

СУБВОЛНОВАЯ ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ИЗ ХРОМА

А.Г. Налимов^{1,2}, С.С. Стафеев^{1,2}, Е.С. Козлова^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}, Лим О'Фаолейн³, М.В. Котляр²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

³ Школа физики и астрономии, Университет Сент-Эндрюса, Великобритания

Аннотация

Проведено исследование характеристик фокусного пятна, формируемого зонной пластинкой диаметром 15 мкм из пленки хрома на стеклянной подложке и фокусным расстоянием в одну длину волны $\lambda = 532$ нм, в зависимости от высоты рельефа. Исследование показало, что высота рельефа 70 нм позволяет достичь оптимального соотношения размеров фокусного пятна по полуспаду интенсивности и максимальной интенсивности. С использованием сканирующего ближнепольного оптического микроскопа показано, что зонная пластинка с указанными параметрами фокусирует линейно поляризованный Гауссов пучок в эллиптическое пятно с размерами по полуспаду интенсивности вдоль декартовых координат $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,64\lambda$.

Ключевые слова: амплитудная зонная пластинка, фазовая зонная пластинка, острая фокусировка, FDTD-метод, сканирующий ближнепольный оптический микроскоп.

Цитирование: Налимов, А.Г. Субволновая фокусировка лазерного излучения с помощью зонной пластинки из хрома / А.Г.Налимов, С.С.Стафеев, Е.С.Козлова, В.В.Котляр, Лим О'Фаолейн, М.В.Котляр // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 356-362. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-356-362.

Введение

Зонная пластинка (ЗП) известна в оптике давно, однако интерес к её изучению не ослабевает. При этом в связи с миниатюризацией компонентов фотоники в последние годы отмечается повышение интереса к исследованию зонных пластинок, фокусирующих свет вблизи своей поверхности. Такие ЗП могут быть как фазовыми, так и амплитудными. ЗП из некоторых металлов носят название плазмонных зонных пластинок или линз (SPP-линз). В [1] FDTD-методом проведено моделирование фокусировки света зонной пластинкой с радиусом колец $r_n^2 = 2nf\lambda + n^2\lambda^2$ ($f = 1$ мкм, $\lambda = 633$ нм), изготовленной в плёнке серебра и золота (толщина плёнок – 50 нм), напылённых на кварцевую подложку. Было показано, что на расстоянии $z = 1,5$ мкм от ЗП формируется фокальное пятно с диаметром по полуспаду интенсивности $\text{FWHM} = 0,3\lambda$, при этом интенсивность в фокусе данного пятна всего в 1,4 раза превосходит интенсивность падающего излучения. В [2] экспериментально исследованы аналогичные кольцевые структуры (диаметр 8 мкм) в плёнке золота толщиной 100 нм. В микроскопе ближнего поля Ntegra (NT-MDT) с разрешением 100 нм на расстоянии $z = 1,6$ мкм наблюдалось фокальное пятно шириной по полуспаду интенсивности $\text{FWHM} = 1,7\lambda$, $\lambda = 633$ нм, хотя теория предсказывает размер фокального пятна $\text{FWHM} = 0,54\lambda$ [2]. В [3] 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 наименьшей шириной $\text{FWHM} = 0,63\lambda$. В [4] было получено значение диаметра фокусного пятна, равное $\text{FWHM} = 0,39\lambda$ при моделировании методом FDTD. Также в [4] с помощью формул Ричардса-Вольфа получена фокусировка плоской линейно-

поляризованной волны амплитудной ЗП с фокусным расстоянием 0,5 мкм. В работе [5] рассматривается фокусировка амплитудной ЗП, изготовленной на кварцевой подложке из серебра. Моделирование на основе метода FDTD показывает, что ширина фокусного пятна такой ЗП равна $0,33\lambda$. В [6] экспериментально было показано, что фазовая ЗП с фокусным расстоянием $f = \lambda = 532$ нм фокусирует свет в эллиптическое субволновое пятно с размерами $\text{FWHM}_x = 0,44\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,52\lambda$. Изменение длины волны освещающего света приводило к тому, что пятно становилось еще более эллиптическим: $\text{FWHM}_x = 0,40\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,60\lambda$ [7], хотя меньший размер пятна при этом уменьшается.

Плазмонные линзы, фокусирующие затухающие волны вблизи своей поверхности, часто имеют достаточно простую структуру в виде набора концентрических колец. Например, в [8] рассмотрена SPP-линза, состоящая из трех концентрических кольцевых щелей шириной 300 нм в слое германия. Такая линза способна сфокусировать свет в субволновое пятно с диаметром по полуспаду интенсивности $0,6\lambda$. Плазмонная линза, состоящая из двух концентрических колец шириной 350 нм и глубиной 200 нм в тонкой пленке золота и работающая для двух длин волн, была изучена в [9]. В [10] рассмотрена планарная линза, состоящая из трех ступенек рельефа: крайние ступеньки общей шириной 320 нм имели форму перевернутой буквы «П», т.е. имели небольшую щель посередине ступеньки шириной и глубиной 80 нм. Центральная ступенька имела ширину 320 нм и высоту 120 нм. Такая структура фокусировала свет в линию шириной по полуспаду интенсивности $0,34$ от длины волны фокусируемого света. SPP-линза, изготовленная на торце волновода, исследовалась в [11]: были рассмотрены две линзы – состоящие из 3 и 4 колец, обе диаметром 2,8 мкм и шириной первого кольца 60 нм. Фокусировка входного

излучения с длиной волны 808 нм наблюдалась в водном растворе, что позволило наблюдать фокусное пятно с $\text{FWHM}=0,31\lambda$. В [12] рассмотрена плазмонная линза, состоящая из двух наборов concentрических колец, отличающихся периодом. Внутренняя часть линзы состояла из 10 колец с периодом 640 нм, а внешняя – из 9 колец с периодом 20 нм. Несмотря на то, что линза позволяет получить фокусное пятно $0,3\lambda$, оно формируется в непосредственной близости от поверхности линзы, на расстоянии 80 нм. Интересный способ субволновой фокусировки предложен в [13] – для уменьшения пятна bowtie-наноантенна помещалась в область фокуса, создаваемого плазмонной ЗП Френеля. Плазмонная линза с переменной глубиной рельефа, изготовленная из алюминия на стеклянной подложке, была рассмотрена в [14]. Линза, осуществляющая фокусировку в точку, была рассмотрена численно, а планарный её аналог был изготовлен и исследован методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. При фокусировке в точку диаметр пятна составлял $\text{FWHM}=0,9\lambda$. Линейно-поляризованный свет при острой фокусировке формирует эллиптическое фокусное пятно. Для получения радиально-симметричного пятна необходимо, чтобы фокусируемый свет также обладал симметрией в поляризации. В частности, можно воспользоваться радиально-поляризованным пучком. SPP-линза для радиально-поляризованного света рассмотрена в [15]. Ширина фокусного пятна по полуспаду интенсивности составила $0,46\lambda$ ($\lambda=632,8$ нм). В [16] исследуется SPP-линза, предназначенная для фокусировки радиально-поляризованного света с длиной волны 355 нм. Два различных численных метода: конечно-разностный метод FDTD и метод конечных элементов, реализованный в COMSOL Multiphysics, были применены для исследования в [16]. Исследуемая линза представляла собой столбик (nanofinger) диаметром 45 нм, окружённый кольцами шириной 230 нм. Изготовлена она была в плёнке хрома толщиной 60 нм, напылённой на кварцевую подложку. Несмотря на то, что подобная линза была изготовлена, в работе не приведены результаты экспериментов по фокусировке с помощью изготовленного элемента. Работа SPP-линзы, изготовленной в слое серебра толщиной 405 нм, моделировалась в работе [17]. Линза также представляла собой набор concentрических колец, однако глубина канавок рельефа изменялась, что приводило к изменению фокусного расстояния.

Из приведённого обзора работ видно, что большинство из них носит чисто теоретический характер. В большинстве работ ширина пятна по полуспаду интенсивности превышает величину в $0,45\lambda$. А в тех работах, где удается уменьшить ширину пятна, фокусировка происходит в непосредственной близости от поверхности элемента, а максимальная интенсивность не превышает падающую волну в 2 раза. В данной работе теоретически и экспериментально исследуется ЗП Френеля из хрома на кварцевом стекле, которая позволяет фокусировать линейно-поляризован-

ное излучение в пятно с шириной по полуспаду интенсивности менее $0,45\lambda$. Моделирование распространения лазерного излучения с длиной волны $\lambda=532$ нм выполнялось с помощью FDTD-метода. Ранее подобная ЗП моделировалась в [18], где с помощью FDTD-метода было проведено сравнение её фазовой и амплитудной (в плёнках хрома и серебра) реализаций. Было показано, что учёт дисперсии материала (кварца, серебра и хрома) в рамках модели Селмейера и Друде–Лоренца ведет лишь к незначительному изменению параметров фокусного пятна (в пределах 6%). Размеры фокусных пятен для фазовой и амплитудной ЗП также изменялись незначительно – все пятна имеют субволновый размер от 0,41 до 0,47 от длины волны. Основное отличие заключалось в меньшей максимальной интенсивности в фокусе (она была в 3 раза меньше, чем для фазовой ЗП).

В данной работе было проведено дополнительное исследование характеристик фокусного пятна в зависимости от высоты рельефа, которое показало, что высота рельефа 70 нм позволяет достичь оптимального соотношения ширины по полуспаду интенсивности и максимальной интенсивности фокусного пятна. Также в работе представлены результаты численного эксперимента по фокусировке излучения с помощью изготовленной ЗП, высота рельефа которой составила 67,5 нм (погрешность измерений не более 5%). С использованием сканирующего ближнепольного микроскопа (СБОМ) показано, что изготовленная ЗП фокусирует линейно-поляризованный Гауссов пучок в эллиптическое пятно с декартовыми диаметрами $\text{FWHM}_x=0,42\lambda$ и $\text{FWHM}_y=0,64\lambda$, где λ – длина волны света.

Результаты моделирования

FDTD-методом было проведено численное исследование зависимости параметров фокусного пятна и максимума интенсивности в фокусе от толщины плёнки хрома, в которой была изготовлена ЗП. Моделирование проводилось для ЗП со следующими параметрами: длина волны $\lambda=532$ нм, число колец – 13, фокусное расстояние – 532 нм, показатель преломления хрома $n=2,66+4,16i$. Шаг сетки отсчётов по координатам x и y , составил 20 нм, а по координате z – 10 нм. Шаг по времени был уменьшен до 7 нм. Вектор поляризации падающего излучения направлен вдоль координаты y . Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Табл. 1. Зависимости параметров фокусного пятна от высоты рельефа зонной пластинки из хрома

h , нм	I_{\max} , а.у.	FWHM_x , λ	FWHM_y , λ	DOF, λ	f , мкм
20	3,65	0,467	0,858	0,850	0,617
30	3,46	0,465	0,859	0,850	0,635
40	4,88	0,459	0,890	0,892	0,635
50	4,48	0,456	0,890	0,890	0,653
60	4,94	0,448	0,898	0,897	0,654
70	5,44	0,454	0,902	0,917	0,670
80	4,93	0,447	0,902	0,903	0,670
90	5,25	0,453	0,906	0,920	0,670
100	4,67	0,452	0,908	0,914	0,688

Из табл. 1 видно, что с увеличением толщины рельефа максимальная интенсивность растёт. При этом ширина по полуспаду интенсивности вдоль оси x меняется незначительно, в то время как ширина вдоль другой координаты растёт вместе с глубиной фокуса. С увеличением высоты рельефа смещается и фокусное расстояние, которое измерялось до точки максимальной интенсивности на оптической оси. Отметим, что вдоль оси x наблюдается единый пик, в то время как вдоль оси y наблюдается расщепление пика на два. Максимальная интенсивность указана для центра фокусного пятна на оптической оси.

Изготовление и моделирование с учетом ошибок изготовления

Амплитудная зонная пластинка с рельефом из хрома была изготовлена по технологии электронной литографии. ЗП имела 13 колец из хрома, высота плёнки хрома на стекле была равна 70 нм, диаметр ЗП равен 15 мкм, она проектировалась для длины волны 532 нм и фокусного расстояния, равного длине волны. Рельеф ЗП был измерен с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro P7 (НТ-МДТ, Россия). Колебания высоты в соответствии с измерениями составили от 51 до 84 нм (рис. 1), средняя высота рельефа – 67,5 нм, возможная погрешность измерения высоты была равна 5%. Радиус заострения используемого кантилевера был в пределах 10 нм.

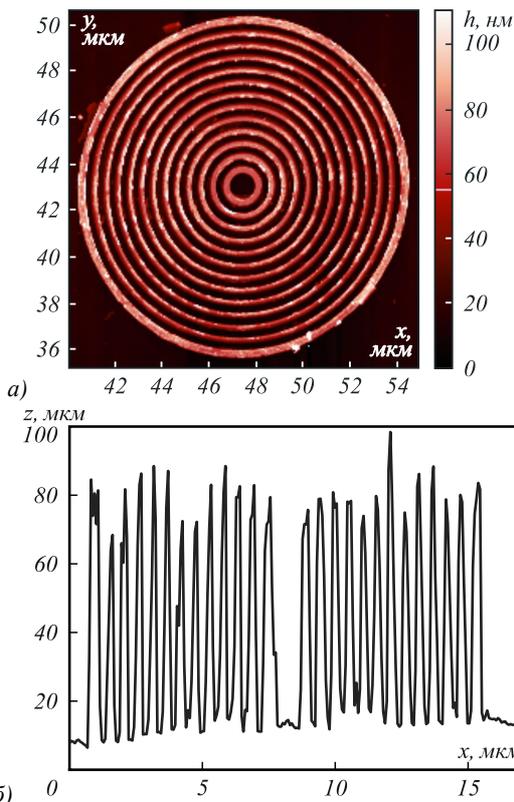


Рис. 1. Рельеф поверхности ЗП из хрома, измеренный на атомно-силовом микроскопе, и его профиль вдоль оси y

Полученный при измерении рельеф был перенесен в программу FullWave для моделирования прохождения через него света методом FDTD. Параметры моде-

лирования следующие: длина падающей плоской волны – 532 нм, показатель преломления хрома $n = 2,66 + 4,16i$ [20], показатель преломления подложки $n = 1,5$, подробность разбиения сетки $\lambda/30$ по всем трём координатам, весь рельеф зонной пластинки имеет 256×256 отсчетов, использовалась линейная поляризация. Ниже показаны результаты моделирования прохождения света через зонную пластинку. Вектор поляризации падающего света направлен вдоль оси y .

Из рис. 2 видно, что ширина по полуспаду интенсивности электрического поля $|E|^2$ вдоль осей x и y составляет $FWHM_x = 0,482\lambda$, $FWHM_y = 0,88\lambda$. Эффективность как отношение энергии света, формирующего фокусное пятно вплоть до первых минимумов интенсивности, ко всей энергии света, прошедшей ЗП, составила $\eta = 5,5\%$.

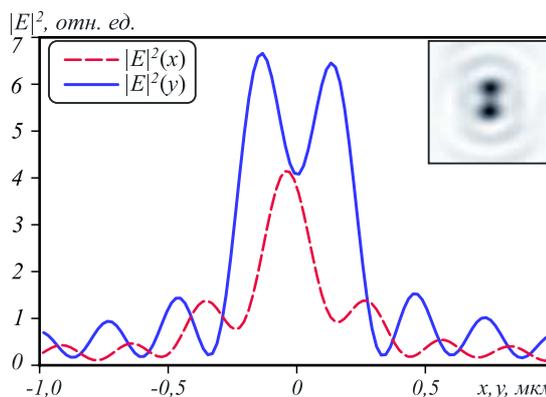


Рис. 2. Результат моделирования ЗП, изображенной на рис. 1. Показаны сечения интенсивности по декартовым осям

Экспериментальное определение ширины фокусного пятна производилось на оборудовании NTEGRA Spectra (НТ-МДТ, Россия) с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ). Сканирование производилось при помощи кантилевера с пирамидальным отверстием, остриё которого имеет форму квадрата со стороной 100 нм. Такой кантилевер гораздо более чувствителен к поперечным компонентам электрического поля, нежели к продольной (в 3 раза), поэтому была численно оценена форма фокусного пятна при учёте только поперечных компонент электрического поля [6]. На рис. 3 приведено рассчитанное фокусное пятно и его сечения, сформированные только поперечными проекциями электрического поля E_x и E_y . Видно, что без компоненты E_z фокусное пятно перестает быть гантелеобразным, однако оно всё равно лишено круговой симметрии. Его ширина по полуспаду интенсивности вдоль тех же осей уменьшается и становится равна $FWHM_x = 0,387\lambda$, $FWHM_y = 0,5\lambda$.

Экспериментальные результаты

С помощью СБОМ Ntegra Spectra (NT-MDT) было проведено исследование распространения линейно поляризованного Гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 532$ нм через амплитудную ЗП из хрома. Оптическая схема измерений с помощью СБОМ показана на рис. 4.

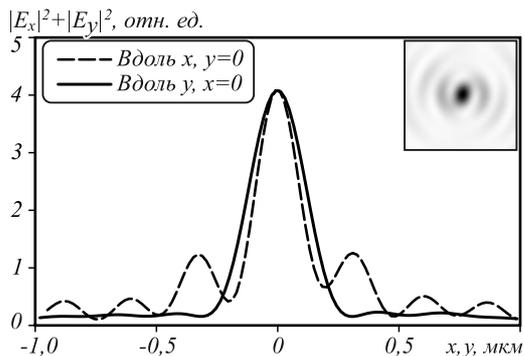


Рис. 3. Вид фокусного пятна, созданного только с помощью поперечных проекций электрического поля. Показаны сечения интенсивности по декартовым осям

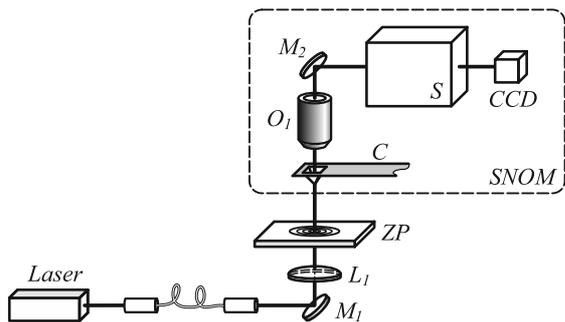


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента: SNOM – СБОМ, Laser – лазер, ZP – зонная пластинка, L₁ – фокусирующая линза, M₁, M₂ – поворотные зеркала, С – кантилевер, O₁ – микрообъектив, S – спектрометр, CCD – ПЗС-камера

Линейно-поляризованный лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 532$ нм фокусируется с помощью линзы L_1 на подложку. После фокусировки ЗП измеряется поперечное распределение интенсивности в плоскости, параллельной ЗП на различных расстояниях (через каждые 50 нм) с использованием полого металлического кантилевера C . Прошедший через отверстие кантилевера свет фокусируется с помощью 100-кратного объектива O_1 и проходит через спектрометр S (Solar TII, Nanofinder 30) для фильтрации irrelevantного излучения, прежде чем будет зарегистрирован CCD-камерой (Andor, DV401-BV).

Результирующий экспериментальный профиль интенсивности в фокусе представлен на рис. 5. Экспериментальные данные были интерполированы кубическим сплайном.

Из рис. 5 видно, что в ходе освещения бинарной ЗП из хрома линейно-поляризованным Гауссовым пучком (вектор поляризации направлен вдоль оси y), на расстоянии 800 нм формируется эллиптическое фокальное пятно с размерами по декартовым осям $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,64\lambda$. Инструментальная ошибка измерений составляет не более $0,03\lambda$.

Заключение

В данной работе теоретически и экспериментально исследуется ЗП Френеля из хрома на кварцевом стекле, которая позволяет фокусировать линейно-поляризованное излучение в пятно с шириной по полу-

спаду интенсивности менее $0,45\lambda$. Моделирование распространения линейно-поляризованного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 532$ нм выполнялось через рассматриваемую ЗП с помощью FDTD-метода. Было проведено дополнительное исследование характеристик фокусного пятна в зависимости от высоты рельефа, которое показало, что высота рельефа в 70 нм позволяет достичь оптимального соотношения ширины по полуспаду интенсивности и максимальной интенсивности фокусного пятна.

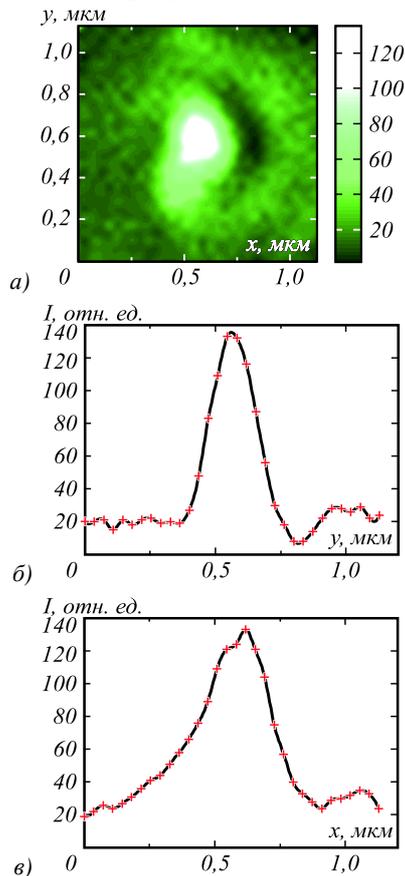


Рис. 5. Интенсивность в фокусе, измеренная с помощью СБОМ Ntegra Spectra: (а) 2D-распределение интенсивности и профили интенсивности вдоль y - (б) и x - (в) осей. Кресты – экспериментальные данные, линия – интерполяция с помощью кубического сплайна

В работе представлены результаты численного эксперимента по фокусировке излучения с помощью изготовленной ЗП, высота рельефа которой составила 67,5 нм (погрешность измерений – 5%). С использованием сканирующего ближнепольного микроскопа (СБОМ) показано, что ЗП из хрома с высотой рельефа 67,5 нм, диаметром 15 мкм и фокусным расстоянием λ фокусирует линейно-поляризованный Гауссов пучок в эллиптическое пятно размером $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,64\lambda$, где λ – длина волны света. Это на 15% больше, чем размеры пятна, полученные с помощью моделирования: $\text{FWHM}_x = 0,387\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,5\lambda$.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01186.

Литература

- Fu, Y.** Hybrid Au-Ag subwavelength metallic structures with variant periods for superfocusing / Y. Fu, W. Zhou // *Journal of Nanophotonics*. – 2009. – Vol. 3, Issue 1. – 033504. – DOI: 10.1117/1.3159299.
- Fu, Y.** Experimental study of plasmonic structures with variant periods for sub-wavelength focusing: analyses of characterization errors / Y. Fu, R.G. Mote, Q. Wang, W. Zhou // *Journal of Modern Optics*. – 2009. – Vol. 56, Issue 14. – P. 1550-1556. – DOI: 10.1080/09500340903180566.
- 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 // *Applied Physics B*. – 2011. – Vol. 102, Issue 1. – P. 95-100. – DOI: 10.1007/s00340-010-4210-8.
- 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 // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95, Issue 19. – 191113. – DOI: 10.1063/1.3263728.
- Fu, Y.** Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime / Y. Fu, W. Zhou, L.E.N. Lim, C.L. Du, X.G. Luo // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 91, Issue 6. – 061124. – DOI: 10.1063/1.2769942.
- Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52, Issue 3. – P. 330-339. – DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60, Issue 13. – P. 1050-1059. – DOI: 10.1080/09500340.2013.831136.
- Wang, T.** Experimental verification of the far-field subwavelength focusing with multiple concentric nanorings / T. Wang, X. Wang, C. Kuang, X. Hao, X. Liu // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 97, Issue 23. – 231105. – DOI: 10.1063/1.3524825.
- Venugopalan, P.** Focusing dual-wavelength surface plasmons to the same focal plane by a far-field plasmonic lens / P. Venugopalan, Q. Zhang, X. Li, L. Kuipers, M. Gu // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 19. – P. 5744-5747. – DOI: 10.1364/OL.39.005744.
- Chen, K.R.** Beyond-limit light focusing in the intermediate zone / K.R. Chen, W.H. Chu, H.C. Fang, C.P. Liu, C.H. Huang, H.C. Chui, C.H. Chuang, Y.L. Lo, C.Y. Lin, H.H. Hwung, A.Y.-G. Fuh // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 23. – P. 4497-4499. – DOI: 10.1364/OL.36.004497.
- Liu, Y.** Far-field superfocusing with an optical fiber based surface plasmonic lens made of nanoscale concentric annular slits / Y. Liu, H. Xu, F. Stief, N. Zhitenev, M. Yu // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19, Issue 21. – P. 20233-20243. – DOI: 10.1364/OE.19.020233.
- Song, W.** Near-field nanofocusing through a combination of plasmonic Bragg reflector and converging lens / W. Song, Z. Fang, S. Huang, F. Lin, X. Zhu // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 14. – P. 14762-14767. – DOI: 10.1364/OE.18.014762.
- Feng, D.** 3D confinement of the focal spot of plasmonic Fresnel zone plate lens using gold bowtie nanoantenna / D. Feng // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2014. – Vol. 31, Issue 9. – P. 2070-2074. – DOI: 10.1364/JOSA.31.002070.
- Wang, H.** Subwavelength light focusing of plasmonic lens with dielectric filled nanoslits structures / H. Wang, Y. Deng, J. He, P. Gao, N. Yao, C. Wang, X. Luo // *Journal of Nanophotonics*. – 2014. – Vol. 8, Issue 1. – 083079. – DOI: 10.1117/1.JNP.8.083079.
- Zhang, M.** Three-dimensional nanoscale far-field focusing of radially polarized light by scattering the SPPs with an annular groove / M. Zhang, J. Du, H. Shi, S. Yin, L. Xia, B. Jia, M. Gu, C. Du // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 14. – P. 14664-14670. – DOI: 10.1364/OE.18.014664.
- Ji, J.** Strong focusing of plasmonic lens with nanofinger and multiple concentric rings under radially polarized illumination / J. Ji, Y. Meng, L. Sun, X. Wu, J. Wang // *Plasmonics*. – 2015. – Vol. 11, Issue 1. – P. 23-27. – DOI: 10.1007/s11468-015-0015-2.
- Peng, R.** Super-resolution long-depth focusing by radially polarized light irradiation through plasmonic lens in optical meso-field / R. Peng, X. Li, Z. Zhao, C. Wang, M. Hong, X. Luo // *Plasmonics*. – 2014. – Vol. 9, Issue 1. – P. 55-60. – DOI: 10.1007/s11468-013-9597-8.
- Козлова, Е.С.** Сравнительное моделирование амплитудной и фазовой зонных пластинок / Е.С. Козлова, В.В. Котляр, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 687-693. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-687-693.
- Couairon, A.** Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses / A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz // *Physical Review B*. – 2005. – Vol. 71, Issue 12. – 125435. – DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
- Rakic, A.D.** Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A.D. Rakic, A.B. Djurišić, J.M. Elazar, M.L. Majewski // *Applied Optics*. – 1998. – Vol. 37, Issue 22. – P. 5271-5283. – DOI: 10.1364/AO.37.005271.
- Vial, A.** A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method / A. Vial, T. Laroche, M. Dridi, L. Le Cunff // *Applied Physics A*. – 2011. – Vol. 103, Issue 3. – P. 849-853. – DOI: 10.1007/s00339-010-6224-9.

Сведения об авторах

Сведения об авторах **Налимов Антон Геннадьевич, Стафеев Сергей Сергеевич, О'Фаолейн Лим, Котляр Мария Викторовна** см. стр. 311 этого выпуска.

Козлова Елена Сергеевна, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** см. стр. 336 этого выпуска.

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 5 мая 2017 г. Окончательный вариант – 15 мая 2017 г.

SUBWAVELENGTH FOCUSING OF LASER LIGHT USING A CHROMIUM ZONE PLATE

A.G. Nalimov^{1,2}, S.S. Stafeev^{1,2}, E.S. Kozlova^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}, L.O'Faolain³, M.V. Kotlyar²

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

³ SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews, Scotland

Abstract

We study in which way the parameters of a focal spot generated by a chromium zone plate 15- μm in diameter synthesized by sputtering on a glass substrate and having a focal length equal to the incident wavelength of $\lambda = 532$ nm depend on the microrelief height. It is shown numerically that an optimal microrelief height of the zone plate is 70 nm. With these parameters, the minimal size of the focal spot is achieved. Using a scanning near field optical microscope the said zone plate is shown to focus a linearly polarized Gaussian beam into an elliptical focal spot having the full-width at half-maximum of $\text{FWHM}_x = 0.42\lambda$ and $\text{FWHM}_y = 0.64\lambda$ along the Cartesian axes.

Keywords: amplitude zone plate, phase zone plate, sharp focus, FDTD method, scanning near field optical microscope.

Citation: Nalimov AG, Stafeev SS, Kozlova ES, Kotlyar VV, O'Faolain L, Kotlyar MV. Subwavelength focusing of laser light using a chromium zone plate. *Computer Optics* 2017; 41(3): 356-362. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-356-362.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Science Foundation (RSF), grant No. 17-19-01186.

References

- [1] Fu Y, Zhou W. Hybrid Au-Ag subwavelength metallic structures with variant periods for superfocusing. *J Nanophoton* 2009; 3(1): 033504. DOI:10.1117/1.3159299.
- [2] Fu Y, Mote RG, Wang Q, Zhou W. Experimental study of plasmonic structures with variant periods for sub-wavelength focusing: analyses of characterization errors. *J Mod Opt* 2009; 56(14): 1550-1556. DOI: 10.1080/09500340903180566.
- [3] Mote RG, Yu SF, Kumar A, Zhou W, Li XF. Experimental demonstration of near-field focusing of a phase micro-Fresnel zone plate (FZP) under linearly polarized illumination. *Appl Phys B* 2011; 102(1): 95-100. DOI: 10.1007/s00340-010-4210-8.
- [4] Mote RG, Yu SF, Zhou W, Li XF. Subwavelength focusing behavior of high numerical-aperture phase Fresnel zone plates under various polarization states. *Appl Phys Lett* 2009; 95(19): 191113. DOI: 10.1063/1.3263728.
- [5] Fu Y, Zhou W, Lim LEN, Du CL, Luo XG. Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime. *Appl Phys Lett* 2007; 91(6): 061124. DOI: 10.1063/1.2769942.
- [6] Kotlyar VV, Stafeev SS, Liu Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light. *Appl Opt* 2013; 52(3): 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- [7] Stafeev SS, Kotlyar VV, O'Faolain L. Subwavelength focusing of laser light by microoptics. *J Mod Opt* 2013; 60(13): 1050-1059. DOI: 10.1080/09500340.2013.831136.
- [8] Wang T, Wang X, Kuang C, Hao X, Liu X. Experimental verification of the far-field subwavelength focusing with multiple concentric nanorings. *Appl Phys Lett* 2010; 97(23): 231105. DOI: 10.1063/1.3524825.
- [9] Venugopalan P, Zhang Q, Li X, Kuipers L, Gu M. Focusing dual-wavelength surface plasmons to the same focal plane by a far-field plasmonic lens. *Opt Lett* 2014; 39(19): 5744-5747. DOI: 10.1364/OL.39.005744.
- [10] Chen KR, Chu WH, Fang HC, Liu CP, Huang CH, Chui HC, Chuang CH, Lo YL, Lin CY, Hwung HH, Fuh AYG. Beyond-limit light focusing in the intermediate zone. *Opt Lett* 2011; 36(23): 4497-4499. DOI: 10.1364/OL.36.004497.
- [11] Liu Y, Xu H, Stief F, Zhitenev N, Yu M. Far-field super-focusing with an optical fiber based surface plasmonic lens made of nanoscale concentric annular slits. *Opt Express* 2011; 19(21): 20233-20243. DOI: 10.1364/OE.19.020233.
- [12] Song W, Fang Z, Huang S, Lin F, Zhu X. Near-field nano-focusing through a combination of plasmonic Bragg reflector and converging lens. *Opt Express* 2010; 18(14): 14762-14767. DOI: 10.1364/OE.18.014762.
- [13] Feng D. 3D confinement of the focal spot of plasmonic Fresnel zone plate lens using gold bowtie nanoantenna. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(9): 2070-2074. DOI: 10.1364/JOSA-A.31.002070.
- [14] Wang H, Deng Y, He J, Gao P, Yao N, Wang C, Luo X. Subwavelength light focusing of plasmonic lens with dielectric filled nanoslits structures. *J Nanophoton* 2014; 8(1): 083079. DOI: 10.1117/1.JNP.8.083079.
- [15] Zhang M, Du J, Shi H, Yin S, Xia L, Jia B, Gu M, Du C. Three-dimensional nanoscale far-field focusing of radially polarized light by scattering the SPPs with an annular groove. *Opt Express* 2010; 18(14): 14664-14670. DOI: 10.1364/OE.18.014664.
- [16] Ji J, Meng Y, Sun L, Wu X, Wang J. Strong focusing of plasmonic lens with nanofinger and multiple concentric rings under radially polarized illumination. *Plasmonics* 2015; 11(1): 23-27. DOI: 10.1007/s11468-015-0015-2.
- [17] Peng R, Li X, Zhao Z, Wang C, Hong M, Luo X. Super-resolution long-depth focusing by radially polarized light irradiation through plasmonic lens in optical meso-field. *Plasmonics* 2014; 9(1): 55-60. DOI: 10.1007/s11468-013-9597-8.

- [18] Kozlova ES, Kotlyar VV, Nalimov AG. Comparative modeling of amplitude and phase zone plates. *Computer Optics* 2015; 39(5): 687-693. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-687-693.
- [19] Couairon A, Sudrie L, Franco M, Prade B, Mysyrowicz A. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Phys Rev B* 2005; 71(12): 125435. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
- [20] Rakic AD, Djurišić AB, Elazar JM, Majewski ML. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Appl Opt* 1998; 37(22): 5271-5283. DOI: 10.1364/AO.37.005271.
- [21] Vial A, Laroche T, Dridi M, and Le Cunff L. A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method. *Appl Phys A* 2011; 103(3): 849-853. DOI: 10.1007/s00339-010-6224-9.

Authors' information

The information about author **Anton Gennadyevich Nalimov, Sergey S. Stafeev, Liam O'Faolain, and Maria V. Kotlyar** you can find on page 314 of this issue.

Elena Sergeevna Kozlova, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute - Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

The information about author **Victor Victorovich Kotlyar** you can find on page 337 of this issue.

Received May 5, 2017. The final version – May 15, 2017.
