

Острая фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка линзой Микаэляна

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

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В данной работе численно исследуется фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна. Было показано, что градиентная 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.

1. Введение

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 [1]. В частности, такие области наблюдаются при фокусировке оптических вихрей с топологическим зарядом 2 [2] и цилиндрических векторных пучков второго порядка [3]. В случае если фокусировка исследуемых пучков осуществляется линзами с высокой числовой апертурой, величина обратного потока энергии становится сопоставимой величине прямого потока энергии. Недостатком работ [1–3] является то, что область обратного потока энергии 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 [4], линза Лунеберга [5], рыбий глаз Максвелла [6], фокусируют свет вблизи раздела двух сред и могут быть использованы для разделения областей прямого и обратного потоков энергии. Отметим также, что помимо линз с непрерывным изменением показателя преломления в последнее время активно изучаются их аналоги, в которых изменяется эффективный показатель преломления, например, фотонно-кристаллические линзы [7–9].

В данной работе численно моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной секансной линзой (линзой Микаэляна) с 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 высоту

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.

2. 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 [4]:

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

где n_0 – показатель преломления линзы на оси, r – радиальная координата, L – длина линзы, R – радиус. Числовая апертура линзы Микаэляна равна $NA = \sqrt{n_0^2 - 1} = \sqrt{2,25 - 1} = \sqrt{1,25} > 1$ [10]. 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 [11,12]). 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 $\begin{pmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{pmatrix}$, 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 [13]). В дальнейшем полученные в моделировании величины напряженностей электрического и магнитного полей в фокусе линзы (рис. 1-3) нормировались на максимальные значения величин электрического и магнитного полей освещающего линзу пучка.

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

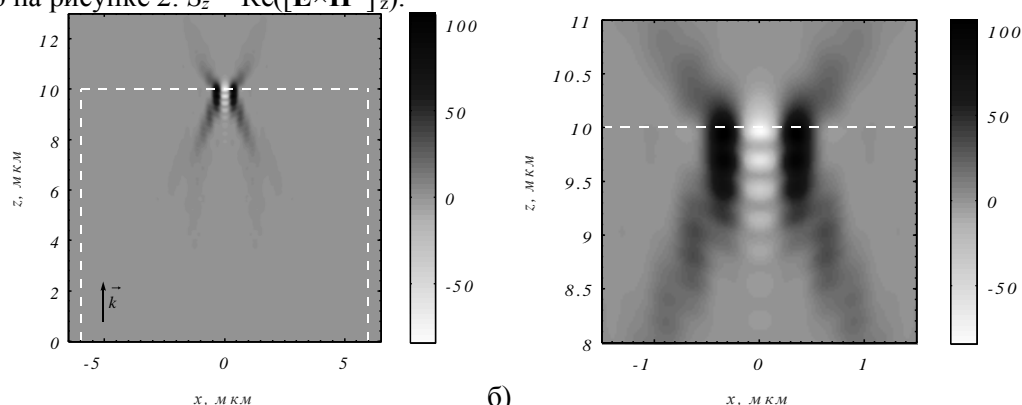


Рисунок 1. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Белой пунктирной линией показана граница линзы.

Из рисунка 1 видно, что вблизи выходной поверхности линзы формируется световой полый цилиндр с радиусом 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

максимум $|S_z|$ и превышает максимум $|S_z|$ в области обратного потока примерно в 1,5 раза. В отличие от обратного потока в фокусе обычной линзы [1–3] область обратного потока на рис. 2 не симметрична вдоль оси распространения света z .

3. Градиентная секансная линза с металлическим слоем

Так же, как и в случае с фокусировкой света в свободном пространстве широкоапертурными линзами, область обратного потока окружена областью прямого потока энергии. Изолировать область обратного потока можно, например, покрыв выходную поверхность линзы слоем металла [14]. На рис. 2 показано распределение S_z в расчетной области в случае, если линза покрывается металлом – хромом толщиной 70 нм (на оси оставлено непокрытое металлом отверстие шириной 0,3 мкм).

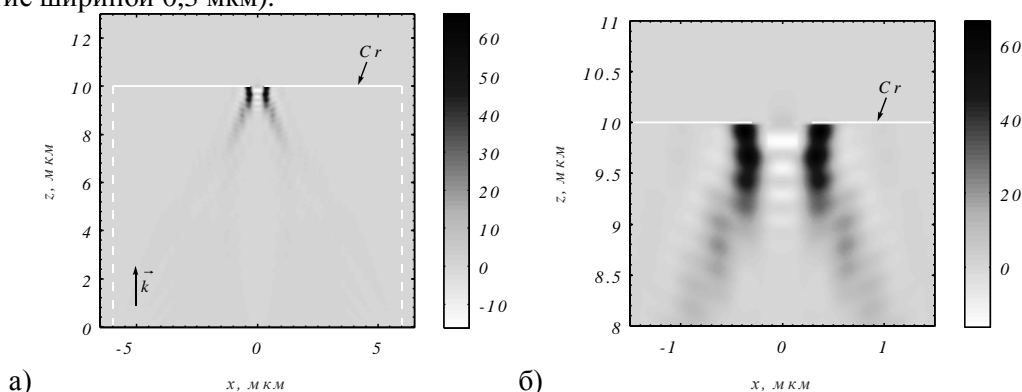


Рисунок 2. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Белой пунктирной линией показана граница линзы, белой сплошной линией – покрытие из хрома.

Из рис. 2 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.

4. Градиентная секансная линза с отверстием при вершине

Другой способ изолировать область обратного потока энергии (рис. 1) – вырезать отверстие под область обратного потока с одновременным увеличением толщины линзы. Нами была промоделирована линза с высотой на 0,5 мкм выше расчетной и цилиндрическим углублением на оси с диаметром 0,3 мкм и высотой 0,8 мкм. Результат фокусировки показан на рис. 3.

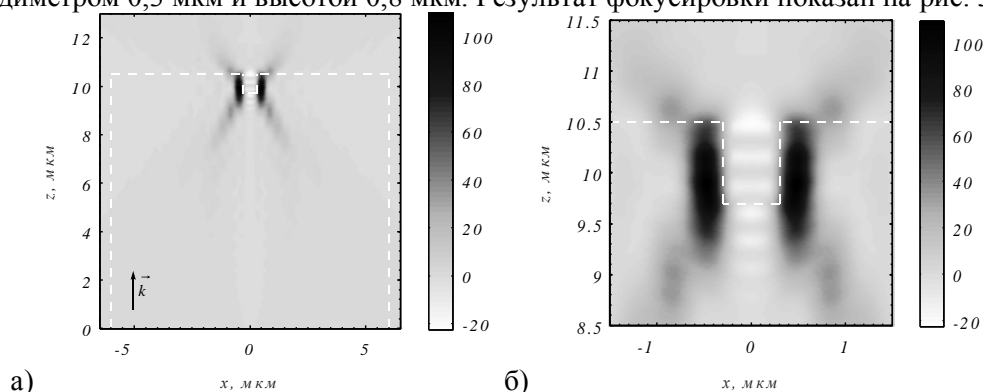


Рисунок 3. Распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в продольной плоскости xz (а). Увеличенный фрагмент вблизи фокуса (б). Белой пунктирной линией показана граница линзы.

Из рисунка 3 видно, что таким способом можно изолировать область с максимальным прямым потоком энергии (темные области на рис. 3) внутри материала линзы, в то время как в свободном пространстве будет располагаться область с преимущественно обратным потоком

энергии. Заметим, что по сравнению с рис. 1 обратный поток уменьшился – на рис. 3 максимум абсолютного значения $|S_z|$ в области прямого потока в 4,7 раз больше максимума $|S_z|$ в области обратного потока (против 1,5 раз на рис. 1). Также заметим, что цилиндрическое углубление в линзе на рис. 3 работает как открытый резонатор, что приводит к неоднородности обратного потока.

5. Заключение

В данной работе численно моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной секансной линзой (линзой Микаэляна) с 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 высоту 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.

6. 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».

7. Литература

- [1] 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 // *Opt. Express*. – 2019. – Vol. 27(12). – P. 16689-16702.
- [2] 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 // *Opt. Lett.* – 2018. – Vol. 43(12). – P. 2921-2924.
- [3] 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 J.* – 2019. – Vol. 11(4). – P. 4500810.
- [4] Микаэлян, А.Л. Использование слоистой среды для фокусировки волн // *Доклады АН СССР* – 1951. – Т. 81. С. 569-571с.
- [5] Zentgraf, T. Plasmonic Luneburg and Eaton lenses / T. Zentgraf, Y. Liu, M. H. Mikkelsen, J. Valentine, X. Zhang // *Nat. Nanotechnol.* – 2011. – Vol. 6(3). – P. 151-155.
- [6] Born, M. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light / M. Born, E. Wolf – Elsevier, 2013.
- [7] 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 // *Opt. Commun.* – 2019. – Vol. 435. – P. 202-211.
- [8] Gilarlue, M.M. Photonic crystal waveguide intersection de-sign based on Maxwell's fish-eye lens / M.M. Gilarlue, S.H. Badri, H. Rasooli Saghai, J. Nourinia, C. Ghobadi // *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* – 2018. – Vol. 31. – P. 154-159.
- [9] 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 // *Phys. B Condens. Matter.* – 2018. – Vol. 545. – P. 233-236.
- [10] Котляр, В.В. Острая фокусировка лазерного света с помощью микрооптики / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Г. Налимов – Самара: Новая Техника, 2018. – 344 с.

- [11] 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 // *Adv. Funct. Mater.* – 2015. – Vol. 25. – P. 6644-6649.
- [12] Kwon, D.H. Low-index metamaterial designs in the visible spectrum / D.H. Kwon, D.H. Werner // *Opt. Express.* – 2007. – Vol. 15(15). – P. 9267-9272.
- [13] 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 // *J. Opt.* – 2019. – Vol. 21(5). – P. 055004.
- [14] Novitsky, A.V. Negative propagation of vector Bessel beams / A.V. Novitsky, D.V. Novitsky // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2007. – Vol. 24(9). – P. 2844-2849.

Tight focusing of second-order cylindrical vector beam by Mikaelian lens

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

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this paper we simulated the focusing of a second-order cylindrical vector beam by Mikaelian microlens. It was shown that the lens forms a region of the reverse energy flow near its shadow surface. If the lens has a microhole on the axis, it is possible to localize the region of the direct energy flux inside the lens material and to concentrate the region with the reverse energy flux in free space.