

УДК 535.42

## ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА ЦИЛИНДРАХ С СУБВОЛНОВЫМ РАДИУСОМ

© 2014 Д.А. Савельев

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 28.11.2014

Проведен численный анализ дифракции Гауссова пучка и моды Гаусса – Лагерра (0,1) на цилиндре с субволновым радиусом при круговой поляризации входного излучения на основе метода конечных разностей во временной области. Определены характеристики, обеспечивающие субволновую фокусировку, такие как размер деталей, вид лазерного излучения, показатель преломления цилиндра. Численно показано, что продольную компоненту электрического поля можно сфокусировать вблизи поверхности элемента в световое пятно, размер которого по полуспаду интенсивности равен  $0,27 \lambda$  при общей интенсивности  $0,39 \lambda$ .

*Ключевые слова:* дифракционная оптика, субволновая фокусировка, микроцилиндры, Меер, метод FDTD.

### ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач острой фокусировки в ряде случаев применяются массивы из простых микроэлементов (микроцилиндров, микроотверстий) [1 – 3], с помощью которых удалось добиться размера фокального пятна по полуспаду интенсивности (FWHM) вплоть до  $0,38 \lambda$  [2]. В [4] было продемонстрировано, что микровыступ обладает лучшими фокусирующими свойствами, чем микроотверстие. Исследование дифракции гауссова пучка на цилиндре с субволновым радиусом (показатель преломления  $n = 2,0$ ) методом конечных разностей во временной области показывает, что можно добиться уменьшения размера пятна по FWHM до  $0,36 \lambda$  [5].

Внесение в освещающий пучок линейной или вихревой фазовой сингулярности может быть использовано для изменения картины дифракции за счет перераспределения энергии между компонентами электромагнитного поля [6-10], что является альтернативой использованию радиальной поляризации, которая обеспечивает максимальное отношение интенсивности продольной компоненты к интенсивности поперечных компонент [11].

В работе [12] продольная компонента электрического поля формировалась на оптической оси при фокусировке однородно-поляризованного излучения за счёт внесения фазовой сингулярности в падающий пучок. Такая возможность была экспериментально подтверждена в [13]. В упомянутых работах рассматривались фокуси-

рующие элементы с показателем преломления  $n = 1,46$ . Увеличение показателя преломления позволит [14] добиться увеличения вклада продольной компоненты в картину общей интенсивности на оптической оси.

В данной работе проведены численные исследования влияния на картину дифракции гауссовых пучков таких характеристик как: показатель преломления, ширина и высота оптического элемента. Рассмотрены фундаментальная Гауссова мода и мода Гаусса–Лагерра (0,1), то есть лазерный пучок с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка. Численное моделирование выполнено на основе метода конечных разностей во временной области (FDTD), реализованного в программном продукте Меер [15].

### 1. ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА СУБВОЛНОВОМ ЦИЛИНДРЕ. ИЗМЕНЕНИЕ РАДИУСА ЦИЛИНДРА

Численное моделирование производилось с использованием метода конечных разностей во временной области, реализованного в программном пакете Меер, на вычислительном кластере ИР, мощностью 775 GFlops.

Параметры моделирования: длина волны излучения  $\lambda = 0,532$  мкм, размер расчётной области  $x, y, z \in [-7 \lambda; 7 \lambda]$ , толщина поглощающего слоя PML со всех сторон окружающего расчетную область –  $1,5 \lambda$ , шаг дискретизации по пространству –  $\lambda / 21$ , шаг дискретизации по времени –  $\lambda / (42c)$ , где  $c$  – скорость света. Источник находится внутри подложки, на расстоянии  $0,11$  перед выступом. В работе рассматривались показатели преломления  $n$  цилиндра, соответствую-

*Савельев Дмитрий Андреевич, стажёр-исследователь  
ЛЛИ ИСОИ РАН, аспирант СГАУ.  
E-mail: dmitrey.savelyev@yandex.ru*

ющие следующим материалам: Fused Silica ( $n = 1,46$ ), N-SF5 (Scott,  $n = 1,68$ ), LaSF 1.9/30 ( $n = 1,9$ ). Высота микро-цилиндра, соответствующая фазовому скачку  $\pi$  радиан составляет:

$$h = \frac{\pi}{k(n-1)} = \frac{\lambda}{2(n-1)}. \quad (1)$$

Таким образом,  $h_{1,46} = 1,09 \lambda$ ,  $h_{1,68} = 0,73 \lambda$ ,  $h_{1,9} = 0,56 \lambda$ . Исследования проводились для двух типов лазерных пучков, сохраняющих свою структуру при распространении в свободном пространстве: Гауссова пучка и моды Гаусса–Лагерра (0,1). Рассматривалась круговая поляризация лазерного излучения.

Будем варьировать размер радиуса  $r$  рассматриваемых цилиндров. Результат моделирования для Гауссова пучка приведен в табл. 1.

Для большинства рассмотренных случаев, фокус формировался внутри цилиндра. Для  $r = \lambda$  максимум формируется вне оптического элемента при всех рассматриваемых  $n$ . Отметим, что рост показателя преломления  $n$  приводит к формированию фокального пятна вне цилиндра для  $r = 0,5 \lambda$  (при  $n = 1,9$ ). Увеличение радиуса  $r$  приводит к росту полуширины по полуспаду интенсивности. Лучший результат был получен при радиусе цилиндра  $0,5 \lambda$  при  $n = 1,68$ . В этом случае на границе элемента и среды формируется фокальное пятно, размер которого по FWHM равен  $0,58 \lambda$ .

Аналогичные исследования для моды Гаусса–Лагерра (0,1) приведены в табл. 2, где кроме общей интенсивности также приведена интенсивность продольной компоненты электрического поля.

Следует отметить, что для моды Гаусса–Лагерра (0,1) во всех рассмотренных случаях фокусировка происходит вне рассматриваемых микроцилиндров. Рассматривался размер фокального пятна по продольной компоненте электрического поля. При  $n = 1,68$  и  $n = 1,46$ , увеличение радиуса приводит к более острой фокусировке вплоть до  $0,33 \lambda$  для  $n = 1,68$ . Для  $n = 1,9$  увеличение радиуса сначала приводило к уменьшению фокального пятна, потом оно начинало увеличиваться.

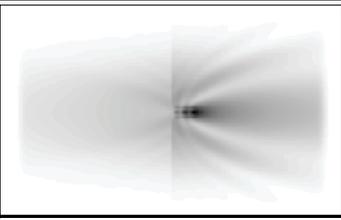
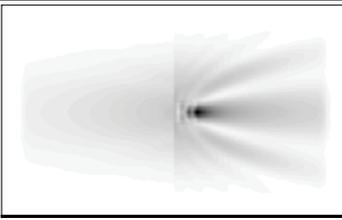
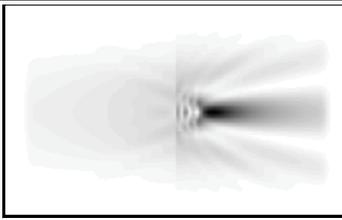
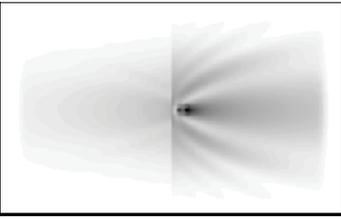
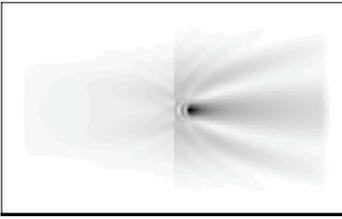
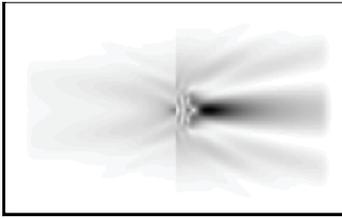
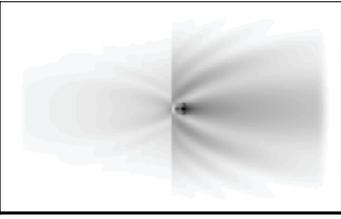
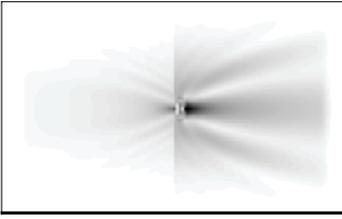
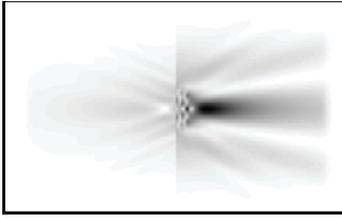
## 2. ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ НА СУБВОЛНОВОМ ЦИЛИНДРЕ. ИЗМЕНЕНИЕ ВЫСОТЫ ЦИЛИНДРА

В предыдущем разделе варьировался радиус и показатель преломления рассматриваемого оптического элемента. Зафиксируем радиус и будем варьировать высоту выступа.

В ходе исследований предыдущего раздела, был выбран ряд случаев, которые рассматривались при изменении высоты цилиндра с субволновым радиусом.

В первом разделе высота выбиралась исходя из набега фазы в  $\pi$ . В табл. 3 приведены продоль-

**Таблица 1.** Дифракция Гауссова пучка на цилиндре (показана общая интенсивность электрического поля  $|\mathbf{E}|^2$  в плоскости  $Y=0$  в области  $[17 \lambda \times 10,5 \lambda]$ )

$n$	$r = 0,25\lambda$	$r = 0,5\lambda$	$r = \lambda$
1,46	 FWHM = $0,64\lambda$	 FWHM = $0,6\lambda$	 FWHM = $0,74\lambda$
1,68	 FWHM = $0,59\lambda$	 FWHM = $0,58\lambda$	 FWHM = $0,79\lambda$
1,9	 FWHM = $0,6\lambda$	 FWHM = $0,67\lambda$	 FWHM = $0,81\lambda$

**Таблица 2.** Дифракция моды Гаусса–Лагерра (0,1) на цилиндре (показана общая интенсивность электрического поля  $|E|^2$  и интенсивность продольной компоненты  $|E_z|^2$  в плоскости  $Y=0$  в области  $[17\lambda \times 10,5\lambda]$ )

$n$	Вид	$r = 0,25\lambda$	$r = 0,5\lambda$	$r = \lambda$
1,46	Общая интенсивность			
	Компонента z	 FWHMz = 0,54λ	 FWHMz = 0,45λ	 FWHMz = 0,41λ
1,68	Общая интенсивность			
	Компонента z	 FWHMz = 0,44λ	 FWHMz = 0,36λ	 FWHMz = 0,35λ
1,9	Общая интенсивность			
	Компонента z	 FWHMz = 0,39λ	 FWHMz = 0,33λ	 FWHMz = 0,42λ

ные сечения для дифракции Гауссова пучка при  $r = 0,5\lambda$  при изменении высоты (соответствует набегу фазы  $2\pi$ ). Таким образом, для рассматриваемых показателей преломления,  $n = 1,68$  и  $n = 1,9$ , высота цилиндра в этом случае равна  $h_{1,68} = 1,46\lambda$  и  $h_{1,9} = 1,12\lambda$ , соответственно.

Радиус  $r = 0,5$  в табл. 3 был выбран исходя из того, что в этом случае для  $n = 1,68$  фокус форми-

ровался внутри цилиндра, а для  $n = 1,9$  – вне оптического элемента. При анализе табл. 3. следует отметить, что увеличение высоты цилиндра привело к формированию фокуса внутри элемента. Тем не менее, размер фокального пятна в непосредственной близости от микроцилиндра (для случая  $n = 1,9$ ) при увеличении высоты  $h$  на 21% меньше, чем при рассматриваемой ранее высоте.

**Таблица 3.** Картины дифракции для Гауссова пучка при изменении высоты цилиндра, имеющего фиксированный радиус  $r = 0,5 \lambda$ , общая интенсивность,  $[17 \lambda \times 10,5 \lambda]$

Высота соответствует набегу фазы $\pi$		Высота соответствует набегу фазы $2\pi$	
$n = 1,68, h = 0,73\lambda$	$n = 1,9, h = 0,56\lambda$	$n = 1,68, h = 1,46\lambda$	$n = 1,9, h = 1,12\lambda$
FWHM = $0,58\lambda$	FWHM = $0,67\lambda$	FWHM <sub>внутри</sub> = $0,42\lambda$ FWHM <sub>снаружи</sub> = $0,61\lambda$	FWHM <sub>внутри</sub> = $0,38\lambda$ FWHM <sub>снаружи</sub> = $0,53\lambda$

Как следует из табл. 2, для  $n = 1,68$  рост радиуса цилиндра приводит к уменьшению фокального пятна. Зафиксируем показатель преломления цилиндра и будем варьировать высоту (аналогично табл. 3) и, одновременно, увеличим радиус оптического микроэлемента. В табл. 4 приведены картины дифракции на микро-цилиндре моды Гаусса – Лагерра (0,1) и размеры фокальных пятен по FWHM для общей интенсивности и продольной компоненты.

Из табл. 4 можно увидеть, что увеличение высоты приводит к формированию фокуса внутри цилиндра, тем не менее, в непосредственной близости от оптического элемента было получено фокальное пятно сопоставимого размера. При увеличении высоты формируется более широкое фокальное пятно для общей интенсивности при одновременном уменьшении размера фокального пятна, формируемого продольной компонен-

той электрического поля.

Увеличение радиуса при одновременном увеличении высоты цилиндра позволяет получить лучший результат: FWHM =  $0,43 \lambda$  (FWHM<sub>z</sub> =  $0,3 \lambda$ ). Также отметим, что рост высоты цилиндра приводит к сокращению фокального светового отрезка, формируемого продольной компонентой электрического поля. Рост радиуса цилиндра приводит увеличению длины такого светового отрезка.

Рассмотрим далее лучший случай из табл. 2 ( $n = 1,9, r = 0,5$ ), варьируя изменение высоты с меньшим шагом. Продольные картины дифракции моды Гаусса – Лагерра (0,1) и размеры фокальных пятен по FWHM для общей интенсивности и продольной компоненты приведены в табл. 5.

Значение общей интенсивности для случая высоты  $h = 0,56 \lambda$  было FWHM =  $0,57 \lambda$ . Как сле-

**Таблица 4.** Картины дифракции для моды Гаусса-Лагерра (0,1) при изменении высоты цилиндра с показателем преломления  $n = 1,68 [17 \lambda \times 10,5 \lambda]$

	$h = 0,73\lambda, r = \lambda$	$h = 1,46\lambda$	
		$r = \lambda$	$r = 1,5\lambda$
Общая интенсивность	 FWHM = $0,46\lambda$	 FWHM <sub>внутри</sub> = $0,59\lambda$ FWHM <sub>снаружи</sub> = $0,58\lambda$	 FWHM <sub>внутри</sub> = $0,44\lambda$ FWHM <sub>снаружи</sub> = $0,43\lambda$
Продольная компонента	 FWHM <sub>z</sub> = $0,35\lambda$	 FWHM <sub>z</sub> = $0,33\lambda$	 FWHM <sub>z</sub> = $0,3\lambda$

**Таблица 5.** Картины дифракции для моды Гаусса-Лагерра (0,1) при изменении высоты цилиндра с показателем преломления  $n = 1,9$  и радиусом  $r = 0,5 [17 \lambda \times 10,5 \lambda]$

	$h = 0,69\lambda$	$h = 0,83\lambda$	$h = 1,07\lambda$	$h = 1,12\lambda$ (набег фазы $2\pi$ )
Общая интенсивность				
	FWHM = 0,45λ	FWHM = 0,44λ	FWHM = 0,44λ	FWHM = 0,39λ
Продольная компонента				
	FWHM <sub>z</sub> = 0,31λ	FWHM <sub>z</sub> = 0,3λ	FWHM <sub>z</sub> = 0,29λ	FWHM <sub>z</sub> = 0,27λ

дует из табл. 5, в непосредственной близости от оптического элемента для высоты  $h = 1,12 \lambda$  удалось сформировать узкое фокальное пятно размером  $FWHM = 0,39 \lambda$ , что лучше на 31,6% результата, полученного для высоты  $h = 0,56 \lambda$ . При этом размер для продольной компоненты  $FWHM_z = 0,27 \lambda$  ( $h = 1,12 \lambda$ ), что лучше на 18,2% результата, полученного для высоты  $h = 1,12 \lambda$ .

Во всех рассмотренных случаях фокус формировался в непосредственной близости от края рассматриваемых субволновых цилиндров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные исследования с помощью метода FDTD, в ходе которых были определены характеристики обеспечивающие субволновую фокусировку гауссовых пучков с круговой поляризацией на цилиндрах с субволновым радиусом такие как: размер деталей, вид лазерного излучения, показатель преломления цилиндра.

В работе было показано, что уменьшение светового пятна происходит только при увеличении радиуса оптического элемента до определенного значения, превышение которого приводит к росту фокального пятна.

Рост показателя преломления элемента влияет на уменьшение размера светового пятна, а также на выбор оптимального радиуса (для большего  $n$ , оптимальный радиус будет меньше, см. табл. 1,2).

Увеличение высоты цилиндра для Гауссова пучка привело к формированию фокуса внутри элемента. Тем не менее, размер фокального пятна в непосредственной близости от микроцилин-

дра для случая  $n = 1,9$  при увеличении высоты  $h$  в два раза был на 21% меньше.

Увеличение высоты цилиндра при одновременном увеличении его радиуса для моды Гаусса – Лагерра (0,1) привело к формированию в непосредственной близости от элемента светового пятна, размер которого по  $FWHM = 0,43 \lambda$  ( $FWHM_z = 0,3 \lambda$ ) для случая  $n = 1,68$ .

Наименьший размер фокального пятна был получен для моды Гаусса–Лагерра (0,1) при следующих параметрах:  $n = 1,9$ ,  $r = 0,5$ ,  $h = 1,12 \lambda$  (набег фазы  $2\pi$ ). Рассматриваемый субволновый микроцилиндр, освещенный лазерным пучком с вихревой фазовой сингулярностью первого порядка, формирует световое пятно, центральная часть которого содержит продольную компоненту электрического поля (минимальный размер  $FWHM_z = 0,27 \lambda$ ). Общая интенсивность светового пятна содержит поперечно-поляризованные боковые лепестки, что уширяет размер пятна до  $FWHM = 0,39 \lambda$ .

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-00266, 14-07-31079 мол. а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 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. Фотонные струи, сформированные квадратными микроступеньками / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Ю. Фельдман // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, №. 1. С. 72-80.
4. Савельев Д.А., Хонина С.Н. Влияние субволновых деталей микрорельефа на картину дифракции гауссовых пучков // Вестник СГАУ. 2014. Т. 43, №. 1. С. 275-286.
5. 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.
6. Khonina, S.N., Volotovskiy S.G. Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures // J. Opt. Soc. Am. A. 2010. V. 27, №. 10. P. 2188-2197.
7. Экспериментальное исследование дифракции линейно-поляризованного гауссова пучка на бинарных микроаксиконах с периодом близким к длине волны / С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, А.А. Морозов, Р.В. Скиданов, И.А. Пустовой // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, №. 1. С. 11-21.
8. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // Journal of Modern Optics. 2011. V. 58, №. 9. P. 748-760.
9. Дифракция на бинарных микроаксиконах в ближней зоне / С.Н. Хонина, Д.А. Савельев, П.Г. Серафимович, И.А. Пустовой // Оптический журнал. 2012. Т. 79, №. 10. С. 22 – 29.
10. Khonina S.N., Golub I. Optimization of focusing of linearly polarized light // Optics Letters. 2011. Vol. 36, No. 3. P. 352-354
11. Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // Physical Review Letters. 2003. Vol. 91. P. 233901.
12. Хонина, С.Н., Савельев Д.А. Высокоапертурные бинарные аксиконы для формирования продольной компоненты электрического поля на оптической оси при линейной и круговой поляризации освещающего пучка // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2013. Т. 144. №. 4. С. 718-726.
13. 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.
14. Савельев Д.А., Хонина С.Н. Максимизация продольной электрической компоненты при дифракции на бинарном аксиконе линейно-поляризованного излучения // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, №. 4. С. 511-517.
15. Meep: A flexible free-software package for elec-tromagnetic 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.

## DIFFRACTION OF GAUSSIAN BEAMS ON A CYLINDER WITH SUBWAVELENGTH RADIUS

© 2014 D.A. Savelyev

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences  
Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The numerical analysis of the diffraction of Gaussian beam and mode Gauss - Laguerre (0,1) was held on a cylinder with a sub-wavelength radius with circular polarization of the input light, based on finite-difference time-domain method. The characteristics that provide subwavelength focusing such as the size of details, type of laser, the refractive index of the cylinder, were defined. Numerically shown that the longitudinal component of the electric field can be focused near the surface of the element in the spot light, the size of which at full width at half maximum of intensity is  $0,27 \lambda$  with total intensity  $0,39 \lambda$ .

*Key words:* diffractive optics, sub-wavelength focusing, micro-cylinders, Meep software, FDTD-method.