

Металинза для субволновой фокусировки света

В.В. Котляр^{а,б}, А.Г. Налимов^{а,б}, С.С. Стафеев^{а,б}, Лим О'Фаолейн^в, М.В. Котляр^б

^а Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФГУ "Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук", 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия,

^а Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^в Школа физики и астрономии, Университет Сент-Эндрюса, Великобритания

Аннотация

Изготовлена и исследована тонкая металинза в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм и фокусным расстоянием равным длине волны 633 нм, с периодом субволновой структуры 220 нм и глубиной рельефа 110 нм. Она преобразует линейную поляризацию в радиальную и осуществляет острую фокусировку света. Такая металинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления. Фокусное пятно, сформированное такой линзой, при освещении её гауссовым пучком с линейной поляризацией имело размеры по декартовым осям и по полуспаду интенсивности, равные 0,49 и 0,55 длины волны. Это фокусное пятно меньше всех других фокусных пятен, полученных с помощью металинз.

Ключевые слова: бинарная оптика; метаповерхность; поляризация; фокусировка; ближнепольная микроскопия

1. Введение

В последние годы в оптике изучаются плоские бинарные компоненты микрооптики толщиной меньше длины волны, состоящие из набора субволновых элементов (столбиков, щелей, отрезков, решеток) из металла или полупроводника, которые одновременно могут менять поляризацию, амплитуду и фазу падающего лазерного излучения. Такие компоненты фотоники называются компонентами с метаповерхностью (КМП). Обзор по ним можно найти в [1]. С помощью КМП можно сформировать оптические вихри [2]; пилообразные решетки, отражающие 80% света в заданный угол в широком диапазоне в ближней ИК области спектра [3]; сфокусировать свет в кольцо [4] или в поперечный отрезок [5]. Особенно интересным является применение КМП в качестве супертонких микролинз [6-12]. Причем линзы в [6-10,12] были реализованы для ИК диапазона, и только линза в [11] фокусировала свет видимого диапазона с длиной волны 550 нм. Линзы на основе металлических наноантенн [6, 9, 10] имеют меньшую эффективность, чем линзы из аморфного кремния [7,8,11,12]. Наилучшими характеристиками обладает металинза из кремниевых столбиков диаметром 200 нм и высотой около 1 мкм [7]. С помощью такой линзы получено минимальное круглое фокусное пятно с диаметром $0,57\lambda$ с эффективностью около 40%. Поляризация падающего света линейная. Недостатками линзы из [7] является высокое аспектное отношение (5:1), которое требуется обеспечить для качественного изготовления кремниевых столбиков.

Наиболее близкой металинзой к рассматриваемой в данной работе является металинза из работы [11]. В [11] была изготовлена бинарная микролинза в плёнке аморфного кремния с фокусным расстоянием 100 мкм (числовая апертура $NA=0,43$) для длины волны 550 нм. Падающий на линзу лазерный свет с правой круговой поляризацией преобразовывался в пучок с левой круговой поляризацией и фокусировался в круглое фокусное пятно с диаметром 670 нм. В [11] линза рассчитывалась на основе фазы Панхаратнама-Берри и работает только при падении на неё света с круговой поляризацией. Это является недостатком метода, так как для формирования круговой поляризации нужен дополнительный элемент - четвертьволновая пластинка. Кроме того, у металинзы из [11] невысокая числовая апертура.

В данной работе предложен другой метод расчёта бинарных супертонких металинз для субволновой фокусировки линейно поляризованного лазерного света в круглое пятно с диаметром меньше дифракционного предела. Метод заключается в том, что в каждой кольцевой зоне бинарной зонной пластинки Френеля помещаются бинарные субволновые дифракционные решетки (достаточно четырех) преобразующие линейную поляризацию падающего света в радиальную. Предложенным методом рассчитана, а затем изготовлена и исследована тонкая металинза в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм и фокусным расстоянием равным длине волны 633 нм, с периодом субволновой структуры 220 нм и глубиной рельефа 110 нм. Линза одновременно управляет поляризацией и фазой падающего на неё лазерного света. Она преобразует линейную поляризацию в радиальную и осуществляет острую фокусировку света. Такая металинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления.

2. Расчет и моделирование металинзы

В этом разделе для удобства читателя кратко повторим этапы расчёта и моделирования металинзы из [12]. Известно [13, 14], что острая фокусировка лазерного света с линейной поляризацией с помощью компонент микрооптики (бинарного аксикона [13] или бинарной зонной пластинки [14]) приводит к формированию эллиптического субволнового фокусного

пятна. Например, если бинарную зонную пластинку (ЗП) из стекла (показатель преломления $n=1,5$) с фокусным расстоянием ($f = 200$ нм), меньшим длины волны ($\lambda=532$ нм) и глубиной рельефа ($h=0,9$ мкм) осветить гауссовым лазерным пучком с линейной поляризацией и радиусом перетяжки $w=4\lambda$, то за пластинкой на расстоянии $z=200$ нм сформируется эллиптическое (в виде "гантели") фокусное пятно, вытянутое вдоль направления поляризации. Размеры этого фокусного пятна по полуспаду интенсивности, рассчитанные с помощью FDTD-метода и программы Fullwave, равны $FWHM_x=0,85\lambda$ и $FWHM_y=0,37\lambda$ (эллиптичность 2,3:1) [12].

Известно также, что преобразовав лазерный пучок с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией, можно получить круглое фокусное субволновое пятно [15]. Например, в [16] рассчитан 4х зонный микрополяризатор из субволновых решеток в плёнке золота, который преобразует падающий на его поверхность лазерный свет с линейной поляризацией в радиально поляризованный свет. Оказывается, четырех зон достаточно, чтобы сформировать световое поле с почти радиальной поляризацией [15, 16], и получить, с помощью такого светового поля, острую субволновую фокусировку света [15, 17]. Заметим, что 4х зонный пропускающий микрополяризатор может быть реализован в плёнке аморфного кремния на прозрачной подложке [18]. При этом период решеток был равен $T=230$ нм и глубина рельефа $h=130$ нм ($\lambda=633$ нм). При расчёте показатель преломления кремния выбирался равным $n=3,87-i0,016$.

Однако, фокусировка света с помощью двух разных элементов (отражающего или пропускающего преобразователя поляризации и зонной пластинки) приводит к необходимости высокоточной юстировки оптической схемы и потерям энергии при отражении от дополнительных поверхностей. Поэтому актуальным является расчёт компонента микрооптики, который бы одновременно и преобразовывал поляризацию лазерного света, и осуществлял острую фокусировку. Такой бинарный субволновый оптический элемент можно создать, объединяя вместе два уже рассмотренных элемента. На рис. 1 показана картина бинарного рельефа металлинзы, которая объединяет в себе свойства и микрополяризатора, и зонной пластинки с высокой числовой апертурой.



Рис. 1. Схема штрихов пропускающей бинарной металлинзы, одновременно преобразующей линейную поляризацию в радиальную и фокусирующей свет.

Параметры металлинзы, показанной на рис. 1 следующие: длина волны $\lambda=633$ нм, фокусное расстояние $f=633$ нм ($NA=1$), высота рельефа $h=0,24$ мкм, размер отсчета 22 нм, период решеток 220 нм, канавка у дифракционной решетки 110 нм, и ступенька – шириной 110 нм. Уточнённый (измеренный на эллипсометре) показатель преломления аморфного кремния $n=4,35 + i0,486$; подложка из стекла ($n=1,5$).

3. Изготовление металлинзы и измерение рельефа поверхности

Металлинза с рельефом, показанным на рис. 1 была изготовлена по технологии электронной литографии. На плёнку аморфного кремния (130 нм) (a-Si), напылённую на прозрачную пирексную подложку (показатель преломления 1,47), был нанесен слой 320 нм резиста ПММА, который был закреплён при температуре 180 °С. Величина толщины резиста (320 нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено 15 нм золота. Электронным лучом с напряжением 30 кВ бинарный шаблон (рис. 1) был перенесен на поверхность резиста. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА.

Трансформирование шаблона с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Толщина резиста была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части рельефа во время травления 130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5. На рис. 2 показано изображение образца металлинзы, полученное с помощью электронного микроскопа. На рис. 2а показана вся металлинза диаметром 30 мкм, а на рис. 2б показана её увеличенная центральная часть.

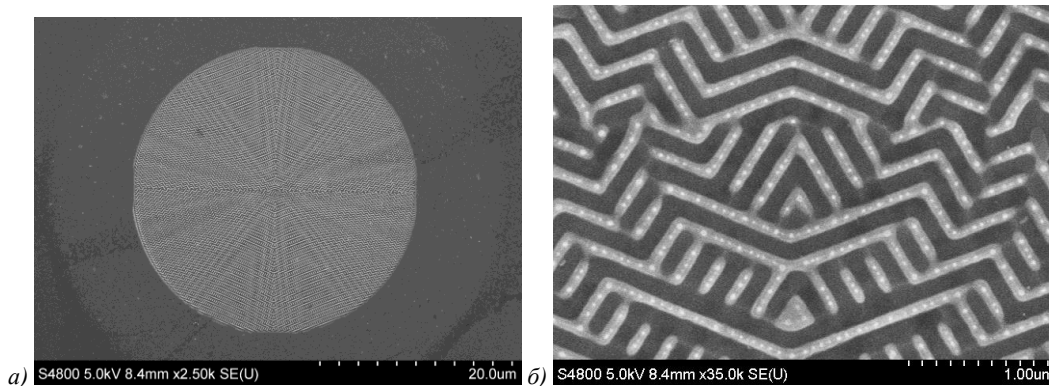


Рис. 2. Изображение в электронном микроскопе металлинзы в плёнке аморфного кремния диаметром 30 мкм (а) и её увеличенный центральный фрагмент 3х2 мкм (б).

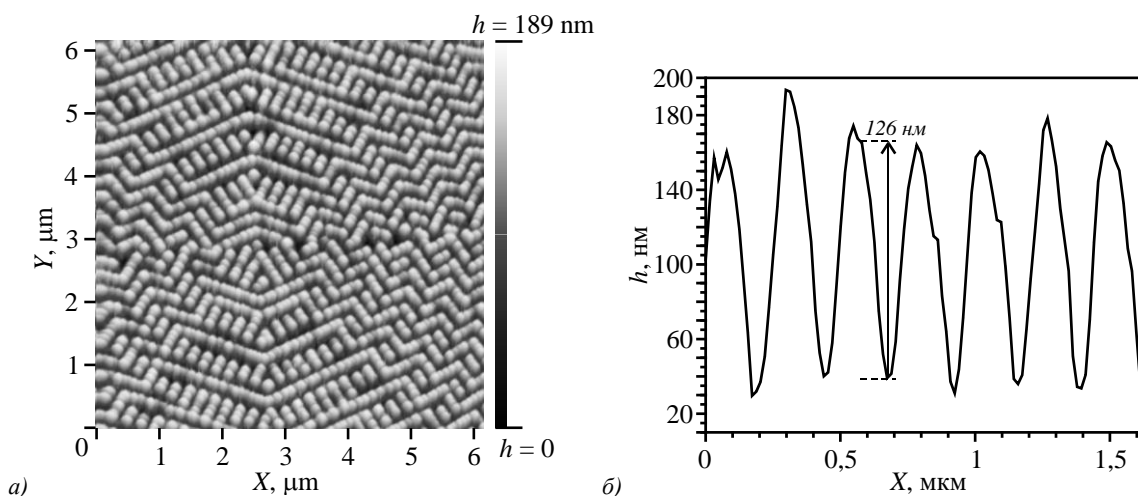


Рис. 3. Центральный фрагмент рельефа металлинзы, измеренный на атомно-силовом микроскопе Solver Pro (а) и сечение на некотором участке рельефа металлинзы (б).

Также рельеф металлинзы был измерен на атомно-силовом микроскопе. На рис. 3а показан фрагмент центральной части рельефа металлинзы, а на рис. 3б показан характерный профиль рельефа металлинзы. Глубина рельефа имеет разброс в диапазоне от 80 нм до 160 нм со средним значением 120 нм. Радиус заострения кантилевера микроскопа 10 нм. Ошибка определения глубина рельефа не превышает 5%, а ошибка определение поперечных координат 2,5%.

4. Моделирование металлинзы с учетом технологических погрешностей изготовления

Для того, чтобы учесть в моделировании технологические ошибки при изготовлении металлинзы, измеренный на атомно-силовом микроскопе рельеф (рис. 3) был перенесен в программу Fullwave для дальнейшего моделирования. На рис. 4а показан кадр рельефа из программы, который получен из рельефа на рис. 3а. Параметры моделирования следующие.

Размер металлинзы (рис. 4а) 6,22х6,22 мкм или 256х256 отсчетов. Максимальный перепад высот рельефа 189 нм, длина волны $\lambda=633$ нм, падающая волна плоская и линейно поляризованная, сетка отсчетов $\lambda/30$ по всем трем координатам, показатель преломления аморфного кремния $n=4.35+0.486i$, показатель преломления прозрачной подложки $n=1.5$. На рис. 4б показано рассчитанное распределение интенсивности на расстоянии $z=600$ нм от металлинзы. Размеры фокусного пятна по полуспаду интенсивности равны $FWHM_x=0.521\lambda$, $FWHM_y=0.457\lambda$ (вдоль направления поляризации). На расстоянии $z=600$ нм интенсивность в фокусе максимальная и в 2 раза превосходит интенсивность падающего света, хотя диаметр фокусного пятна оставался почти постоянным на расстоянии от $z=200$ нм до $z=900$ нм. На рис. 4в приведены сечения вдоль оси X интенсивности электрического поля вдоль осей X и Y. Несимметричность сечений относительно центра обусловлена погрешностями в изготовлении элемента.

При сканировании микрорельефа с помощью атомно-силового микроскопа сложно расположить элемент так, чтобы центр элемента точно совпал с центром отсканированного изображения. Это послужило причиной того, что центр фокусного пятна не совпадает с центром отсканированной области.

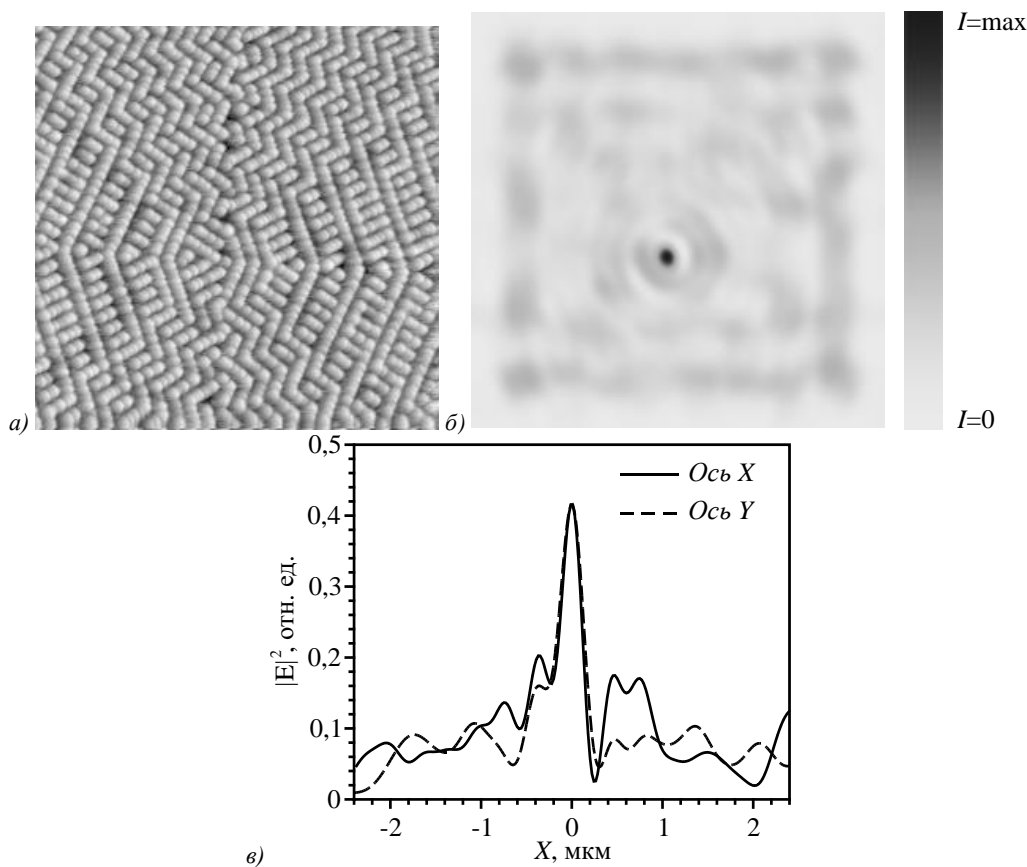


Рис. 4. Полутоновой рельеф : черный цвет - высота 0, а белый цвет - высота 189 нм(а), точно соответствующей кадру рельефа на рис. За для металлинзы, но перенесенный в программу Fullwave для моделирования, результат расчета распределения интенсивности (б) в фокусе металлинзы, полученный с помощью рельефа (а). Размер кадра (б) равен 6×6 мкм. Сечения вдоль оси X через центр фокусного пятна, отраженные для интенсивности $|E|^2$ вдоль осей X and Y (в).

5. Эксперимент по фокусировке лазерного света металлинзой

Экспериментальное исследование фокусировки света исследуемой металлинзой осуществлялось средствами сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ). Оптическая схема проводимого эксперимента указана на рис. 5.

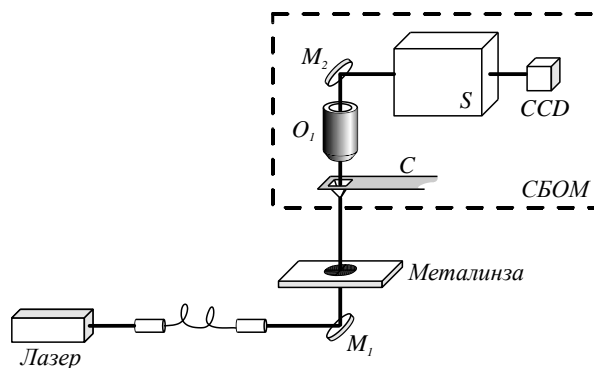


Рис. 5. Оптическая схема эксперимента. M_1, M_2 – зеркала, O_1 – $100\times$ объектив, C – кантилевер, S – спектрометр, CCD – камера.

В эксперименте свет от гелий-неонового лазера (длина волны 633 нм, мощность 50 мВт) попадал через волоконно-оптическую транспортную систему на исследуемую металлинзу и фокусировался в субволновое пятно. Полная ширина пучка, падающего на металлинзу, составляла 30 мкм. Распределение интенсивности в фокусе исследовалось с помощью полого металлизированного пирамидального кантилевера C с отверстием при вершине 100 нм. Свет, прошедший через отверстие в кантилевере, улавливался 100-кратным объективом O_1 , после чего попадал через спектрометр S (Solar ТП, Nanofinder 30) на CCD-камеру (Andor, DV401-BV).

Экспериментально измеренное фокусное расстояние линзы было равно $z = 0,6$ мкм. На рис. 6 показано распределение интенсивности в фокусе, зафиксированное на СБОМ. На рис. 7 показаны сечения интенсивности фокусного пятна (рис. 6) вдоль осей x и y . Максимальная интенсивность в фокусе в 11 раз превышала максимальную интенсивность падающего на линзу пучка.

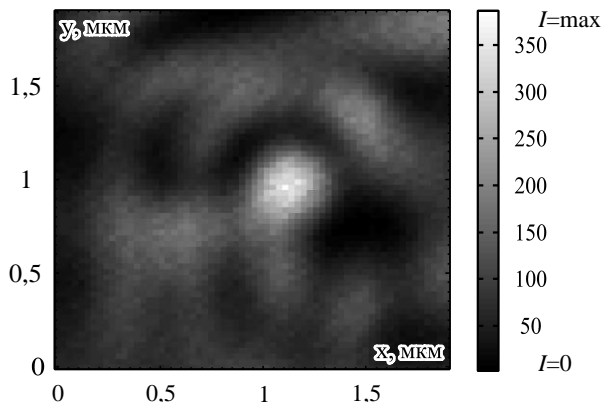


Рис. 6. Распределение интенсивности на расстоянии $z=0,6$ мкм от металлинзы.

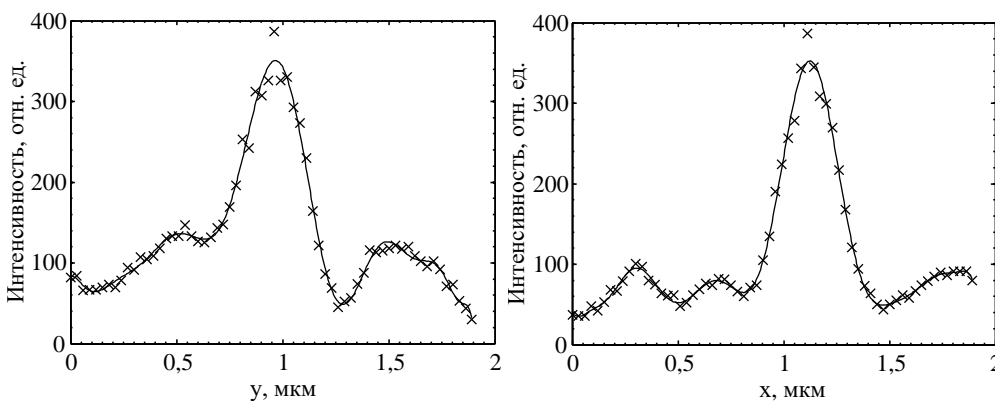


Рис. 7. Измеренные сечения распределения интенсивности в фокусном пятне (рис. 6). Крестики – экспериментальные значения, кривая – их аппроксимация полиномом.

Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны $FWHM_x=0.55\lambda$, $FWHM_y=0.49\lambda$. Эти значения отличаются всего на 8% от расчетных значений ($FWHM_x=0.521\lambda$, $FWHM_y=0.457\lambda$), полученных с учетом технологических погрешностей изготовления металлинзы, и на 15% от размеров фокусного пятна для идеальной металлинзы ($FWHM_x=0,434\lambda$, $FWHM_y=0,432\lambda$), у которой нет разбросов высоты рельефа и высота рельефа равна 70 нм.

6. Заключение

В работе получены следующие результаты. Предложен простой подход к формированию рельефа бинарной субволновой микролинзы в тонкой пленке аморфного кремния. Кольца зонной пластинки Френеля с заданным фокусным расстоянием и диаметром заполняются бинарными субволновыми решетками, каждая из которых поворачивает электрический вектор нормально падающего на нее линейно поляризованного лазерного света на заданный угол. Период, глубина рельефа решетки и фактор заполнения подбираются оптимальным образом из условия примерного равенства амплитуды света, прошедшего через каждую локальную решетку. Это можно обеспечить только для небольшого числа углов поворота вектора поляризации. В данной статье для преобразования линейной поляризации в радиальную используется только четыре разные дифракционные решетки, поворачивающие вектор поляризации падающего света на четыре угла, обеспечивающие формирование круглого фокусного пятна. Фазовый сдвиг на π между соседними зонами линзы обеспечивается тем, что две локальные решетки, примыкающие к границе зоны, должны поворачивать вектор поляризации на углы, разность которых равна π .

Моделирование показало, что металлинза диаметром 5 мкм и фокусным расстоянием 633 нм в тонкой пленке кремния, состоящая из "кусков" 4х разных наклонов субволновых бинарных дифракционных решеток с периодом 220 нм для длины волны 633 нм фокусировала с эффективностью 2,5% плоскую волну с диаметром 5 мкм и линейной поляризацией в круглое фокусное пятно с диаметром меньше дифракционного предела на расстояниях от линзы от 200 нм до 1 мкм. Причем при изменении толщины линзы (или толщины пленки кремния) от 50 нм до 120 нм диаметр фокусного пятна менялся незначительно, оставаясь меньше дифракционного предела, от 0,37 до 0,45 от длины волны.

Такая металинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления. Фокусное пятно, сформированное такой линзой, при освещении ее гауссовым пучком с линейной поляризацией имело размеры по декартовым осям и по полуспаду интенсивности, равные 0,49 и 0,55 длины волны. Экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования: размеры фокусного пятна 0,46 и 0,52, соответственно).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-9498.2016.9), а также грантов РФФИ 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-29-11698.

Литература

- [1]. Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nat. Mater.* – 2014. – Vol. 13. – P. 139-150. DOI:10.1038/nmat3839.
- [2]. Yang, Y. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation / Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I.I. Kravchenko, D.P. Briggs // *Nano Lett.* – 2014. – Vol. 14. – P. 1394-1399. DOI:10.1021/nl4044482.
- [3]. Sun, S. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces / S. Sun, K. Yang, C. Wang, T. Juan, W.T. Chen, C.Y. Liao, Q. He, S. Xiao, W. Kung, G. Guo, L. Zhou. // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12. – P. 6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668.
- [4]. Lan, L. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens / L. Lan, W. Jiang, Y. Ma. // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102. – P. 231119. DOI:10.1063/1.4810004.
- [5]. Verslegers, L. "Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film / L. Verslegers, P.B. Catrysse, Z. Yu, J.S. White, E.S. Barnard, M.L. Brongersma, S. Fan. // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9(1). – P. 235-238. DOI: 10.1021/nl802830y.
- [6]. Aieta, F. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces / F. Aieta, P. Genevet, M.A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, F. Capasso // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12(9). – P. 4932-4936. DOI:10.1021/nl302516v.
- [7]. Arbabi, A. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays / A. Arbabi, Y. Horie, A. J. ball, M. Bagheri, A. Faraon // *Nat. Commun.* – 2015. – Vol. 6. – P. 7069. DOI:10.1038/ncomms8069.
- [8]. Arbabi, A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi, Y. Horie, M. barheri, A. Faraon // *Nat. Nanotech.* – 2015. – Vol. 10. – P. 937-943. DOI:10.1038/NNANO.2015.186.
- [9]. Ni, X. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses / X. Ni, S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Light Scien. Appl.* – 2013. – Vol. 2. – P. e72. DOI:10.1038/lsa.2013.28.
- [10]. West, P.R. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens / P.R. West, J.L. Steward, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, V.V. Shkunov, F. Strohkendl, Y.A. Zakharenkov, R.K. Dodds, R. Byren // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 22(21). – P. 26212-26221. DOI:10.1364/OE.22.026212.
- [11]. Lin, D. Dielectric gradient metasurface optical elements / D. Lin, P. Fan, E. Hasman, M.L. Brongersma // *Science.* – 2014. – Vol. 345(6194). – P. 298-302. DOI:10.1126/science.1253213.
- [12]. Kotlyar, V.V. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics.* – 2013. – Vol. 52(3). – P. 330-339. DOI:10.1364/AO.52.000330.
- [13]. Stafeev, S.S. Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *J. Mod. Opt.* – 2013. – Vol. 60(13). – P. 1050-1059. DOI:10.1080/09500340.2013.831136.
- [14]. Dorn, R. Sharper focus for a radially polarized light beams / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters.* – 2003. – Vol. 91. – P. 233901. DOI:10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [15]. Nalimov, A.G. Reflected four-zones subwavelength microoptic element for polarization conversion from linear to radial / A.G. Nalimov, L.O'Faolain, S.S. Stafeev, M.I. Shanina, V.V. Kotlyar // *Computer optics.* – 2014. – Vol. 38(2). – P. 229-236.
- [16]. Stafeev, S. Tight focus of light using micropolarizer and microlens / S. Stafeev, L. O'Faolain, V. Kotlyar, A. Nalimov // *Applied Optics.* – 2015. – Vol. 54. – P. 4388-4394. DOI:10.1364/AO.54.004388.
- [17]. Stafeev, S.S. A four-zone transmission azimuthal micropolarizer with phase shift / S.S. Stafeev, M.V. Kotlyar, O'Faolain L., A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar // *Computer optics.* – 2016. – Vol. 40(1). – P. 12-18. DOI:10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.