

## СУБВОЛНОВАЯ ФОКУСИРОВКА С ПОМОЩЬЮ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ФРЕНЕЛЯ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ 532 НМ

Стафеев С.С.<sup>1,2</sup>, О'Фаолейн Л.<sup>3</sup>, Шанина М.И.<sup>1</sup>, Котляр В.В.<sup>1</sup>, Соифер В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН,

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

<sup>3</sup>Школа физики и астрономии университета Сент-Эндрюса, Шотландия

### Аннотация

Изготовлена и исследована фазовая бинарная зонная пластинка с фокусным расстоянием 532 нм, радиусом 7,7 мкм и глубиной рельефа 510 нм. С помощью ближнепольного микроскопа показано, что при освещении пластинки линейно поляризованным Гауссовым пучком с длиной волны 532 нм формируется фокусное пятно с диаметром интенсивности по полуспаду, равным 0,44 от длины волны.

**Ключевые слова:** сканирующий ближнепольный оптический микроскоп, субволновая фокусировка лазерного света, фазовая зонная пластинка.

### Введение

В настоящий момент существует большое количество работ, посвященных исследованию фокусировки света с помощью зонных пластинок (ЗП) с фокусным расстоянием, сопоставимым с длиной волны. Так, например, в статье [1] численно и экспериментально исследуется фокусировка линейно-поляризованного света с длиной волны 633 нм с помощью френелевской ЗП с фокусным расстоянием 0,5 мкм, экспериментально наблюдалось эллиптическое фокусное пятно с наименьшим диаметром  $\text{FWHM} = 0,63\lambda$  ( $\text{FWHM} = \text{full width at half maximum}$ ). В [2] было получено значение диаметра фокусного пятна равное  $\text{FWHM} = 0,39\lambda$  при моделировании методом FDTD (FDTD = finite difference time domain), а также с помощью формул Ричардса – Вольфа фокусировка плоской линейно-поляризованной волны ЗП с фокусным расстоянием 0,5 мкм. В работе [3] рассматривается фокусировка амплитудной ЗП, изготовленной на кварцевой подложке из серебра; моделирование на основе метода FDTD показывает, что диаметр фокусного пятна такой ЗП равен  $0,33\lambda$ . В статье [4] исследуется ЗП, в которой чётные зоны закрыты периодическими слоями металла (серебро) и диэлектрика (стекло), показано, что использование подобной структуры позволяет увеличить дифракционную эффективность зонной пластинки до 40%, а рассчитанный диаметр фокусного пятна равен в данном случае  $\text{FWHM} = 0,48\lambda$ .

В данной работе исследовалась фазовая ЗП Френеля с фокусным расстоянием  $f = 0,532$  мкм (т.е. равным длине волны освещающего света), радиусом 7,7 мкм и глубиной рельефа 510 нм. С помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа исследовалось прохождение линейно-поляризованного Гауссова пучка с длиной волны  $\lambda = 532$  нм через такую ЗП. Экспериментально зарегистрировано фокусное пятно с диаметром по полуспаду интенсивности равным  $\text{FWHM} = 0,44\lambda$ . Также было проведено численное моделирование (методом FDTD) фокусировки света данной ЗП, которое показало, что диаметр фокусного пятна равен  $\text{FWHM} = 0,42\lambda$ , при этом среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой от расчётной было равно 5%. Это лучший результат для ЗП на сегодняшний день.

### 1. Эксперимент

Зонная пластинка высокого качества была изготовлена по технологии электронной литографии из резиста ZEP (показатель преломления резиста  $n = 1,52$ ). На рис. 1а показано изображение ЗП в электронном микроскопе.

Радиусы ЗП рассчитывались по известной формуле  $r_m = (m\lambda f + m^2\lambda^2/4)^{1/2}$ , где  $f$  – фокусное расстояние,  $m$  – номер радиуса. Эксперимент осуществлялся с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа NTEGRA Spectra (NT-MDT).

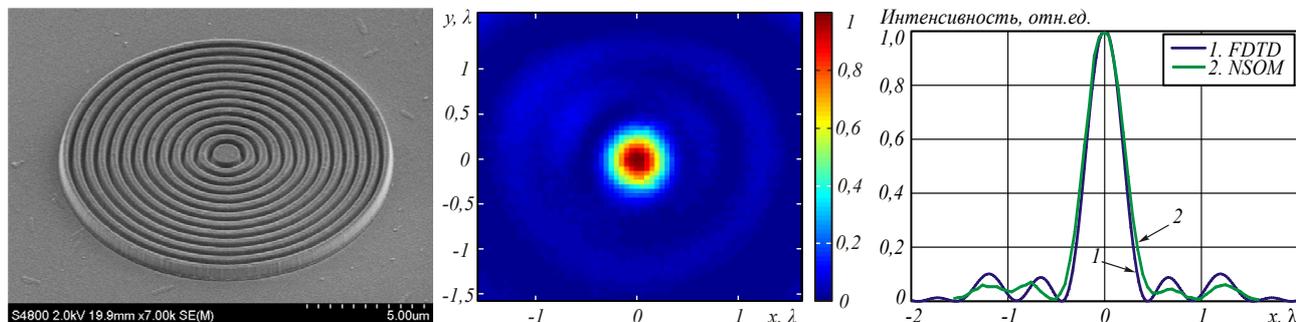


Рис. 1. Изображение зонной пластинки в электронном микроскопе (а), распределение интенсивности в фокусе зонной пластинки (б), распределение интенсивности вдоль оси  $x$  в фокусе (в): моделирование (кривая 1) и эксперимент (кривая 2)

ЗП освещалась линейно-поляризованным Гауссовым пучком с длиной волны 532 нм, затем измерялось распределение интенсивности на различных расстояниях от поверхности зонной пластинки. На рис. 1б показано распределение интенсивности в фокусе зонной пластинки. Фокусное пятно обладает эллиптичностью – диаметр пятна вдоль оси  $x$  меньше диаметра вдоль оси  $y$  (поляризация направлена вдоль оси  $y$ ). Наименьший диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен  $\text{FWHM}=0,44\lambda$ . На рис. 1в (кривая 2, NSOM = near-field scanning optical microscope) показано экспериментальное распределение интенсивности в фокусе вдоль оси  $x$  (рис. 1б).

## 2. Моделирование

С целью проверки полученных результатов было проведено численное моделирование методом FDTD. Была использована модификация метода FDTD для цилиндрической системы координат, реализованная в среде Matlab 2011b. В моделировании рассматривалась фокусировка линейно-поляризованного Гауссова пучка с шириной  $\omega=7\lambda$  и длиной волны  $\lambda=532$  нм. Размер вычисляемой области вдоль оси  $z$  был равен  $17\lambda$ , вдоль оси  $r$  –  $24\lambda$ , длина сетки по пространству –  $\lambda/50$ , по времени –  $\lambda/100c$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. На краях вычисляемой области использовались слои Беренгера толщиной  $\lambda$ . На рис. 1в (кривая 1) показано распределение интенсивности в фокусе, полученное при численном моделировании. Диаметр фокусного пятна равен  $0,42\lambda$ . Из рисунка видно, что обе кривые хорошо накладываются друг на друга.

## Заключение

В данной работе экспериментально с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа наблюдалось эллиптическое фокусное пятно с меньшим диаметром по полуспаду интенсивности равным  $0,44\lambda$  при фокусировке линейно-поляризованного Гауссова пучка с длиной волны  $\lambda=532$  нм ЗП с фокусным расстоянием  $f=\lambda$ . Диаметр фокусного пятна при моделировании составил  $0,42\lambda$ . Среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой от расчётной равно 5%.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0016), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-7414.2010.9).

## Литература (References)

1. **Mote, R.G.** Experimental demonstration of near-field focusing of a phase micro-Fresnel zone plate (FZP) under linearly polarized illumination / R.G. Mote, S.F. Yu, A. Kumar, W. Zhou, X.F. Li // *Appl. Phys. B.* – 2011. – V. 102. – P. 95-100.
2. **Mote, R.G.** Subwavelength focusing behavior of high numerical-aperture phase Fresnel zone plates under various polarization states / R.G. Mote, S.F. Yu, W. Zhou, X.F. Li // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – V. 95. – P. 191113.
3. **Fu, Y.** Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime / Y. Fu, W. Zhou, L.E.N. Lim, C.L. Du, X.G. Luo // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 91. – P. 061124
4. **Kim, H.C.** High efficient optical focusing of a zone plate composed of metal/dielectric multilayer / H.C. Kim, H. Ko, M. Cheng // *Opt. Exp.* – 2009. – V. 17. – P. 3078-3083.

## SUBWAVELENGTH FOCUSING USING FRESNEL ZONE PLATE WITH FOCAL LENGTH OF 532NM

S.S. Stafeyev<sup>1,2</sup>, L. O'Faolain<sup>3</sup>, M.I. Shanina<sup>1</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1</sup>, V.A. Soifer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS,

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University),

<sup>3</sup> School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, Scotland

### Abstract

Using a near-field scanning optical microscope we measure a focal spot resulting from the illumination the phase zone plate with focal length 532 nm, radius 7,7  $\mu\text{m}$  and etch depth 510 nm by linearly polarized Gaussian beam with wavelength 532 nm. The diameter of focal spot equals to 0,44 of wavelength. The root-mean-square deviation of the focal spot intensity from the calculated value is 5%.

**Key words:** scanning nearfield optical microscope, subwavelength focusing of laser light, phase zone plate.

### Сведения об авторах

Сведения об авторах – см. стр. 9, 10 тома 35 №1 журнала Компьютерная оптика.

Поступила в редакцию 25 сентября 2011 г.