

## ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ  
С ПОСЕКТОРНО АЗИМУТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙС.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<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 данной статье численно рассмотрена острая фокусировка оптического вихря с посекторно азимутальной поляризацией (длина волны 532 нм) зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой NA=0,95. Численно показано, что при фокусировке пучка с секторностью 6 результаты фокусировки практически не отличаются от фокусировки идеального азимутально-поляризованного оптического вихря – расхождение в размерах фокального пятна по полуспаду интенсивности, вызванное асимметрией, не превышает 0,001 от длины волны света.

**Ключевые слова:** острая фокусировка, оптический вихрь, азимутальная поляризация.

**Цитирование:** Стафеев, С.С. Острая фокусировка оптического вихря с посекторно азимутальной поляризацией / С.С. Стафеев, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 147-154. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-147-154.

## Введение

Цилиндрические векторные пучки (пучки, в которых направление поляризации имеет радиальную симметрию) в оптике в настоящий момент активно изучаются [1]. При этом в последнее время отмечен рост интереса к исследованию фокусировки азимутально- и радиально-поляризованных оптических вихрей [2–9]. Так, например, в [10] было показано, что азимутально-поляризованный оптический вихрь образует фокусное пятно с площадью (0,147λ<sup>2</sup>) на 13,5% меньше, чем радиально-поляризованный свет (0,17λ<sup>2</sup>). Аналогичный пучок использовался в работе [8] для формирования иглоподобного фокуса с большой глубиной (12λ) и субволновой шириной (изменялась от 0,42λ до 0,49λ). Заметим, что при фокусировке азимутально-поляризованного пучка в фокусе формируется световое кольцо. Поэтому, чтобы в фокусе сформировалось световое пятно, надо фокусировать азимутальный пучок с фазовой сингулярностью.

Существует несколько способов получения цилиндрических векторных пучков с посекторной азимутальной или радиальной поляризацией: используя волновые пластинки [11–14], нелинейные оптиче-

ские кристаллы [15], поляризующие плёнки [16] и субволновые решётки [17–19].

Ранее острая фокусировка цилиндрических векторных пучков, поляризованных посекторно, была численно исследована в [20]. Было показано, что для 8-секторного пучка отклонение от идеального не превышает 5,3%. В [20] однако не рассматривался случай азимутально-поляризованных оптических вихрей.

В данной статье мы численно рассмотрели острую фокусировку оптического вихря с посекторной азимутальной поляризацией (длина волны λ=532 нм) зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой NA=0,95. Численно показано, что при фокусировке пучка с секторностью 6 результаты фокусировки практически не отличаются от фокусировки идеального азимутально-поляризованного вихря – расхождения в размерах фокусного пятна по полуспаду интенсивности, вызванные асимметрией, не превышают 0,001λ. Для 4-секторного пучка расхождение не превышало 0,03λ.

## Моделирование

В моделировании использовались формулы Ричардса–Вольфа [21]:

$$\mathbf{E}(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где  $B(\theta, \varphi)$  – электрическое поле на входе широкоапертурной системы в координатах выходного зрачка ( $\theta$  – полярирующий угол,  $\varphi$  – азимутальный),  $T(\theta)$  – функ-

ция аподизации линзы,  $f$  – фокусное расстояние,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$  – матрица поляризации, имеющая вид:

$$\mathbf{P}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} [1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1)] a(\theta, \varphi) + \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) b(\theta, \varphi) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) a(\theta, \varphi) + [1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1)] b(\theta, \varphi) \\ -\sin \theta \cos \varphi a(\theta, \varphi) - \sin \theta \sin \varphi b(\theta, \varphi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $a(\theta, \varphi)$  и  $b(\theta, \varphi)$  – функции поляризации для  $x$ - и  $y$ -компонент фокусируемого пучка. В моделировании считалось, что зонная пластинка ( $T(\theta) = \cos^{-3/2}\theta$ , NA=0,95) фокусирует плоскую волну, в которой по-

ляризация и фаза изменяется посекторно в зависимости от значения азимутального угла  $\varphi$ . В таком случае, например, для 4-секторного пучка  $a(\theta, \varphi)$ ,  $b(\theta, \varphi)$  и  $B(\theta, \varphi)$  будут иметь вид:

$$a(\theta, \varphi) = \begin{cases} -1, & 0 \leq \varphi < \pi/2 \\ -1, & \pi/2 \leq \varphi < \pi \\ 1, & \pi \leq \varphi < 3\pi/2 \\ 1, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi \end{cases}, \quad (3)$$

$$b(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \varphi < \pi/2 \\ -1, & \pi/2 \leq \varphi < \pi \\ -1, & \pi \leq \varphi < 3\pi/2 \\ 1, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi \end{cases}, \quad (4)$$

$$V(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \varphi < \pi/2 \\ i, & \pi/2 \leq \varphi < \pi \\ -1, & \pi \leq \varphi < 3\pi/2 \\ -i, & 3\pi/2 \leq \varphi < 2\pi \end{cases}. \quad (5)$$

На рис. 1 показана схема фокусировки – свет, поляризованный азимутально в четырёх секторах, проходит через секторную спиральную фазовую пластинку (СФП) с единичным топологическим зарядом, а затем фокусируется фазовой зонной пластинкой. При этом секторный поляризатор и фазовая пластинка могут быть совмещены в одном элементе [17–19].

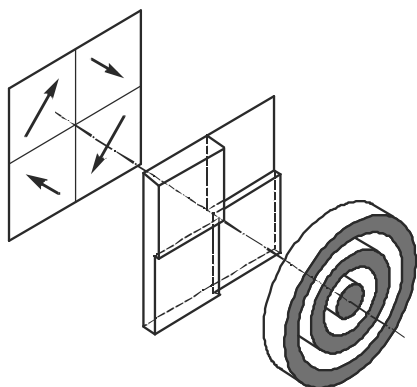


Рис. 1. Схема моделирования: четырёхсекторный азимутально-поляризованный пучок и четырёхсекторная фазовая пластинка

**Результаты моделирования**

Фокусировка секторно-поляризованного пучка, прошедшего через секторную фазовую пластинку

Результаты моделирования показаны на рис. 2–4. На рис. 2 показана фокусировка пучка, состоящего из четырёх секторов, на рис. 3 – из шести секторов. Для сравнения на рис. 4 показана фокусировка идеального азимутально-поляризованного оптического вихря.

Из сравнения рис. 2 и 3 с рис. 4 видно, что секторно-поляризованный пучок, прошедший через секторную СФП, в отличие от идеального азимутально-поляризованного оптического вихря содержит продольную компоненту напряжённости электрического поля. Хотя вклад её в формирование фокуса мал – для 4-секторного пучка максимум поперечной компоненты примерно в 21 раз превышает максимум продольной, а для 6-секторного – примерно в 80 раз. На рис. 5 показана относительная погрешность расхождения интенсивности в фокусе идеального пучка ( $I_{ideal}$ ) и

секторно поляризованного ( $I_{quasi}$ ), вычисленная как  $|I_{ideal} - I_{quasi}| / \max(I_{ideal})$ .

Максимум погрешности на рис. 5а не превышал 18%, а на рис. 5б – 9%.

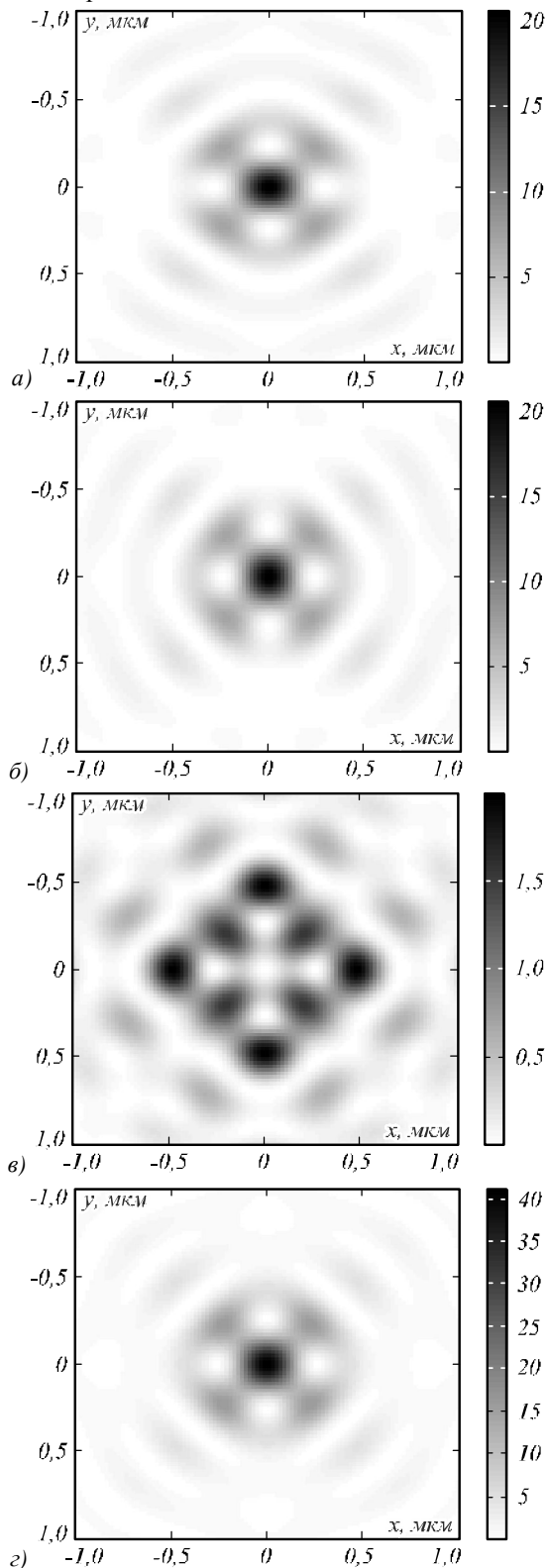


Рис. 2. Распределение в фокусном пятне интенсивности и отдельных составляющих интенсивности:  $I_x$  (а),  $I_y$  (б),  $I_z$  (в),  $I$  (г), при фокусировке 4-секторного азимутального пучка, прошедшего 4-секторную СФП

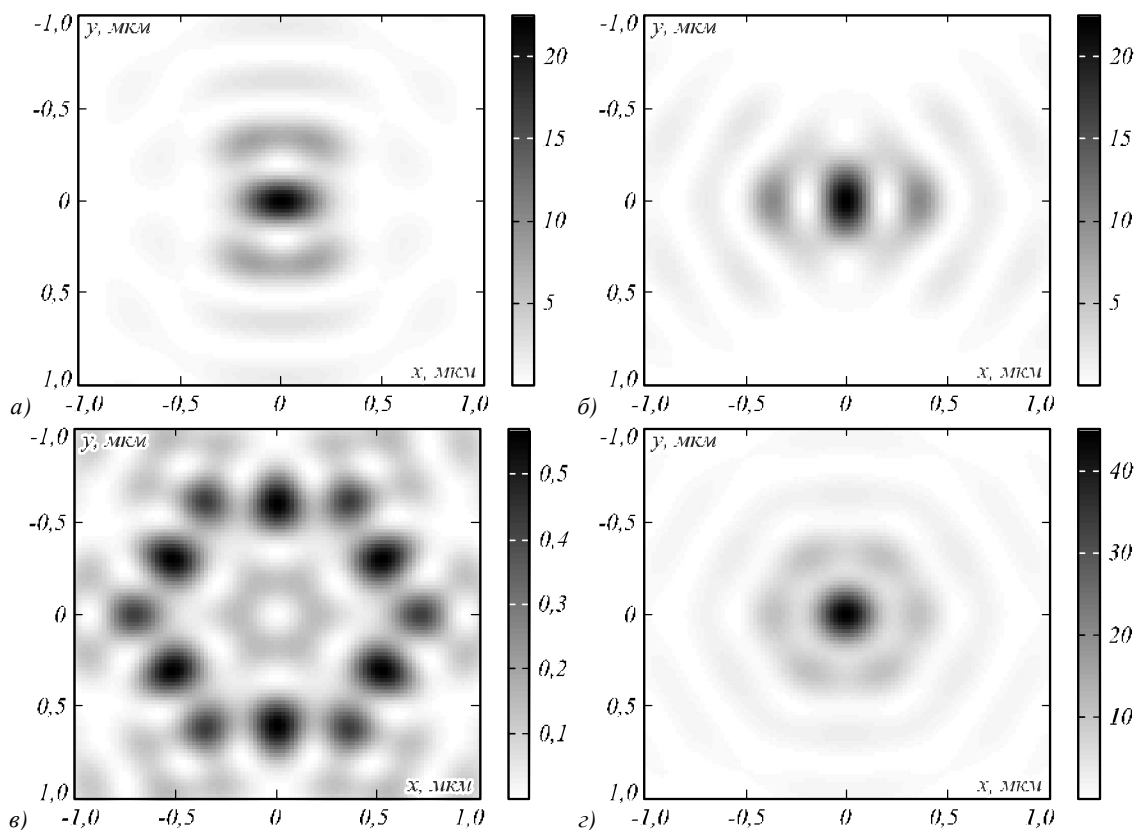


Рис. 3. Распределение в фокусном пятне интенсивности и отдельных составляющих интенсивности:  $I_x$  (а),  $I_y$  (б),  $I_z$  (в),  $I(\varphi)$  (г), при фокусировке 6-секторного азимутального пучка, прошедшего 6-секторную СФП

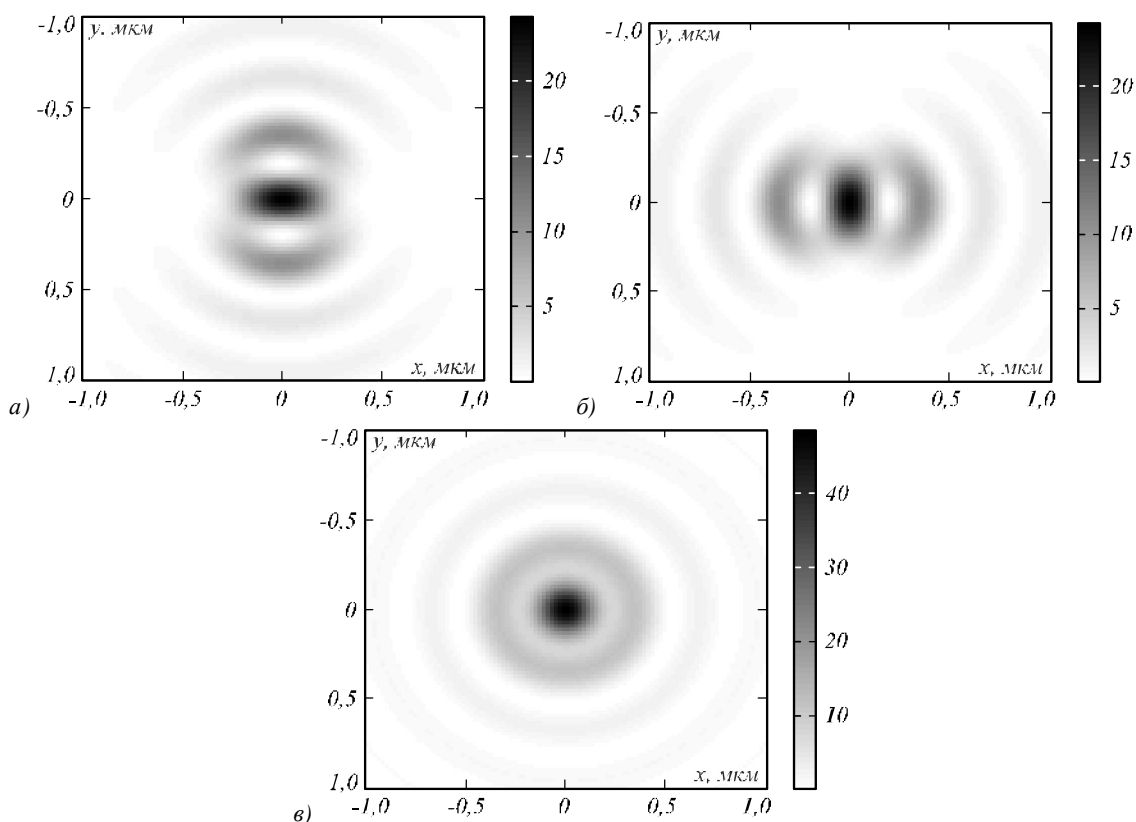


Рис. 4. Интенсивность в фокусном пятне  $I_x$  (а),  $I_y$  (б),  $I$  (в), при фокусировке идеального азимутально-поляризованного оптического вихря

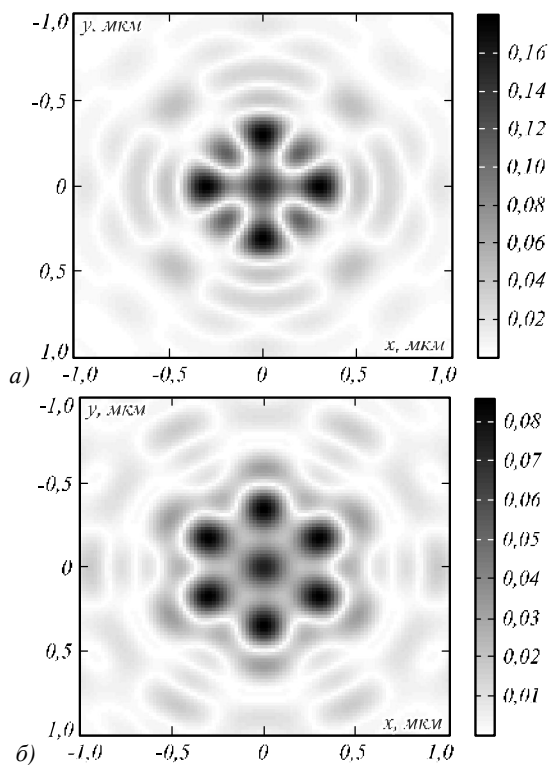


Рис. 5. Ошибка в фокусе, вычисленная как  $|I_{ideal} - I_{quasi}| / \max(I_{ideal})$  для 4-секторного (а) и 6-секторного (б) азимутально-поляризованного пучка

Фокусировка секторно-поляризованного пучка, прошедшего через непрерывную фазовую пластинку

На втором этапе моделирования считалось, что секторно азимутально поляризованный свет, проходит через непрерывную (спиральную) СФП ( $V(\theta, \varphi) = e^{i\varphi}$ ) и затем фокусируется зонной пластинкой (рис. 6). Распределение интенсивности в фокусе в данном случае показано на рис. 7, а на рис. 8 – погрешность.

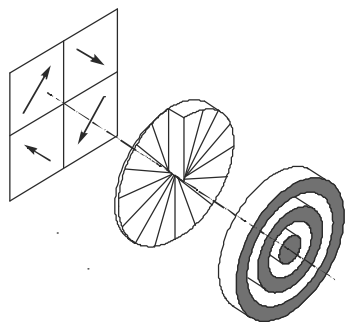


Рис. 6. Схема моделирования: четырёхсекторный азимутально-поляризованный пучок и непрерывная фазовая пластинка

Фокусировка непрерывно-поляризованного пучка, прошедшего через секторную фазовую пластинку

На третьем этапе моделирования была рассмотрена фокусировка непрерывного азимутально-поляризованного пучка, прошедшего через секторную фазовую пластинку. Распределение интенсивности в фокусе в данном случае показано на рис. 9, а на рис. 10 – погрешность. Можно отметить, что в данном случае в связи с отсутствием продольной составляющей напряжённости электрического поля в исходном пучке продольная составляющая интенсивности в фокусе также отсутствует.

ляющей напряжённости электрического поля в исходном пучке продольная составляющая интенсивности в фокусе также отсутствует.

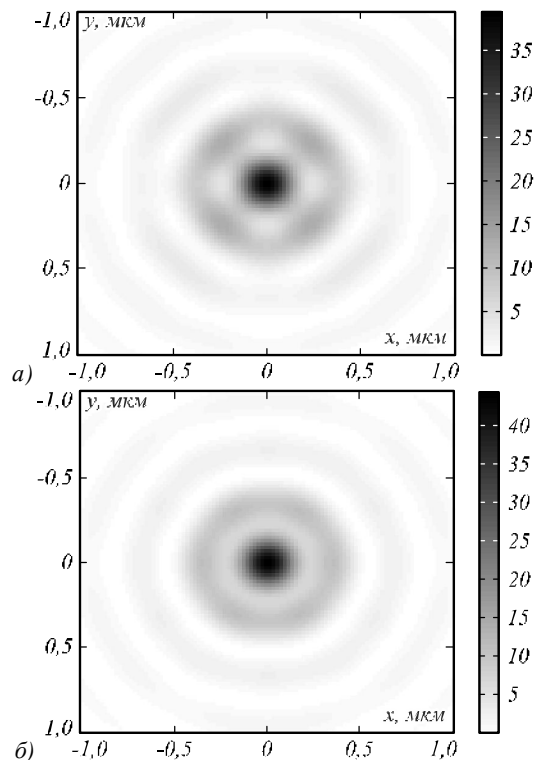


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокусном пятне при фокусировке 4-секторного азимутального пучка (а), 6-секторного азимутального пучка (б), прошедшего непрерывную СФП

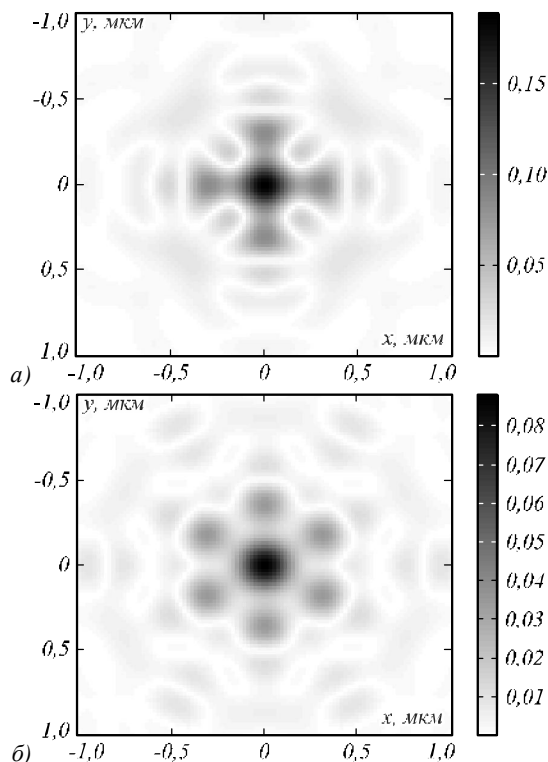


Рис. 8. Ошибка в фокусе, вычисленная как  $|I_{ideal} - I_{quasi}| / \max(I_{ideal})$  для 4-секторного (а) и 6-секторного (б) азимутально-поляризованного пучка

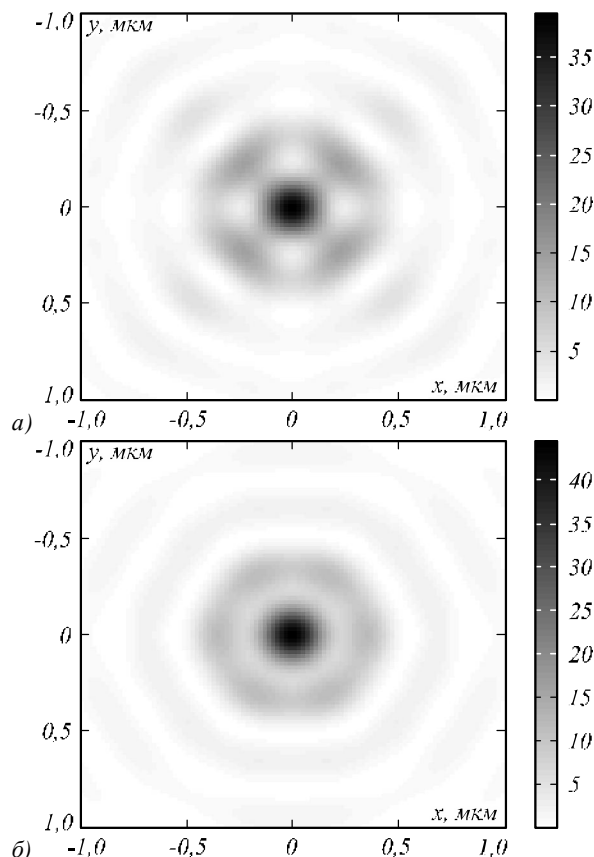


Рис. 9. Распределение интенсивности в фокусном пятне при фокусировке азимутально-поляризованного пучка, прошедшего 4-секторную (а), 6-секторную (б) СФП

Для наглядности в табл. 1 и 2 показаны результаты сравнения проведённых моделирований. Погрешность показана в табл. 1, а диаметры пятна – в табл. 2.

Табл. 1. Максимальная погрешность распределения интенсивности в фокусе

	Число секторов	Максимальная погрешность $\max( I_{ideal} - I_{quasi}  / \max(I_{ideal}))$ , %
Секторная СФП Секторная поляризация	4	18,0
	6	8,6
Непрерывная СФП Секторная поляризация	4	18,9
	6	8,8
Секторная СФП, Непрерывная поляризация	4	18,9
	6	8,8

Табл. 2. Значения диаметров фокусного пятна по полуспаду интенсивности

	Число секторов	$FWHM_{min}$ , $\lambda$	$FWHM_{max}$ , $\lambda$
Секторная СФП Секторная поляризация	4	0,456	0,489
	6	0,460	0,461
Непрерывная СФП Секторная поляризация	4	0,460	0,468
	6	0,460	0,460
Секторная СФП Непрерывная поляризация	4	0,452	0,474
	6	0,460	0,460
Идеальный азимутально-поляризованный оптический вихрь		0,460	

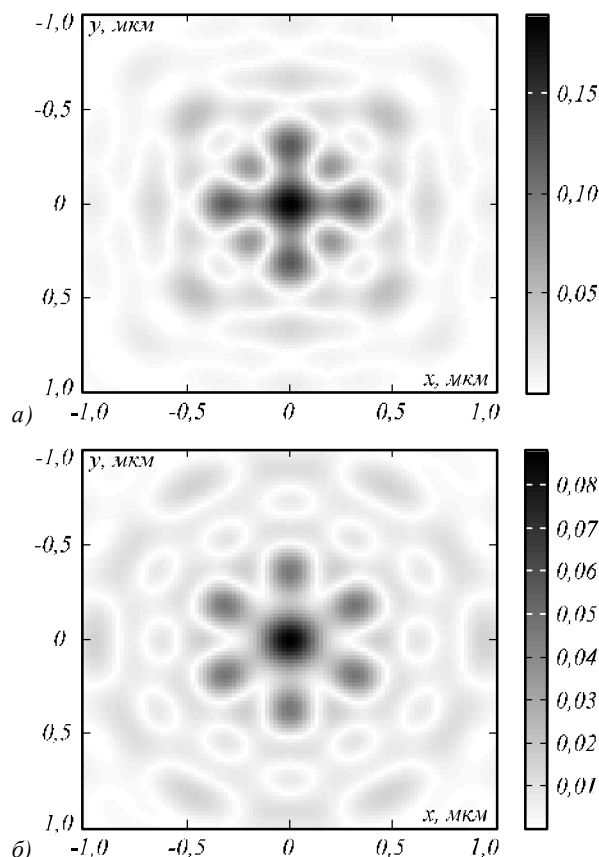


Рис. 10. Ошибка в фокусе, вычисленная как  $|I_{ideal} - I_{quasi}| / \max(I_{ideal})$  для 4-секторного (а) и 6-секторного (б) азимутально-поляризованного пучка

Из табл. 1 видно, что секторность пучка и секторность СФП оказывают примерно одинаковое влияние на результаты фокусировки. Хотя, сравнивая рис. 5 и рис. 8 и 10, можно отметить, что в случае одновременного использования секторного пучка и секторной СФП расхождение в распределении интенсивности вносится в большей степени не центральным пиком, а боковыми лепестками.

Из табл. 2 видно, что уже использование 6-секторного пучка практически не влияет на результат фокусировки – расхождение в размерах фокусного пятна по полуспаду интенсивности, вызванное асимметрией, не превышает  $0,001\lambda$ . Для 4-секторного пучка расхождение не превышало  $0,03\lambda$ .

**Заключение**

В данной статье мы численно рассмотрели острую фокусировку оптического вихря с посекторной азимутальной поляризацией (длина волны  $\lambda = 532$  нм) зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой  $NA = 0,95$ . Численно показано, что при фокусировке пучка с секторностью 6 результаты фокусировки практически не отличаются от фокусировки идеального азимутально-поляризованного вихря – расхождения в размерах фокусного пятна по полуспаду интенсивности, вызванные асимметрией, не превышают  $0,001\lambda$ . Для 4-секторного пучка расхождение не превышало  $0,03\lambda$ .

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2016.9) и молодого кандидата наук (МК-9019.2016.2), а также грантов РФФИ (15-07-01174, 15-47-02492, 16-29-11698, 16-47-630483).

**Литература**

1. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57. – DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
2. **Anita, G.Th.** Effect of coma on tightly focused cylindrically polarized vortex beams / G.Th. Anita, N. Umamageswari, K. Prabakaran, T.V.S. Pillai, K.B. Rajesh // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – Vol. 76. – P. 1-5. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.07.002.
3. **Yuan, G.H.** Generation of nondiffracting quasi-circular polarization beams using an amplitude modulated phase hologram / G.H. Yuan, S.B. Wei, X.-C. Yuan // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28, Issue 8. – P. 1716-1720. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.001716.
4. **Suresh, P.** Generation of a strong uniform transversely polarized nondiffracting beam using a high-numerical-aperture lens axicon with a binary phase mask / P. Suresh, C. Mariyal, K.B. Rajesh, T.V.S. Pillai, Z. Jaroszewicz // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52, Issue 4. – P. 849-853. – DOI: 10.1364/AO.52.000849.
5. **Yuan, G.H.** Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X.-C. Yuan // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 17. – P. 3479-3481. – DOI: 10.1364/OL.36.003479.
6. **Chen, Z.** 4Pi focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams / Z. Chen, D. Zhao // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, Issue 8. – P. 1286-1288. – DOI: 10.1364/OL.37.001286.
7. **Ndagano, B.** Beam quality measure for vector beams / B. Ndagano, H. Sroor, M. McLaren, C. Rosales-Guzmán, A. Forbes // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, Issue 15. – P. 3407-3410. – DOI: 10.1364/OL.41.003407.
8. **Qin, F.** Shaping a subwavelength needle with ultra-long focal length by focusing azimuthally polarized light // F. Qin, K. Huang, J. Wu, J. Jiao, X. Luo, C. Qiu, M. Hong // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – 09977 (9 p.). – DOI: 10.1038/srep09977.
9. **Porfirev, A.P.** Polarization conversion when focusing cylindrically polarized vortex beams / A.P. Porfirev, A.V. Ustinov, S.N. Khonina // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – 6 (9 p.). – DOI: 10.1038/s41598-016-0015-2.
10. **Hao, X.** Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35, Issue 23. – P. 3928-3930. – DOI: 10.1364/OL.35.003928.

11. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91, Issue 23. – P. 233901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
12. **Machavariani, G.** Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, Issue 11. – P. 1468-1470. – DOI: 10.1364/OL.32.001468.
13. **Machavariani, G.** Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Communications*. – 2008. – Vol. 281, Issue 4. – P. 732-738. – DOI: 10.1016/j.optcom.2007.10.088.
14. **Алфёров, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.
15. **Imai, R.** Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry / R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 20. – P. 21896-21904. – DOI: 10.1364/OE.20.021896.
16. **Man, Z.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Z. Man, C. Min, Y. Zhang, Z. Shen, X.-C. Yuan // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, Issue 10. – P. 105001 (5 p.). – DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
17. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 229-236.
18. **Stafeev, S.S.** Microlens-aided focusing of linearly and azimuthally polarized laser light / S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, D. Gibson, S. Song, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, Issue 26. – P. 29800-29813. – DOI: 10.1364/OE.24.029800.
19. **Kotlyar, V.V.** Subwavelength micropolarizer in a gold film for visible light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, M.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, L. O'Faolain // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 19. – P. 5025-5032. – DOI: 10.1364/AO.55.005025.
20. **Man, Z.** Tight focusing of quasi-cylindrically polarized beams / Z. Man, C. Min, S. Zhu, X.-C. Yuan // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2014. – Vol. 31, Issue 2. – P. 373-378. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.000373.
21. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1959. – Vol. 253, Issue 1274. – P. 358-379. – DOI: 10.1098/rspa.1959.0200.

**Сведения об авторах**

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область

научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007

**Котляр Виктор Викторович**, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

ГРНТИ: 29.31.01.

Поступила в редакцию 26 января 2017 г. Окончательный вариант – 27 марта 2017 г.

## TIGHT FOCUSING OF A SECTOR-WISE AZIMUTHALLY POLARIZED OPTICAL VORTEX

S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

### Abstract

In this article we numerically investigated tightly focusing an optical vortex with sector-wise azimuthal polarization by a Fresnel zone plate with numerical aperture  $NA = 0.95$ . The focal spot produced by a six-sector beam was shown practically not to differ from the focus produced by an ideal azimuthally polarized optical vortex, with the difference in the size of the focal spots not exceeding 0.001 of the wavelength of light.

**Keywords:** tight focusing, azimuthally polarized light, optical vortex.

**Citation:** Stafeev SS, Kotlyar VV. Tight focusing of a sector-wise azimuthally polarized optical vortex. *Computer Optics* 2017; 41(2): 147-154. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-147-154.

**Acknowledgements:** The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, RF Presidential grants for support of leading scientific schools (NSh-4128.2016.9) and young candidate of science (MK-9019.2016.2), and the Russian Foundation of Basic Research grants (Nos. 15-07-01174, 15-47-02492, 16-29-11698, and 16-47-630483).

### References

- [1] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon* 2009; 1: 1-57. DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
- [2] Anita GT, Umamageswari N, Prabakaran K, Pillai TVS, Rajesh KB. Effect of coma on tightly focused cylindrically polarized vortex beams. *Optics & Laser Technology* 2016; 76: 1-5. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.07.002.
- [3] Yuan GH, Wei SB, Yuan X-C. Generation of nondiffracting quasi-circular polarization beams using an amplitude modulated phase hologram. *JOSA A* 2011; 28(8): 1716-1720. DOI: 10.1364/JOSAA.28.001716.
- [4] Suresh P, Mariyal C, Rajesh KB, Pillai TVS, Jaroszewicz Z. Generation of a strong uniform transversely polarized nondiffracting beam using a high-numerical-aperture lens axicon with a binary phase mask. *Appl Opt* 2013; 52(4): 849-853. DOI: 10.1364/AO.52.000849.
- [5] Yuan GH, Wei SB, Yuan X-C. Nondiffracting transversely polarized beam. *Opt Lett* 2011; 36(17): 3479-3481. DOI: 10.1364/OL.36.003479.
- [6] Chen Z, Zhao D. 4Pi focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams. *Opt Lett* 2012; 37(8): 1286-1288. DOI: 10.1364/OL.37.001286.
- [7] Ndagano B, Sroor H, McLaren M, Rosales-Guzmán C, Forbes A. Beam quality measure for vector beams. *Opt Lett* 2016; 41(15): 3407-3410. DOI: 10.1364/OL.41.003407.
- [8] Qin F, Huang K, Wu J, Jiao J, Luo X, Qiu C, Hong M. Shaping a subwavelength needle with ultra-long focal length by focusing azimuthally polarized light. *Scientific Reports* 2015; 5: 09977. DOI: 10.1038/srep09977.
- [9] Porfiriev AP, Ustinov AV, Khonina SN. Polarization conversion when focusing cylindrically polarized vortex beams. *Scientific Reports* 2016; 6: 6. DOI: 10.1038/s41598-016-0015-2.
- [10] Hao X, Kuang C, Wang T, Liu X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam. *Opt Lett* 2010; 35(23): 3928-3930. DOI: 10.1364/OL.35.003928.
- [11] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam. *Phys Rev Lett* 2003; 91(23): 233901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [12] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams. *Opt Lett* 2007; 32(11): 1468-1470. DOI: 10.1364/OL.32.001468.
- [13] Machavariani G, Lumer Y, Moshe I, Meir A, Jackel S. Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams. *Opt Commun* 2008; 281(4): 732-738. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.10.088.
- [14] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64.
- [15] Imai R, Kanda N, Higuchi T, Zheng Z, Konishi K, Kuwata-Gonokami M. Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry. *Opt Express* 2012; 20(20): 21896-21904. DOI: 10.1364/OE.20.021896.

- [16] Man Z, Min C, Zhang Y, Shen Z, Yuan X-C. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films. *Laser Phys* 2013; 23(10): 105001. DOI: 10.1088/1054-660X/23/10/105001.
- [17] Nalimov AG, O'Faolain L, Stafeev SS, Shanina MI, Kotlyar VV. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial. *Computer Optics* 2014; 38(2): 229-236.
- [18] Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, Gibson D, Song S, O'Faolain L, Kotlyar VV. Microlens-aided focusing of linearly and azimuthally polarized laser light. *Opt Express* 2016; 24(26): 29800-29813. DOI: 10.1364/OE.24.029800.
- [19] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kotlyar MV, Nalimov AG, O'Faolain L. Subwavelength micropolarizer in a gold film for visible light. *Appl Opt* 2016; 55(19): 5025-5032. DOI: 10.1364/AO.55.005025.
- [20] Man Z, Min C, Zhu S, Yuan X-C. Tight focusing of quasi-cylindrically polarized beams. *JOSA A* 2014; 31(2): 373-378. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000373.
- [21] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 1959; 253(1274): 358-379. DOI: 10.1098/rspa.1959.0200.

---

#### *Authors' 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](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**Victor Victorovich Kotlyar** is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in physics and mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

---

*Received January 26, 2017. The final version – March 27, 2017.*

---