

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СУБВОЛНОВОЙ ФОКУСИРОВКИ С ПОМОЩЬЮ КРЕМНИЕВОГО ЦИЛИНДРА

Савельев Д.А., Хонина С.Н.

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

### Аннотация

Произведён анализ влияния изменения размера кремниевого цилиндра с субволновым радиусом на картину дифракции Гауссовых пучков с круговой поляризацией на основе применения метода конечных разностей во временной области. Численно показано, что Гауссов пучок можно сфокусировать вблизи поверхности элемента в световое пятно, размер которого по полуспаду интенсивности равен  $0,25\lambda$ . В работе демонстрируется, что кремниевый цилиндр, освещённый лазерным пучком с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка, формирует световое пятно, центральная часть которого в основном сформирована продольной компонентой электрического поля (размер по полуспаду интенсивности равен  $0,29\lambda$ ).

**Ключевые слова:** дифракционная оптика, оптические вихри, бинарная оптика, FDTD-метод, микроцилиндр с субволновым радиусом, острая фокусировка света, круговая поляризация, ПО Меер.

### Введение

Одним из эффективных применений дифракционных микроэлементов является фокусировка лазерного излучения в ближней зоне дифракции. Известно применение для острой фокусировки массивов из простых микроэлементов (микроцилиндры, микроотверстия) [1–3], с помощью которых удалось добиться размера фокального пятна по полуспаду интенсивности (FWHM) вплоть до  $0,38\lambda$  [2]. Исследование дифракции Гауссова пучка на отдельном цилиндре с субволновым радиусом (показатель преломления  $n = 2,0$ ) показывает, что можно добиться уменьшения размера пятна по FWHM до  $0,36\lambda$  [4]. В [5] было продемонстрировано, что микровыступ обладает лучшими фокусирующими свойствами, чем микроотверстие.

Как было показано в [6], радиальная поляризация обеспечивает максимальное отношение интенсивности продольной компоненты к интенсивности поперечных компонент при острой фокусировке. Однако учитывая определённые проблемы генерации радиальной поляризации – необходимость использования сложных или дорогостоящих устройств, в работах [7–8] была рассмотрена возможность возбуждения продольной компоненты при фокусировке однородно-поляризованного излучения за счёт внесения фазовой сингулярности в падающий пучок. Такая возможность была экспериментально подтверждена в [9]. В упомянутых работах рассматривались фокусирующие элементы с показателем преломления  $n = 1,46$ . Увеличение показателя преломления позволит [8] добиться увеличения вклада продольной компоненты в картину общей интенсивности на оптической оси.

В качестве элемента с высоким показателем преломления в работе рассматривается кремний (Si), который является вторым по распространённости элементом (после кислорода) в земной коре. В настоящее время кремний и его соединения имеют разнообразные области применения, в частности, используются для изготовления полупроводниковых приборов (инте-

гральных схем, диодов, транзисторов) [10–11], солнечных батарей [12], в биологии и медицине [13]. В работе [14] для 2D микролинзы Микаэляна, изготовленной из кремния с показателем преломления 3,47, вблизи поверхности линзы было получено фокальное пятно  $0,12\lambda$  по полуспаду интенсивности (FWHM).

В данной работе проведены исследования по влиянию изменения радиуса (в диапазоне от  $0,25\lambda$  до  $2\lambda$ ) кремниевого цилиндра на картину дифракции Гауссова пучка и лазерного пучка с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка. Численные расчёты выполнены на основе конечно-разностного временного метода (FDTD), реализованного в программном продукте MEEP [15]. Рассмотрена круговая поляризация лазерного излучения, направление которой противоположно направлению вихревой фазовой сингулярности.

### Дифракция Гауссовых пучков

Численное моделирование производилось с использованием вычислительного кластера мощностью 775 GFlops. Характеристики кластера: количество ядер – 116, вычислительные узлы – 7 двоекных серверов HP ProLiant 2xBL220c, объём RAM – 112 Гб.

Параметры моделирования: длина волны излучения  $\lambda = 1,55$  мкм, размер расчётной области  $x, y, z \in [-9\lambda; 9\lambda]$ . Толщина поглощающего слоя PML –  $0,66\lambda$ , шаг дискретизации по пространству –  $\lambda/31$ , шаг дискретизации по времени –  $\lambda/(62c)$ , где  $c$  – скорость света. Источник находится внутри подложки, на расстоянии  $0,1$  мкм перед началом рельефа. Подложка занимает всё пространство до PML (погружена в PML на  $0,5$  мкм). Показатель преломления  $n$  равен 3,47. Высота выступа равнялась  $1,55\lambda$ .

Исследования проводились для двух типов лазерных пучков, которые могут быть сгенерированы в лазерных резонаторах и сохраняют свою структуру при распространении в свободном пространстве при круговой поляризации лазерного излучения: Гауссова пучка и моды Гаусса–Лагерра (0,1). Внешний вид рассматриваемых пучков приведён на рис. 1. Радиус пучка  $\sigma = 1,5\lambda$ .

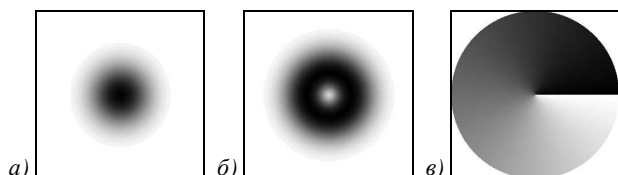


Рис. 1. Входные пучки: интенсивность Гауссова пучка (а), интенсивность моды Гаусса–Лагерра (0,1) (б), фаза моды Гаусса–Лагерра (0,1) (в)

В табл. 1 приводится распространение рассматриваемых лазерных пучков при прохождении через цилиндр с разным показателем преломления: 1,5 и 3,47. Радиус цилиндра максимален, по краям он частично вписан в поглощающий слой PML.

**Изменение размера цилиндра**

В дальнейших исследованиях будем рассматривать показатель преломления  $n = 3,47$ , соответствующий кремнию. Проведём исследование влияния изменения размера цилиндра на размер фокального пят-

на для рассматриваемых Гауссовых пучков. Дифракция Гауссова пучка показана в табл. 2, где, кроме общей интенсивности, также отдельно приводится продольная компонента ( $z$ -компонента) электрического поля. Для фундаментальной Гауссовой моды  $z$ -компонента формируется вне оптической оси, и распределение имеет вид световой трубки. Также в табл. 2 приведены размеры фокальных пятен по полупаданию интенсивности в максимумах вне элемента.

Наилучший результат был получен при размере цилиндра  $1,25\lambda$ . В этом случае в непосредственной близости от элемента формируется узкое фокальное пятно, размер которого по FWHM равен  $0,25\lambda$ .

Следует отметить, что для ряда случаев ( $r = 0,25\lambda$ ,  $r = \lambda$ ,  $r = 1,5\lambda$ ) фокусировка происходит на некотором расстоянии от элемента, даже для случая  $r = 1,25\lambda$  после фокусировки рядом с элементом наблюдается значительное ослабление интенсивности на оптической оси.

Табл. 1. Дифракция на цилиндре с разным показателем преломления Гауссовых пучков, общая интенсивность (размер области –  $10,32\lambda \times 10,32\lambda$ )

Фундаментальная Гауссова мода		Мода Гаусса–Лагерра (0,1)	
$n = 1,5$	$n = 3,47$	$n = 1,5$	$n = 3,47$
2λ 4λ 6λ 8λ 10λ	2λ 4λ 6λ 8λ 10λ	2λ 4λ 6λ 8λ 10λ	2λ 4λ 6λ 8λ 10λ

Табл. 2. Дифракция Гауссова пучка на цилиндре с субволновым радиусом при изменении радиуса цилиндра (размер области –  $5,14\lambda \times 5,84\lambda$ )

	$r = 0,25\lambda$	$r = 0,5\lambda$	$r = 0,75\lambda$	$r = \lambda$	$r = 1,25\lambda$	$r = 1,5\lambda$	$r = 2\lambda$
	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ	λ 2λ 3λ 4λ 5λ
Общая интенсивность	 FWHM = $0,69\lambda$		 FWHM = $0,66\lambda$	 FWHM = $0,82\lambda$	 FWHM = $0,25\lambda$		
Продольная компонента							

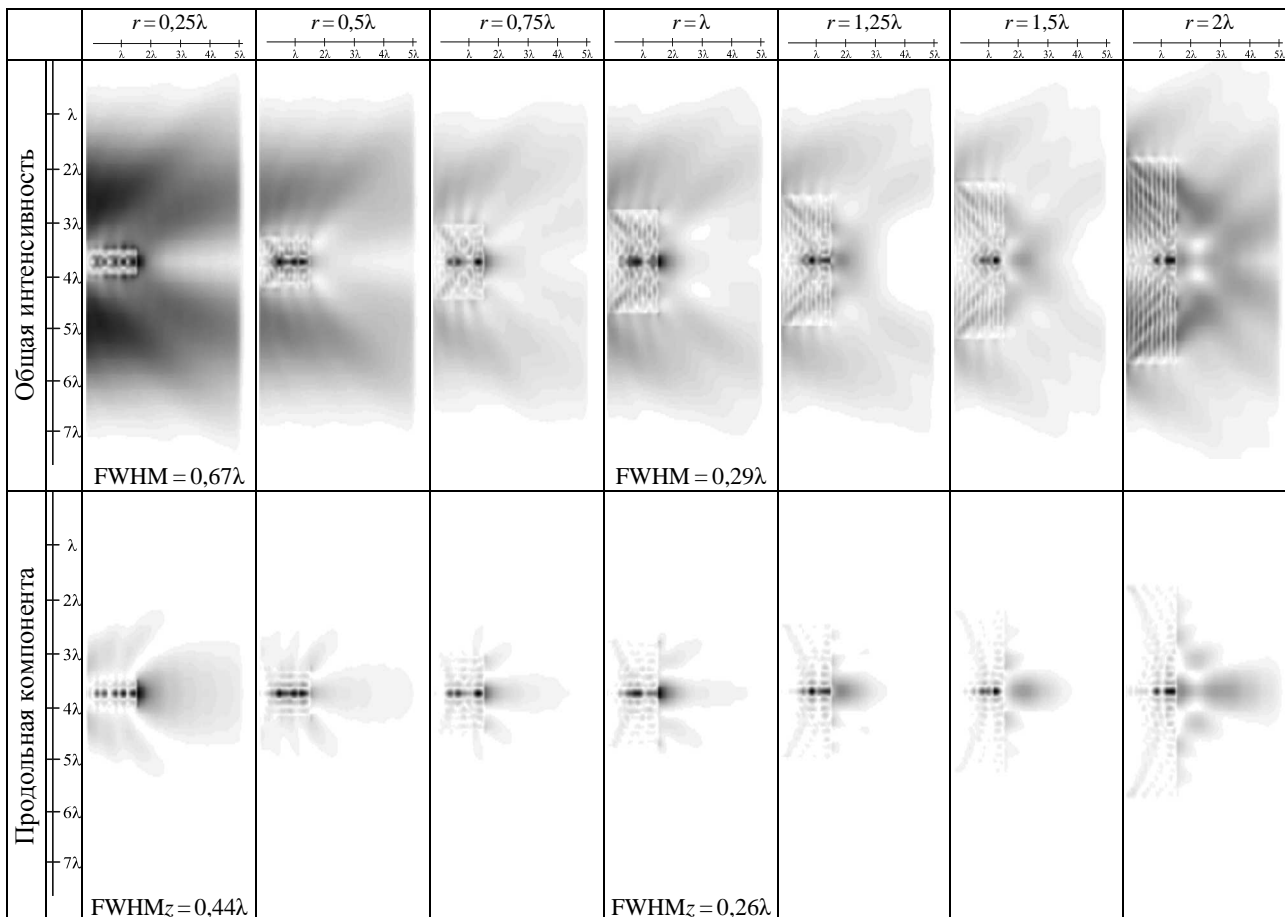
Для случаев  $r=0,25\lambda$  и  $r=\lambda$  максимум формируется на расстоянии  $0,19\lambda$  и  $0,49\lambda$  соответственно. Для случая  $r=0,75\lambda$  – непосредственно рядом с элементом. Отметим, что для всех рассматриваемых случаев глобальный максимум формируется внутри элемента. Для случая  $r=1,25\lambda$  – на границе элемента и внешней среды.

Также следует отметить, что рост радиуса цилиндра приводит к формированию максимума продоль-

ной компоненты электрического поля внутри оптического элемента, кроме случая  $r=0,25\lambda$ .

Для перераспределения продольной компоненты электрического поля с периферии на оптическую ось внесём вихревую сингулярность первого порядка противоположного поляризации знака. В табл. 3 приведены аналогичные исследования по изменению радиуса цилиндра для моды Гаусса–Лагерра (0,1).

Табл. 3. Дифракция моды Гаусса–Лагерра (0,1) на цилиндре с субволновым радиусом при изменении радиуса цилиндра (размер области –  $5,14\lambda \times 7,66\lambda$ )



Наилучший результат был получен при размере цилиндра  $\lambda$ . В этом случае рядом с элементом формируется узкое фокальное пятно, размер которого по FWHM равен  $0,29\lambda$ .

Фокусировка вне элемента происходит также при размере цилиндра  $r=0,25\lambda$ , максимум находится рядом с элементом. В остальных случаях глобальный максимум формируется внутри элемента. Отметим, в первый локальный максимум вне элемента попадает до 50 % интенсивности от глобального максимума.

Максимум продольной компоненты электрического поля также находится внутри оптического элемента, кроме случаев  $r=0,25\lambda$  и  $r=\lambda$ . Таким образом, по достижении некоторого критического радиуса (в данном случае  $r=\lambda$ ) происходит фокусировка моды Гаусса–Лагерра (0,1) в узкое фокальное пятно, в основном состоящее из продольной компоненты электрического поля.

Следует отметить, что для малого размера цилиндра ( $r=0,25\lambda$ ) как для Гауссова пучка, так и для моды Гаусса–Лагерра (0,1) происходит фокусировка вне элемента, хотя и в более широкое фокальное пятно.

Графики поперечных сечений интенсивности для моды Гаусса–Лагерра (0,1) (для случаев  $r=0,25\lambda$  и  $r=\lambda$ ) приведены на рис. 2, для Гауссова пучка – на рис. 3 (для случая  $r=1,25\lambda$ ).

Как видно из графиков на рис. 2, для случая  $r=0,25\lambda$  (рис. 2а) в картине общей интенсивности присутствуют значительные боковые лепестки, формируемые в основном поперечными компонентами электрического поля (>60 % от максимальной интенсивности). Для случая  $r=\lambda$  (рис. 2б) центральное фокальное пятно содержит в основном продольную компоненту электрического поля, амплитуда формируемых поперечными компонентами боковых лепестков составила ~20% от величины основного пика.

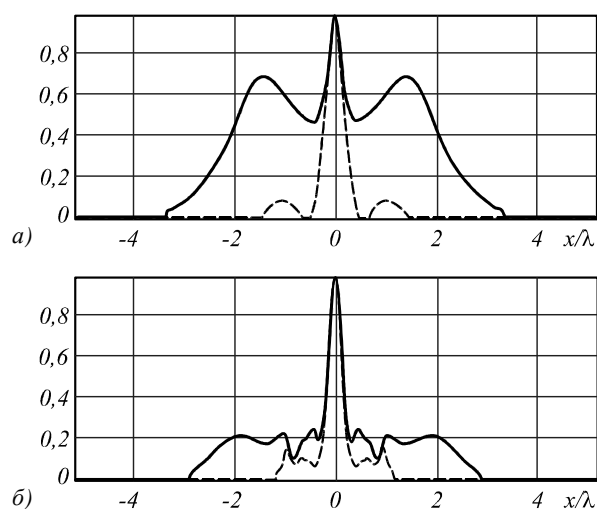


Рис. 2. Графики поперечных сечений в максимуме вне элемента, сплошной линией показана общая интенсивность, пунктирной – продольная компонента для моды Гаусса–Лагерра (0,1), радиус цилиндра равен  $0,25\lambda$  (а) и  $\lambda$  (б)

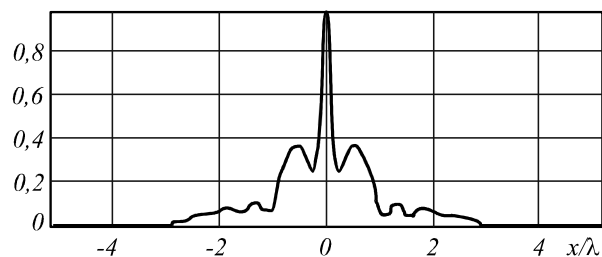


Рис. 3. График поперечного сечения общей интенсивности в максимуме вне элемента для моды Гаусса–Лагерра (0,1), радиус цилиндра равен  $1,25\lambda$

### Заключение

Численно с помощью метода FDTD показано, что для острой фокусировки лазерных пучков с круговой поляризацией, в том числе пучков с фазовой сингулярностью, возможно использование отдельного кремниевого цилиндра с субволновым радиусом.

Наименьший размер фокального пятна Гауссова пучка с круговой поляризацией достигается при радиусе цилиндра  $1,25\lambda$ . В этом случае обеспечивается фокусировка в круглое световое пятно, состоящее из поперечных компонент электрического поля. Минимальный размер светового пятна по уровню полуспада интенсивности  $\text{FWHM} = 0,25\lambda$ , что лучше, чем цилиндр, демонстрируемый в [4] ( $0,36\lambda$ ).

Наименьший размер фокального пятна для моды Гаусса–Лагерра (0,1) вне элемента достигается при радиусе цилиндра  $\lambda$ . Численно показано, что рассматриваемый кремниевый цилиндр, освещенный лазерным пучком с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка, формирует световое пятно, центральная часть которого содержит продольную компоненту электрического поля (минимальный размер  $\text{FWHM}_z = 0,26\lambda$ ). Общая интенсивность светового пятна содержит поперечно-поляризованные боковые лепестки, что уширяет размер пятна до  $\text{FWHM} = 0,29\lambda$ .

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

### Литература

1. **Chang, W.L.** Fabricating subwavelength array structures using a near-field photolithographic method / W.L. Chang, Y.J. Chang, P.H. Tsao and P.K. Wei // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88. – P. 101109.
2. **Wei, P.-K.** Focusing subwavelength light by using nano-holes in a transparent thin film / P.-K. Wei, W.-L. Chang, K.L. Lee, E.-H. Lin // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1867-1869.
3. **Котляр, В.В.** Фотонные струи, сформированные квадратными микроступеньками / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Ю. Фельдман // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 72-80.
4. **Хонина, С.Н.** Острая фокусировка лазерного излучения с помощью двухзонного аксиального микроэлемента / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев, А.В. Устинов // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 160-169.
5. **Савельев, Д.А.** Влияние субволновых деталей микро-рельефа на картину дифракции Гауссовых пучков / Д.А. Савельев, С.Н. Хонина // Вестник СГАУ. – 2014. – Т. 43, № 1. – С. 275-286.
6. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // Physical Review Letters. – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.
7. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Journal of the Optical Society of America A. – 2010. – Vol. 27(10). – P. 2188-2197.
8. **Хонина, С.Н.** Высокоапертурные бинарные аксиконы для формирования продольной компоненты электрического поля на оптической оси при линейной и круговой поляризации освещающего пучка / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 144, № 4. – С. 718-726.
9. **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. – P. 085704.
10. **Лебедев, А.** SiC электроника. Прошлое, настоящее, будущее / А. Лебедев, С. Сбруев // Электроника: наука. технология. Бизнес. – 2006. – № 5. – С. 23-41.
11. **Герасименко, Н.Н.** Кремний – материал наноэлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с.
12. **Емельянов, В.М.** Исследование световой деградации tandemных  $\alpha$ -Si: H/ $\mu$ c-Si: H солнечных фотопреобразователей / В.М. Емельянов, А.С. Абрамов, А.В. Бобыль, А.С. Гудовских, Д.Л. Орехов, Е.И. Теруков, Н.Х. Тимошина, О.И. Честна, М.З. Шварц // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 5. – С. 667-674.
13. **Ксенофонтова, О.И.** Пористый кремний и его применение в биологии и медицине / О.И. Ксенофонтова, А.В. Васин, В.В. Егоров, А.В. Бобыль, Ф.Ю. Солдатенков, Е.И. Теруков, В.П. Улин, О.И. Кисилев // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 67-78.
14. **Котляр, В.В.** Градиентные элементы микрооптики для достижения сверхразрешения / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, А.Г. Налимов // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 369-378.
15. **Oskooi, A.F.** Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson // Computer Physics Communications. – 2010. – Vol. 181. – P. 687-702.

## References

1. **Chang, W.L.** Fabricating subwavelength array structures using a near-field photolithographic method / W.L. Chang, Y.J. Chang, P.H. Tsao and P.K. Wei // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 88. – P. 101109.
2. **Wei, P.-K.** Focusing subwavelength light by using nanoholes in a transparent thin film / P.-K. Wei, W.-L. Chang, K.L. Lee, E. H. Lin // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1867-1869.
3. **Kotlyar, V.V.** Photonic nanojets formed by square microsteps / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.Y. Feldman // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(1). – P. 72-80. – (In Russian).
4. **Khonina, S.N.** Diffraction of laser beam on a two-zone cylindrical microelement / S.N. Khonina, D.A. Savelyev, A.V. Ustinov // *Computer Optics*. – 2013. – Vol. 37(2). – P. 160-169. – (In Russian).
5. **Savelyev, D.A.** Influence of subwave details of a microrelief on a diffraction picture of Gaussian beams / D.A. Savelyev, S.N. Khonina // *Vestnik SSAU*. – 2014. – Vol. 43(1). – P. 275-286. – (In Russian).
6. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.
7. **Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2010. – Vol. 27(10). – P. 2188-2197.
8. **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.
9. **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. – P. 085704.
10. **Lebedev, A.** SiC electronics. Past, present, future / A. Lebedev, S. Sbruev // *Electronics: science. Technology. Business*. – 2006. – Vol. 5. – P. 23-41. – (In Russian).
11. **Gerasimenko, N.N.** Silicon – the material nanoelectronics / N.N. Gerasimenko, Y.N. Parkhomenko – Moscow: “Technosphere” Publisher, 2006. – 352 p. – (In Russian).
12. **Emelyanov, V.M.** Investigation of light-induced degradation of tandem  $\alpha$ -Si: H/ $\mu$ c-Si: H photoconverters / V.M. Emelyanov, A.S. Abramov, A.V. Bobyl, A.S. Gudovskikh, D.L. Orekhov, E.I. Terukov, N.Kh. Timoshina, O.I. Chosta, M.Z. Shvarts // *Semiconductor Physics and Technology*. – 2013. – Vol. 47(5). – P. 667-674. – (In Russian).
13. **Ksenofontova, O.I.** Porous silicon and its application in biology and medicine / O.I. Ksenofontova, A.V. Vasin, V.V. Egorov, A.V. Bobyl, F.U. Soldatenkov, E.I. Terukov, V.P. Ulin, O.I. Kiselev // *Journal of Technical Physics*. – 2014. – Vol. 84(1). – P. 67-78. – (In Russian).
14. **Kotlyar, V.V.** Gradient-index element of microoptics for superresolution / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // *Computer Optics*. – 2009. – Vol. 33(4). – P. 369-378. – (In Russian).
15. **Oskooi, A.F.** Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method / A.F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson // *Computer Physics Communications*. – 2010. – Vol. 181. – P. 687-702.

## NUMERICAL ANALYSIS OF SUBWAVELENGTH FOCUSING USING A SILICON CYLINDER

D.A. Savelyev, S.N. Khonina

Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,  
Samara State Aerospace University

## Abstract

The analysis of the impact of variations in the size of a silicon micro-cylinder with a subwavelength radius on the diffraction of circularly polarized Gaussian beams was performed using a finite-difference time-domain (FDTD) method. It is numerically shown that a Gaussian beam can be focused near the surface of the element in a light spot, whose size at full-width at half-maximum of the intensity is  $0.25\lambda$ . It is demonstrated that the silicon cylinder illuminated by a laser beam with a vortex phase singularity of the first order forms a light spot, with its central part mainly formed by the longitudinal component of the electric field. (FWHM =  $0.29\lambda$ ).

**Key words:** diffractive optics, optical vortices, binary optics, FDTD-method, micro-cylinder with subwavelength radius, sharp focusing of light, circular polarization, Meep software.

## Сведения об авторах



**Савельев Дмитрий Андреевич**, 1988 года рождения, магистр прикладной математики и информатики, в 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная математика и информатика». Инженер НИЛ-35 СГАУ, стажёр-исследователь лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: оптическая и цифровая обработка изображений, дифракционная оптика, сингулярная оптика, оптика ближнего поля.

E-mail: [dmitrey.savelyev@yandex.ru](mailto:dmitrey.savelyev@yandex.ru).

**Dmitry Andreevich Savelyev**, (b. 1985) Master of Applied Mathematics and Computer Science, received master's degree in Samara State Aerospace University (2011). Engineer of scientific research laboratory (SRL-35) of SSAU, trainee researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests: optical and digital image processing, diffractive optics, singular optics, near-field optics.

Сведения об авторе **Хонина Светлана Николаевна** – см. стр. 605 этого номера.

Поступила в редакцию 10 ноября 2014 г.