

Фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна

С.С. Стафеев^{1,2}, Е.С. Козлова^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

В данной работе моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна. Показано, что линза формирует вблизи своей выходной поверхности область обратного потока энергии. В случае, если высоту линзы сделать больше расчётной и снабдить углублением на оси, удаётся локализовать область прямого потока энергии внутри материала линзы, а область с преимущественно обратным потоком энергии вынести в свободное пространство.

Ключевые слова: вектор Пойнтинга, обратный поток энергии, градиентная линза, цилиндрический векторный пучок.

Цитирование: Стафеев, С.С. Фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна / С.С. Стафеев, Е.С. Козлова, А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 29-33. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.

Citation: Stafeev SS, Kozlova ES, Nalimov AG. Focusing a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens. Computer Optics 2020; 44(1): 29-33. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.

Введение

Острая фокусировка лазерного излучения (фокусировка света линзами с высокими значениями числовых апертур) в настоящее время активно используется для формирования оптических игл [1–3], световых туннелей [4, 5] и цепочек фокусов [6, 7]. Ранее нами было показано, что при острой фокусировке цилиндрических векторных пучков n -го порядка с вихревой фазой, у которых топологический заряд вихря m превышает порядок пучка на два ($m = n + 2$), в фокусе вблизи оптической оси можно наблюдать области с обратным потоком энергии [8]. В частности, такие области наблюдаются при фокусировке оптических вихрей с топологическим зарядом 2 [9, 10] и цилиндрических векторных пучков второго порядка [10, 11]. В случае, если фокусировка исследуемых пучков осуществляется линзами с высокой числовой апертурой, величина обратного потока энергии становится сопоставимой величине прямого потока энергии.

Сила, действующая на проводящую рэлеевскую частицу со стороны светового поля, совпадает по направлению с вектором Пойнтинга [12, 13], следовательно, частица, помещённая в область обратного потока, должна двигаться по направлению к источнику излучения. Поэтому на основе обнаруженного эффекта обратного потока энергии возможно создание световых ловушек. В работах [8–11] область обратного потока расположена рядом с областью прямого потока энергии, в то время как для создания световой ловушки две эти области должны быть изолированы друг от друга. Сделать это можно, сфокусировав свет вблизи раздела двух сред (например, стекло/воздух)

таким образом, чтобы область прямого потока энергии была внутри стекла, а область обратного потока – в воздухе. Градиентные линзы, такие как линза Микаэляна [14] (или гиперболическая секансная линза [15, 16]), линза Лунеберга [17], рыбий глаз Максвелла [18], фокусируют свет вблизи раздела двух сред и могут быть использованы для разделения областей прямого и обратного потоков энергии. Отметим здесь также, что, помимо линз с непрерывным изменением показателя преломления, в последнее время активно изучаются их аналоги, в которых изменяется эффективный показатель преломления: фотонно-кристаллические линзы [19–23], линзы, основанные на чередовании слоев различных материалов [24–26], или линзы на основе метаповерхности [27].

В данной работе моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна с длиной 10 мкм, радиусом 6 мкм и показателем преломления на оси 1,5. Было показано, что линза формирует вблизи своей выходной поверхности область обратного потока энергии. В случае, если длину линзы сделать больше расчётной и снабдить углублением на оси (цилиндрическое углубление имело диаметр 0,3 мкм и глубину 0,8 мкм), удаётся локализовать область прямого потока энергии внутри материала линзы, а область с преимущественно обратным потоком энергии вынести в свободное пространство. На основе таких линз представляется возможным создавать световые ловушки нового типа.

Градиентная секансная линза

В данной работе моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка

градиентной линзой Микаэляна. Показатель преломления такой линзы изменяется в соответствии с формулой [14]:

$$n(r) = n_0 \left[\operatorname{ch} \left(\frac{\pi r}{2L} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления линзы на оси, r – радиальная координата, L – длина линзы, R – радиус. Числовая апертура линзы Микаэляна равна [28]

$$NA = \sqrt{n_0^2 - 1} = \sqrt{2,25 - 1} = \sqrt{1,25} > 1 \quad (2).$$

В моделировании считалось, что $n_0 = 1,5$, $L = 10$ мкм, $R = 6$ мкм из соображений $n(R) = 1$ (ранее было продемонстрировано создание метаматериалов с эффективным показателем преломления близким к единице [29, 30]). Моделирование осуществлялось с помощью FDTD-метода, реализованного в программе Fullwave (шаг сетки по пространству $0,015$ мкм $\approx \lambda/42$).

В качестве освещающего пучка использовался цилиндрический векторный пучок второго порядка, вектор Джонса для него равен

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{pmatrix},$$

где φ – азимутальный угол в цилиндрической системе координат, выбранной таким образом, что ось z совпадает с направлением распространения пучка. Длина волны была равна $\lambda = 0,633$ мкм, волновой фронт пучка считался плоским (распределение амплитуды и фазы входного поля было аналогично распределению амплитуды и фазы поля в работе [31] – рис. 1, но было увеличено в ширину до 12 мкм). В дальнейшем полученные в моделировании величины напряжённости электрического и магнитного полей в фокусе линзы (рис. 2–4) нормировались на максимальные значения величин электрического и магнитного полей освещающего линзу пучка.

Результаты моделирования фокусировки света градиентной секансной линзой

Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в вычисляемой области показано на рис. 2: $S_z = \operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z$.

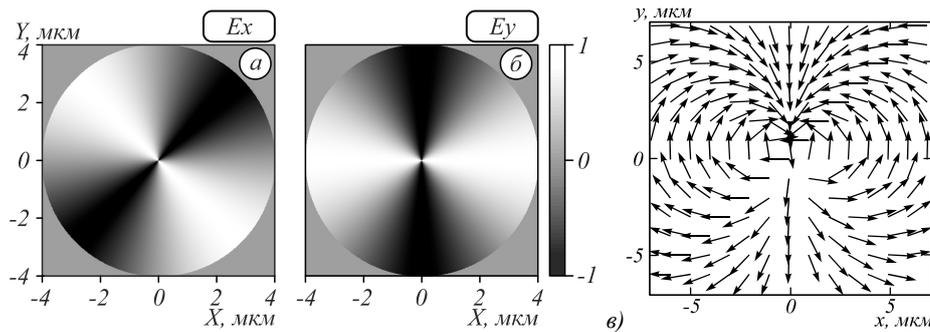


Рис. 1. Распределение входного поля: напряжённость E_x (а) и E_y (б). Направление поляризации (в)

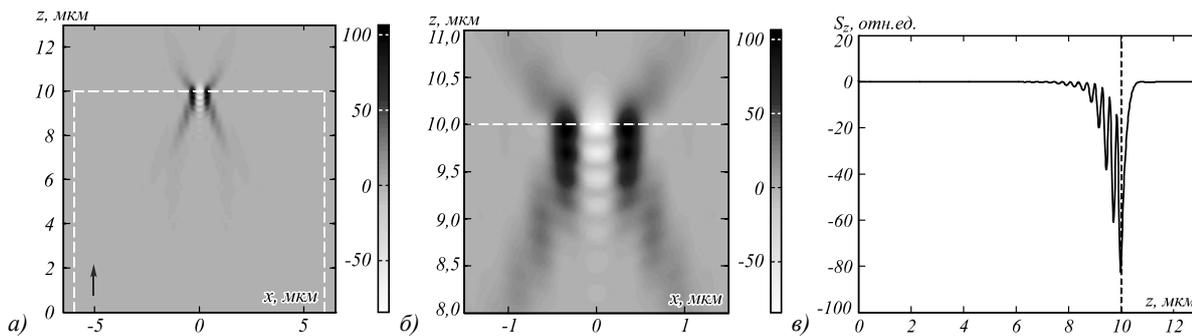


Рис. 2. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Белой пунктирной линией показана граница линзы. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z вдоль оси z (в), чёрной пунктирной линией обозначена граница линзы

Из рис. 2 видно, что вблизи выходной поверхности линзы формируется световой полый цилиндр с диаметром около 400 нм и длиной около 500 нм. Внутри этого цилиндра имеет место обратный поток энергии в виде цилиндра с диаметром около половины длины волны фокусируемого света $\sim 0,3$ мкм. Максимальные абсолютные значения S_z в областях прямого и обратного потоков сопоставимы по порядку величины, хотя в области прямого потока макси-

мум $|S_z|$ и превышает максимум $|S_z|$ в области обратного потока примерно в 1,5 раза. В отличие от обратного потока в фокусе обычной линзы [8–11] область обратного потока на рис. 2 не симметрична вдоль оси распространения света z (рис. 2в).

Градиентная секансная линза с металлизацией

Так же, как и в случае с фокусировкой света в свободном пространстве широкоапертурными линза-

ми, область обратного потока окружена областью прямого потока энергии. Изолировать область обратного потока можно, например, покрыв выходную поверхность линзы слоем металла [32]. На рис. 3 показано распределение S_z в расчётной области в случае, если линза покрывается металлом – хромом толщиной 70 нм (на оси оставлено не покрытое металлом отверстие диаметром 0,3 мкм).

Из рис. 3 видно, что область прямого потока энергии в данном случае не выходит за границы линзы, однако и область обратного потока энергии за границу также не выходит.

Градиентная секансная линза с отверстием

Другой способ изолировать область обратного потока энергии (рис. 2) – вырезать отверстие под область обратного потока с одновременным увеличением толщины линзы. Нами была промоделирована

линза с высотой на 0,5 мкм выше расчётной и цилиндрическим углублением на оси с диаметром 0,3 мкм и высотой 0,8 мкм. Результат фокусировки показан на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что таким способом можно изолировать область с максимальным прямым потоком энергии (тёмные области на рис. 4) внутри материала линзы, в то время как в свободном пространстве будет располагаться область с преимущественно обратным потоком энергии. Заметим, что по сравнению с рис. 2 обратный поток уменьшился – на рис. 4 максимум абсолютного значения $|S_z|$ в области прямого потока в 4,7 раза больше максимума $|S_z|$ в области обратного потока (против 1,5 раз на рис. 2). Также заметим, что цилиндрическое углубление в линзе на рис. 4 работает как открытый резонатор, что приводит к неоднородности обратного потока.

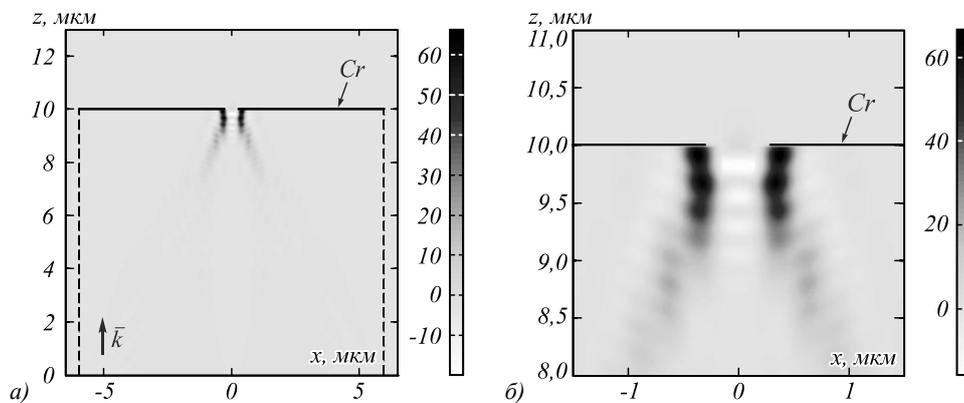


Рис. 3. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Чёрной пунктирной линией показана граница линзы, чёрной сплошной линией – покрытие из хрома

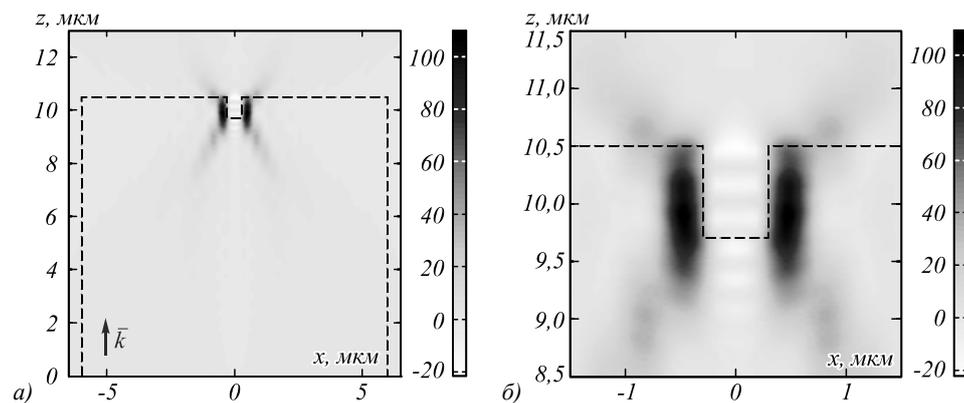


Рис. 4. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Чёрной пунктирной линией показана граница линзы

Заключение

В данной работе нами моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка с длиной волны 633 нм градиентной линзой Микаэляна высотой 10 мкм, радиусом 6 мкм и показателем преломления на оси 1,5. Было показано, что

линза формирует вблизи своей выходной поверхности область обратного потока энергии. В случае, если линзу сделать больше расчётной и снабдить углублением на оси, удастся локализовать область прямого потока энергии внутри материала линзы, а область с преимущественно обратным потоком энергии вынести в свободное пространство. На основе таких линз

представляется возможным создавать световые ловушки нового типа.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Градиентная секансная линза», Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380 в части «Градиентная секансная линза с металлизацией» и грант 18-07-01122 в части «Градиентная секансная линза с отверстием»), а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Введение» и в рамках выполнения гранта НШ-6307.2018.8 в части «Заключение».

Литература

1. **Grosjean, T.** Longitudinally polarized electric and magnetic optical nano-needles of ultra high lengths / T. Grosjean, I. Gauthier // *Optics Communications*. – 2013. – Vol. 294. – P. 333-337.
2. **Wu, Z.** Optimization-free approach for generating sub-diffraction quasi-non-diffracting beams / Z. Wu, K. Zhang, S. Zhang, Q. Jin, Z. Wen, L. Wang, L. Dai, Z. Zhang, H. Chen, G. Liang, Y. Liu, G. Chen // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 13. – 16585.
3. **Guan, J.** Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus / J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, P. Jin // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 404. – P. 118-123.
4. **Yu, Y.** Engineering of multi-segmented light tunnel and flattop focus with designed axial lengths and gaps / Y. Yu, H. Huang, M. Zhou, Q. Zhan // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 407. – P. 398-401.
5. **Zheng, C.** Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates / C. Zheng, S. Su, H. Zang, Z. Ji, Y. Tian, S. Chen, K. Mu, L. Wei, Q. Fan, C. Wang, X. Zhu, C. Xie, L. Cao, E. Liang // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57, Issue 14. – P. 3802-3807.
6. **Lin, J.** Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system / J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma // *Optics Communications*. – 2015. – Vol. 340. – P. 69-73.
7. **Yu, Y.** Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics / Y. Yu, Q. Zhan // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17, Issue 10. – 105606.
8. **Kotlyar, V.V.** Reverse and toroidal flux of light fields with both phase and polarization higher-order singularities in the sharp focus area / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.A. Kovalev // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 12. – P. 16689-16702. – DOI: 10.1364/OE.27.016689.
9. **Kotlyar, V.V.** Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A. G. Nalimov // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43, Issue 12. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
10. **Kotlyar, V.V.** Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov // *Physical Review A*. – 2019. – Vol. 99, Issue 3. – 033840. – DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
11. **Stafeev, S.S.** The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam /

- S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, E.S. Kozlova // *IEEE Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11, Issue 4. – 4500810. – DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
12. **Novotny, L.** Principles of nano-optics / L. Novotny, B. Hecht. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 539 p.
13. **Sukhov, S.** On the concept of “tractor beams” / S. Sukhov, A. Dogariu // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35, Issue 22. – P. 3847-3849.
14. **Микаэлян, А.Л.** Использование слоистой среды для фокусировки волн / А.Л. Микаэлян // *Доклады АН СССР*. – 1951. – Т. 81. – С. 569-571.
15. **Rivas-Moscoso, J.M.** Focusing of light by zone plates in Selfoc gradient-index lenses / J.M. Rivas-Moscoso, D. Nieto, C. Gómez-Reino, C.R. Fernández-Pousa // *Optics Letters*. – 2003. – Vol. 28, Issue 22. – P. 2180-2182.
16. **Hewak, D.W.** Solution deposited optical waveguide lens / D.W. Hewak, J.W.Y. Lit // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28, Issue 19. – P. 4190-4198.
17. **Zentgraf, T.** Plasmonic Luneburg and Eaton lenses / T. Zentgraf, Y. Liu, M.H. Mikkelsen, J. Valentine, X. Zhang // *Nature Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 6, Issue 3. – P. 151-155.
18. **Born, M.** Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light / M. Born, E. Wolf. – 6th (corrected) ed. – Elsevier, 2013.
19. **Fathollahi Khalkhali, T.** Polarization-independent and super broadband flat lens composed of graded index annular photonic crystals / T. Fathollahi Khalkhali, M. Alipour-Beyraghi, M. Lalenejad, A. Bananej // *Optics Communications*. – 2019. – Vol. 435. – P. 202-211.
20. **Gaufillet, F.** Design of flat graded index lenses using dielectric graded photonic crystals / F. Gauffillet, É. Akmansoy // *Optical Materials*. – 2015. – Vol. 47. – P. 555-560.
21. **Gilarlue, M.M.** Photonic crystal waveguide intersection design based on Maxwell’s fish-eye lens / M.M. Gilarlue, S.H. Badri, H. Rasooli Saghai, J. Nourinia, C. Ghobadi // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2018. – Vol. 31. – P. 154-159.
22. **Xia, F.** Negative Luneburg lens based on the graded annular photonic crystals / F. Xia, S. Li, K. Zhang, L. Jiao, W. Kong, L. Dong, M. Yun // *Physica B: Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 545. – P. 233-236.
23. **Lin, S.C.S.** Gradient-index phononic crystals / S.C.S. Lin, T.J. Huang, J.H. Sun, T.T. Wu // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79, Issue 9. – 094302.
24. **Zhu, Y.** Broadband ultra-deep sub-diffraction-limit optical focusing by metallic graded-index (MGRIN) lenses / Y. Zhu, W. Yuan, H. Sun, Y. Yu // *Nanomaterials*. – 2017. – Vol. 7, Issue 8. – 221.
25. **Gilarlue, M.M.** Multilayered Maxwell’s fisheye lens as waveguide crossing / M.M. Gilarlue, J. Nourinia, C. Ghobadi, S.H. Badri, H. Rasooli Saghai // *Optics Communications*. – 2019. – Vol. 435. – P. 385-393.
26. **Badri, S.H.** Maxwell’s fisheye lens as efficient power coupler between dissimilar photonic crystal waveguides / S.H. Badri, M.M. Gilarlue // *Optik*. – 2019. – Vol. 185. – P. 566-570.
27. **Behera, S.** Design and studies on gradient index metasurfaces for broadband polarization-independent, subwavelength, and dichroic focusing / S. Behera, K. Kim // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Issue 18. – P. 5128-5135.
28. **Котляр, В.В.** Острая фокусировка лазерного света с помощью микрооптики / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Г. Налимов. – Самара: ООО «Новая техника», 2018. – 344 с.

29. **Zhang, X.A.** Ordered 3D thin-shell nanolattice materials with near-unity refractive indices / X.A. Zhang, A. Bagal, E.C. Dandley, J. Zhao, C.J. Oldham, B.I. Wu, G.N. Parsons, C.H. Chang // *Advanced Functional Materials*. – 2015. – Vol. 25, Issue 42. – P. 6644-6649.
30. **Kwon, D.H.** Low-index metamaterial designs in the visible spectrum / D.H. Kwon, D.H. Werner // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, Issue 15. – P. 9267-9272.
31. **Kotlyar, V.V.** Single metalens for generating polarization and phase singularities leading to a reverse flow of energy / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, L. O'Faolain // *Journal of Optics*. – 2019. – Vol. 21, Issue 5. – 055004.
32. **Novitsky, A.V.** Negative propagation of vector Bessel beams / A.V. Novitsky, D.V. Novitsky // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2007. – Vol. 24, Issue 9. – P. 2844-2849.

Сведения об авторах

Сведения об авторах **Стафеев Сергей Сергеевич** и **Налимов Антон Геннадьевич** – см. стр. 11 этого номера.

Козлова Елена Сергеевна, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 17 сентября 2019 г. Окончательный вариант – 30 октября 2019 г.

Focusing a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens

S.S. Stafeev^{1,2}, E.S. Kozlova^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

²Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

In this paper, we numerically simulate the focusing of a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens. It is shown that the lens forms a region of the reverse energy flow near its output surface. If the lens has an on-axis micropit, the region of the direct energy flow can be confined within the lens material, whereas that of the reverse energy flow is put out in free space.

Keywords: Poynting vector, energy backflow, gradient index lens, cylindrical vector beam, scattering force.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant # 18-07-01122 ("Gradient index lens"), the Russian Foundation for Basic Research under grant # 18-19-00595 ("Gradient index lens with metallic layer"), and grant # 18-07-01380 ("Gradient index lens with a micropit"), and the RF Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the "Crystallography and Photonics" Research Center of the RAS under agreement ("Introduction").

Citation: Stafeev SS, Kozlova ES, Nalimov AG. Focusing a second-order cylindrical vector beam with a gradient index Mikaelian lens. *Computer Optics* 2020; 44(1): 29-33. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.

References

- [1] Grosjean T, Gauthier I. Longitudinally polarized electric and magnetic optical nano-needles of ultra high lengths. *Opt Commun* 2013; 294: 333-337.
 - [2] Wu Z, Zhang K, Zhang S, Jin Q, Wen Z, Wang L, Dai L, Zhang Z, Chen H, Liang G, Liu Y, Chen G. Optimization-free approach for generating sub-diffraction quasi-non-diffracting beams. *Opt Express* 2018; 26(13):16585.
 - [3] Guan J, Lin J, Chen C, Ma Y, Tan J, Jin P. Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus. *Opt Commun* 2017; 404: 118-123.
 - [4] Yu Y, Huang H, Zhou M, Zhan Q. Engineering of multi-segmented light tunnel and flat-top focus with designed axial lengths and gaps. *Opt Commun* 2018; 407: 398-401.
 - [5] Zheng C, Su S, Zang H, et al. Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates. *Appl Opt* 2018; 57(14): 3802-3807.
 - [6] Lin J, Chen R, Jin P, Cada M, Ma Y. Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system. *Opt Commun* 2015; 340: 69-73.
 - [7] Yu Y, Zhan Q. Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics. *J Opt* 2015; 17(10): 105606.
 - [8] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kovalev AA. Reverse and toroidal flux of light fields with both phase and polarization higher-order singularities in the sharp focus area. *Opt Express* 2019; 27(12): 16689-16702. DOI: 10.1364/OE.27.016689.
 - [9] Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy. *Opt Lett* 2018; 43(12): 2921-2924. DOI: 10.1364/OL.43.002921.
 - [10] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity. *Phys Rev A* 2019; 99(3): 033840. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
 - [11] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kozlova ES. The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam. *IEEE Photon J* 2019; 11(4): 4500810. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
 - [12] Novotny L, Hecht B. Principles of nano-optics. Cambridge: Cambridge University Press; 2006.
 - [13] Sukhov S, Dogariu A. On the concept of “tractor beams.” *Opt Lett* 2010; 35(22): 3847-3849.
 - [14] Mikaelian AL. Application of stratified medium for waves focusing. *Doklady Akademii Nauk SSSR* 1951; 81: 569-571.
 - [15] Rivas-Moscoso JM, Nieto D, Gómez-Reino C, Fernández-Pousa CR. Focusing of light by zone plates in Selfc gradient-index lenses. *Opt Lett* 2003; 28(22): 2180-2182.
 - [16] Hewak DW, Lit JWY. Solution deposited optical waveguide lens. *Appl Opt* 1989; 28(19): 4190-4198.
 - [17] Zentgraf T, Liu Y, Mikkelsen MH, Valentine J, Zhang X. Plasmonic Luneburg and Eaton lenses. *Nat Nanotechnol* 2011; 6(3): 151-155.
 - [18] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 6th (corrected) ed. Elsevier; 2013.
 - [19] Fathollahi Khalkhali T, Alipour-Beyraghi M, Lalenejad M, Bananej A. Polarization-independent and super broadband flat lens composed of graded index annular photonic crystals. *Opt Commun* 2019; 435: 202-211.
 - [20] Gauffillet F, Akmansoy É. Design of flat graded index lenses using dielectric graded photonic crystals. *Opt Mater* 2015; 47: 555-560.
 - [21] Gilarlue MM, Badri SH, Rasooli Saghari H, Nourinia J, Ghobadi C. Photonic crystal waveguide intersection design based on Maxwell’s fish-eye lens. *Photon Nanostr* 2018; 31: 154-159.
 - [22] Xia F, Li S, Zhang K, Jiao L, Kong W, Dong L, Yun M. Negative Luneburg lens based on the graded annular photonic crystals. *Physica B* 2018; 545: 233-236.
 - [23] Lin SCS, Huang TJ, Sun JH, Wu TT. Gradient-index photonic crystals. *Phys Rev B* 2009; 79(9): 094302.
-

-
- [24] Zhu Y, Yuan W, Sun H, Yu Y. Broadband ultra-deep sub-diffraction-limit optical focusing by metallic graded-index (MGRIN) lenses. *Nanomaterials* 2017; 7(8): 221.
- [25] Gilarlue MM, Nourinia J, Ghobadi C, Badri SH, Rasooli Saghai H. Multilayered Maxwell's fisheye lens as waveguide crossing. *Opt Commun* 2019; 435: 385-393.
- [26] Badri SH, Gilarlue MM. Maxwell's fisheye lens as efficient power coupler between dissimilar photonic crystal waveguides. *Optik* 2019; 185: 566-570.
- [27] Behera S, Kim K. Design and studies on gradient index metasurfaces for broadband polarization-independent, subwavelength, and dichroic focusing. *Appl Opt* 2019; 58(18): 5128-5135.
- [28] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Tight focusing of laser light by microoptics. Samara: Novaya Technika Publisher; 2018.
- [29] Zhang XA, Bagal A, Dandley EC, Zhao J, Oldham CJ, Wu BI, Parsons GN, Chang CH. Ordered 3D thin-shell nanolattice materials with near-unity refractive indices. *Adv Funct Mater* 2015; 25(42): 6644-6649.
- [30] Kwon DH, Werner DH. Low-index metamaterial designs in the visible spectrum. *Opt Express* 2007; 15(15): 9267-9272.
- [31] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, O'Faolain L. Single metalens for generating polarization and phase singularities leading to a reverse flow of energy. *J Opt* 2019; 21(5): 055004.
- [32] Novitsky AV, Novitsky DV. Negative propagation of vector Bessel beams. *J Opt Soc Am A* 2007; 24(9): 2844-2849.
-

Author's information

Sergey S. Stafeev (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Elena Sergeevna Kozlova, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical Modeling and Program Complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. E-mail: anton@smr.ru.

Received September 17, 2019. The final version – October 30, 2019.
