. Zhu, J. Stiens, V. Matvejev, R. Vounckx // Progress In Electromagnetics Research. – 2012. – Vol. 126. – P. 237-254. – DOI: 10.2528/PIER12010203.
- Устинов, А.В. Расчёт комплексной функции пропускания рефракционных аксиконов / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 480-490.
- McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // Journal of the Optical Society of America. – 1954. – Vol. 44(8). – P. 592-597. – DOI: 10.1364/JOSA.44.000592.
- Jaroszewicz, Z. Axicon – the most important optical element / Z. Jaroszewicz, A. Burvall, A.T. Friberg // Optics & Photonics News. – 2005. – Vol. 16(4). – P. 34-39. – DOI: 10.1364/OPN.16.4.000034.
- Durnin, J. Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, Jr., J.H. Eberly // Physical Review Letters. – 1987. – Vol. 58. – P. 1499-1501. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
- McGloin, D. Bessel beams: diffraction in a new light / D. McGloin, K. Dholakia // Contemporary Physics. – 2005. – Vol. 46, Issue 1. – P. 15-28. – DOI: 10.1080/0010751042000275259.
- Denk, W. Near-field optics: microscopy with nanometer-size fields / W. Denk and D. W. Pohl // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. – 1991. – Vol. 9, Issue 2. – P. 510-513. – DOI: 10.1116/1.585558.
- Babadjanian, A.J. Superfocusing of surface polaritons in the conical structure / A.J. Babadjanyan, N.L. Margaryan, Kh.V. Nerkararyana // Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 87(8). – P. 3785-3788. – DOI: 10.1063/1.372414.
- Goncharenko, A.V. Electric near-field enhancing properties of a finite-size metal conical nano-tip / A.V. Goncharenko, H.-C. Chang, J.-K. Wang // Ultramicroscopy. – 2007. – Vol. 107, Issues 2-3. – P. 151-157. – DOI: 10.1016/j.ultramicro.2006.06.004.
- Antosiewicz, T.J. Nanofocusing of radially polarized light with dielectric-metal-dielectric probe / T.J. Antosiewicz, P. Wróbel, T. Szoplik // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, Issue 11. – P. 9191-9196. – DOI: 10.1364/OE.17.009191.
- Choo, H. Nanofocusing in a metal-insulator-metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper / H. Choo, M.-K. Kim, M. Staffaroni, T.J. Seok, J. Bokor, S. Cabrini, P.J. Schuck, M.C. Wu, E. Yablonovitch // Nature Photonics. – 2012. – Vol. 6, Issue 12. – P. 838-844. – DOI: 10.1038/nphoton.2012.277.
- Berweger, S. 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 // Journal of Physical Chemistry Letters. – 2012. – Vol. 3, Issue 7. – P. 945-952. – DOI: 10.1021/jz2016268.
- Stockle, R.M. Brighter near-field optical probes by means of improving the optical destruction threshold / R.M. Stockle, N. Schaller, V. Deckert, C. Fokas, R. Zenobi // Journal of Microscopy. – 1999. – Vol. 194(2-3). – P. 378-382. – DOI: 10.1046/j.1365-2818.1999.00524.x.
- Kuchmizhak, A.A. Optical apertureless fiber microprobe for surface laser modification of metal films with sub-100 nm resolution / Aleksandr A. Kuchmizhak, Yuri N. Kulchin, Oleg B. Vitrik, Andrey G. Savchuk, Sergey V. Makarov, Sergey I. Kudryashov, Andrey A. Ionin // Optics Communications. – 2013. – Vol. 308. – P. 125-129. – DOI: 10.1016/j.optcom.2013.06.051.
- Yakunin, S. Microgrinding of lensed fibers by means of a scanning-probe microscope setup / S. Yakunin, J. Heitz // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, Issue 32. – P. 6172-6177. – DOI: 10.1364/AO.48.006172.
- Mohanty, S.K. Organization of microscale objects using a microfabricated optical fiber / S.K. Mohanty, K.S. Mohanty, M.W. Berns // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33(18). – P. 2155-2157. – DOI: 10.1364/OL.33.002155.
- Устинов, А.В. Дифракция на аксиконе с учётом нескольких внутренних отражений / А.В. Устинов, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 500-507. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-500-507.
- De, A. Numerical analysis of two dimensional tapered dielectric waveguide / A. De, G.V. Attimarad // Progress In Electromagnetics Research. – 2004. – Vol. 44. – P. 131-142. – DOI: 10.2528/PIER03062001.
- Degtyarev, S.A. Transmission of focused light signal through an apertured probe of a near-field scanning microscope / S.A. Degtyarev, S.N. Khonina // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – Vol. 25(2). – P. 306-313. – DOI: 10.1134/S1054661815020078.
- 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.
- 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 // Journal of Optics. – 2013. – Vol. 15(8). – 085704 (9 pp). – DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
23. **Alferov, S.V.** Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate / S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(4). – P. 802-807. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
24. **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: 10.1364/JOT.83.000197.

#### Сведения об авторе

**Дегтярев Сергей Александрович**, аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, стажёр-исследователь ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: волновая оптика. E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com).

ГРПТИ 29.31.15

Поступила в редакцию 19 августа 2016 г. Окончательный вариант – 26 августа 2016 г.

### 3D SIMULATION OF FOCUSING A LASER BEAM BY A DIELECTRIC CONICAL MICROAXICON

S.A. Degtyarev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of the RAS –  
Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,  
<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

#### Abstract

In this work, using a finite element method implemented we simulate in the Comsol software focusing a TE-polarized Gaussian beam by 3D dielectric conical microaxicon tapers with smaller-than-30-degrees vertex angles. The simulation results have shown that, as is the case with the 2D axicons, with minor changes in a vertex angle, the 3D axicon can alternatively show either focusing or defocusing properties. However, the angle intervals in which the 2D and 3D axicons show focusing or defocusing properties are different.

**Keywords:** dielectric conical axicon, total internal reflection (TIR), real and imaginary focus, finite element method.

**Citation:** Degtyarev SA. 3D simulation of focusing a laser beam by a dielectric conical microaxicon. Computer Optics 2016, 40(4): 588-593. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-588-593.

**Acknowledgement:** This work was financially supported by the RF Ministry of Education and Science and by the Russian Foundation for Basic Research (grants ## 16-37-00241, 16-07-00825).

#### References

- [1] Novotny L, Hecht B. Principles of Nano-Optics. Cambridge: Cambridge University Press; 2006. DOI: 10.1017/CBO9780511813535.
- [2] Zhu B, Stiens J, Matvejev V, and Vounckx R. Inexpensive and easy fabrication of multi-mode tapered dielectric circular probes at millimeter wave frequencies. Progress In Electromagnetics Research 2012; 126: 237-254. DOI: 10.2528/PIER12010203.
- [3] Ustinov AV, Khonina SN. Calculating the complex transmission function of refractive axicons. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) 2012; 21(3): 133-144. DOI: 10.3103/S1060992X1203006X.
- [4] McLeod JH. The axicon: a new type of optical element. J Opt Soc Am 1954; 44: 592-597. DOI: 10.1364/JOSA.44.000592.
- [5] Jaroszewicz Z, Burvall A, Friberg AT. Axicon – the most important optical element. Optics & Photonics News 2005; 16(4): 34-39. DOI: 10.1364/OPN.16.4.000034.
- [6] Durin J, Miceli JJ Jr, Eberly JH. Diffraction-free beams. Physical Review Letters 1987; 58: 1499-1501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
- [7] McGloin D, Dholakia K. Bessel beams: diffraction in a new light. Contemporary Physics 2005; 46(1): 15-28. DOI: 10.1080/0010751042000275259.
- [8] Denk W, Pohl DW. Near-field optics: microscopy with nanometer-size fields. J Vac Sci Technol 1991; 9(2): 510-513. DOI: 10.1116/1.585558.
- [9] Babadjanian AJ, Margaryan NL, Nerkararyana KhV. Superfocusing of surface polaritons in the conical structure. J Appl Phys 2000; 87(8): 3785-3788. DOI: 10.1063/1.372414.
- [10] Goncharenko AV, Chang H-C, Wang J-K. Electric near-field enhancing properties of a finite-size metal conical nano-tip. Ultramicroscopy 2007; 107(2-3): 151-157. DOI: 10.1016/j.ultramic.2006.06.004.
- [11] Antosiewicz TJ, Wróbel P, Szoplik T. Nanofocusing of radially polarized light with dielectric-metal-dielectric probe. Optics Express 2009; 17(11): 9191-9196. DOI: 10.1364/OE.17.009191.
- [12] Choo H, Kim M-K, Staffaroni M, Seok TJ, Bokor J, Cabrini S, Schuck PJ, Wu MC, Yablonovitch E. Nano-focusing in a metal-insulator-metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper. Nature Photonics 2012; 6(12): 838-844. DOI: 10.1038/nphoton.2012.277.
- [13] Berweger S, Atkin JM, Olmon RL, Raschke MB. Light on the tip of a needle: plasmonic nanofocusing for spectroscopy on the nanoscale. J Phys Chem Lett 2012; 3(7): 945-952. DOI: 10.1021/jz2016268.

- [14] Stockle RM, Schaller N, Deckert V, Fokas V, Zenobi R. Brighter near-field optical probes by means of improving the optical destruction threshold. *Journal of Microscopy* 1999; 194(2-3): 378-382. DOI: 10.1046/j.1365-2818.1999.00524.x.
- [15] Kuchmizhak AA, Kulchin YN, Vitrik OB, Savchuk AG, Makarov SV, Kudryashov SI, Ionin AA. Optical apertureless fiber microprobe for surface laser modification of metal films with sub-100 nm resolution. *Optics Communications* 2013; 308: 125-129. DOI: 10.1016/j.optcom.2013.06.051.
- [16] Yakunin S, Heitz J. Microgrinding of lensed fibers by means of a scanning-probe microscope setup. *Applied Optics* 2009; 48(32): 6172-6177. DOI: 10.1364/AO.48.006172.
- [17] Mohanty SK, Mohanty KS, Berns MW. Organization of microscale objects using a microfabricated optical fiber. *Optics Letters* 2008; 33(18): 2155-2157. DOI: 10.1364/OL.33.002155.
- [18] Ustinov AV, Degtyarev SA, Khonina SN. Diffraction by a conical axicon considering multiple internal reflections. *Computer Optics* 2015; 39(4): 500-507. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-500-507.
- [19] De A, Attimarad GV. Numerical analysis of two dimensional tapered dielectric waveguide. *Progress In Electromagnetics Research* 2004; 44: 131-142. DOI: 10.2528/PIER03062001.
- [20] Degtyarev SA, Khonina SN. Transmission of focused light signal through an apertured probe of a near-field scanning microscope. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2015; 25(2): 306-313. DOI: 10.1134/S1054661815020078.
- [21] Khonina SN, Nesterenko DV, Morozov AA, Skidanov RV, Soifer V.A. Narrowing of a light spot at diffraction of linearly-polarized beam on binary asymmetric axicons. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2012; 21(1): 17-26. DOI: 10.3103/S1060992X12010043.
- [22] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Savelyev DA, Laukkanen J, Turunen J. 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. *Journal of Optics* 2013; 15(8): 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
- [23] Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV. Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(4): 802-807. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
- [24] Khonina SN, Savelyev DA. 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. *Journal of Experimental and Theoretical Physics* 2013; 117(4): 623-630. DOI: 10.1364/JOT.83.000197.

#### *Author's information*

**Sergei Alexandrovich Degtyarev**, post-graduate student of Samara National Research University, trainee-researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: wave optics. E-mail: [sealek@gmail.com](mailto:sealek@gmail.com).

---

*Received August 19, 2016. The final version – August 26, 2016.*

---