

Разработка высоко-апертурной микрометалинзы с разным числом секторов

А.Г. Налимов^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Молодогвардейская 151, Самара, Россия

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия

Аннотация. Численно с помощью разностного решения уравнений Максвелла показано, что бинарная микролинза с единичной числовой апертурой в тонкой плёнке аморфного кремния, состоящая из субволновых дифракционных решёток, работающих как полуволновые пластинки, фокусирует вблизи своей поверхности падающий на неё лазерный пучок с линейной поляризацией и плоским волновым фронтом почти с одинаковым качеством при числе дифракционных решёток, поворачивающих плоскость поляризации, от 3 до 16. При этом размеры субволнового фокусного пятна по полуспаду интенсивности по декартовым осям равны 0,435 на 0,457 длины волны для 16 секторных дифракционных решеток и 0,428 на 0,460 длины волны для 4 дифракционных решёток.

1. Введение

Компоненты фотоники с метаповерхностью интенсивно исследуются в настоящее время. Их привлекательность в том, что они позволяют одновременно управлять поляризацией и фазой лазерного света, и, кроме того, глубина рельефа таких компонент составляет всего десятки нанометров для видимого и ближнего ИК диапазона. Обзор по ним можно найти в [1]. С помощью компонент с метаповерхностью можно сформировать оптические вихри [2]; пилообразные решётки, 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 компонент с метаповерхностью в качестве супертонких микролинз [5-8].

В предыдущих работах авторов [9-11] также исследовались некоторые компоненты с метаповерхностью. Были исследованы компоненты микрооптики (микрополяризаторы и микролинзы), преобразующие линейную поляризацию падающего лазерного света в радиальную или азимутальную и осуществляющие субволновую фокусировку света. Особенность этих компонент микрооптики в том, что их поверхность состоит из локальных субволновых бинарных дифракционных решёток. Каждая из этих решёток поворачивает плоскость поляризации падающего света на определённый угол, аналогично полуволновой пластинке. Всего разных решеток в [9-11] было четыре. Они поворачивали плоскость поляризации падающего света на четыре разных угла. Этого оказалось достаточно, чтобы из линейно-поляризованного света сформировать свет с приближённой радиальной или азимутальной поляризацией.

В данной статье описаны результаты моделирования фокусировки света с помощью микрометаллинза с единичной числовой апертурой и разным числом субволновых дифракционных решёток. Показано, что наилучший результат фокусировки линейно поляризованного света (наиболее круглое фокусное пятно наименьших размеров) получается при числе дифракционных решеток 16. Для металлинзы с 16 градациями поворота плоскости поляризации по азимутальному углу размеры фокусного пятна по полуспаду интенсивности по декартовым координатам составляют 0,435 на 0,457 длины волны (эллиптичность фокуса 1,05).

2. Моделирование субволновой поляризационной решётки

Металлинза, рассматриваемая в работе, формируется по алгоритму, предложенному в [11]. Согласно этому алгоритму бинарная линза состоит из зонной пластинки с заданной числовой апертурой и фокусным расстоянием. Но вместо формирования рельефа в прозрачной подложке, дающего задержку фазы между соседними зонами на полдлины волны, в каждой из зон формируется субволновый бинарный рельеф, состоящий из локальных дифракционных решёток. Каждая из этих решёток должна поворачивать плоскость поляризации на заданный угол. Возникают вопросы: будет ли зависимость угла поворота плоскости поляризации φ от угла наклона линий дифракционной решетки α линейная? И будет ли коэффициент пропускания света для разных решёток одинаковым? Для ответа на первый вопрос получена зависимость угла φ поворота вектора поляризации света после прохождения через субволновую дифракционную решётку от угла наклона α вектора поляризации падающего поля к линиям решётки (рис. 1а). Эта зависимость показана на рис. 1б (сплошная кривая). Она была получена при моделировании прохождения света с линейной поляризацией (вектор поляризации падающей плоской волны вертикальный E_1 (рис. 1а)) через решетку высотой 120 нм в аморфном кремнии с показателем преломления $n=4,35 + i0,486$ [11]. Для ответа на второй вопрос была получена зависимость относительной интенсивности прошедшего решётку излучения от угла α (рис. 1б, пунктирная кривая). Моделирование проводилось с помощью разностного решения уравнений Максвелла методом FDTD в программном пакете FullWAVE. Параметры решётки: период - 220 нм, ширина канавки - 110 нм, ширина выступа - 110 нм, глубина рельефа - 120 нм. Длина волны $\lambda=633$ нм.

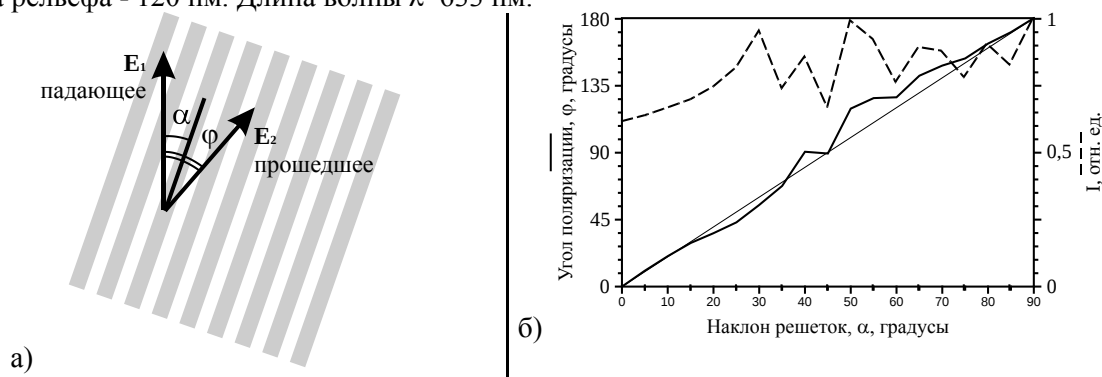


Рисунок 1. Вектора напряжённости электрического поля падающей E_1 и прошедшей E_2 решётку волн (а) и зависимость угла φ (сплошная кривая) выходного вектора электрического поля E_2 и относительной интенсивности I (пунктирная кривая) от угла наклона линий решётки α .

Из рис. 1б видно, что зависимость выходного угла φ от входного α при использовании данного материала близка к линейной. И сильнее всего отличается от линейной зависимости при углах α , равных 40, 50 и 70 градусов. Но идеальная линейность и не требуется, при больших отклонениях графика зависимости выходного угла вектора поляризации от прямой линии это следует учитывать при проектировании металлинзы, состоящей из субволновых решеток. График зависимости прошедшей интенсивности I (падающая интенсивность равна 1 в

каждой точке) от угла наклона штрихов α (рис. 1б) не является горизонтальной прямой, а имеет вид квазипериодической функции, изменяющейся в диапазоне от 0,7 до 1. Это означает, что металинза не будет только фазовым компонентом, а будет модулировать постоянную интенсивность падающего света, и тем самым уменьшать эффективность.

3. Металинзы с разным числом градаций угла наклона вектора поляризации

В этом разделе проведено моделирование острой фокусировки лазерного света с линейной поляризацией и плоским волновым фронтом бинарной металинзой в аморфном кремнии с числом градаций наклона вектора поляризации падающей волны от 3 до 121. На рис. 2а представлен внешний вид металинзы, состоящей из 16 дифракционных решеток. На рис. 2а они видны как 16 секторов, исходящих из центра. Решётки в каждом секторе имеют такой наклон линий, чтобы на выходе получилась азимутальная поляризация. Известно, что азимутально поляризованный свет с фазовой сингулярностью может быть сфокусирован в круглое фокусное пятно [12] субволнового размера, подобно радиально поляризованному свету [13]. Для реализации фазовой сингулярности была использована спиральная зонная пластинка с топологическим зарядом 1 вместо обычной зонной пластинки. При этом в соседних зонах спиральной зонной пластинки содержались решётки из диаметрально противоположных секторов. Это даёт возможность создать разницу в направлении поляризации света в соседних зонах на 180 градусов, то есть фаза в них различается на π . Таким образом можно избавиться от необходимости посылать на фокусирующий элемент волну с фазовой сингулярностью. Фактически данная металинза будет функционально содержать три разных компонента: зонную пластинку для фокусировки света, спиральную фазовую пластинку для получения сингулярного волнового фронта с топологическим зарядом 1, и секторные полуволновые пластинки в виде секторных бинарных субволновых дифракционных решеток. Такая металинза будет преобразовывать волну с постоянной фазой (плоскую волну или гауссов пучок) в азимутально-поляризованный пучок с фазовой сингулярностью и фокусировать его на заданном расстоянии. На рис. 2б показана спиральная зонная пластинка, использованная для построения фокусирующей свет метаповерхности на рис. 2а. Фокусное расстояние металинзы на рис. 2а равно длине волны $f=\lambda=633$ нм.

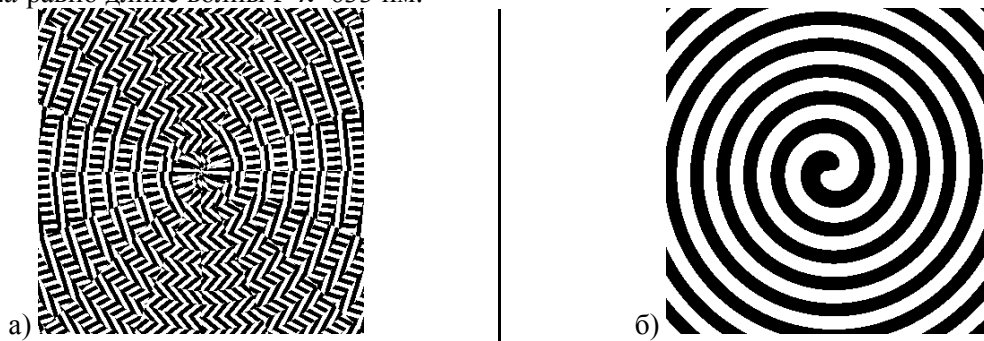


Рисунок 2. Общий вид металинзы диаметром 8 мкм (364x364 отсчётов) (а) и спиральная зонная пластинка (б), используемая при построении металинзы.

Диаметр металинзы 8 мкм, падающая волна – плоская с линейной поляризацией. При построении дифракционных решеток размер отсчёта маски (размер пиксела файла со структурой металинзы) был равен 22 нм ($0,03\lambda$). Максимум интенсивности вдоль оси z был обнаружен на расстоянии $z=600$ нм от верхнего края рельефа металинзы, поэтому дальнейшие графики приводятся для этого расстояния. На рис. 3 показаны интенсивность $|E|^2$ в фокусном пятне на расстоянии 600 нм (вставка) и её сечения вдоль осей x и y .

Как видно из рис. 3, форма фокусного пятна близка к форме круга. Ширина по полуспаду интенсивности вдоль осей x и y составила $\text{FWHM}_x=0,435\lambda$, $\text{FWHM}_y=0,457\lambda$. Средняя ошибка при расчете размеров фокуса равна размеру одной ячейки расчетной сетки $0,01\lambda$. Изменение количества секторов (дифракционных решеток), из которых сконструирована металинза,

приводит к изменению как эллиптичности фокусного пятна, так и интенсивности света в центре фокуса. В Таблице 1 приведены результаты моделирования различных металинз с количеством секторов (число градаций наклона вектора поляризации) от 3 до 121. В последнем столбце Таблицы 1 показана эллиптичность фокусных пятен: отношение размеров фокусного пятна по декартовым осям.

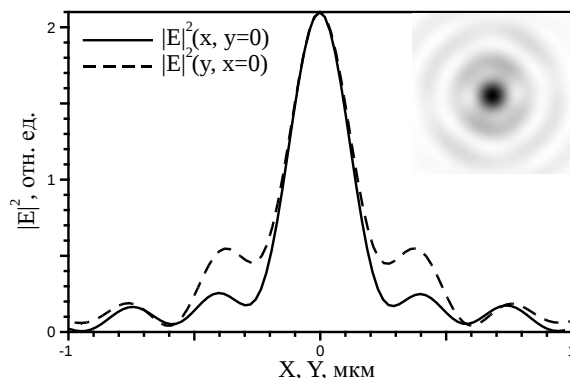


Рисунок 3. Интенсивности $|E|^2$ светового поля на расстоянии 600 нм от металинзы (вставка), изображенной на рис. 2а, и сечения интенсивности $|E|^2$ вдоль осей X и Y через центр фокусного пятна. Падающая волна E_y .

Таблица 1. Характеристики фокусных пятен, полученных с помощью металинз с различным количеством секторов.

Число секторов	FWHM _x , λ	FWHM _y , λ	I max, отн. ед.	Эллиптичность
3	0,443	0,464	0,997	1,05
4	0,428	0,460	1,84	1,07
6	0,424	0,461	1,67	1,09
8	0,436	0,46	1,8	1,06
12	0,427	0,465	2,13	1,09
16	0,435	0,457	1,94	1,05
24	0,43	0,466	1,95	1,08
32	0,4	0,504	1,68	1,26
54	0,375	0,534	1,68	1,42
81	0,411	0,575	0,919	1,40
121	0,387	0,764	2,13	1,97

Из Табл. 1 видно, что даже металинза из трех секторов способна фокусировать свет в почти круглое фокусное пятно субволнового размера, однако интенсивность света в фокусе такой металинзы в 2,14 раз меньше, чем для металинзы из 16 секторов. Видно, что максимум интенсивности и наименьшая эллиптичность достигаются у металинз состоящих из 12 и 16 секторов. Дальнейшее увеличение количества секторов приводит к уменьшению максимальной интенсивности в центре фокусного пятна и увеличению эллиптичности фокусного пятна, вплоть до отношения диаметров эллипса 1:2. Это связано с деградацией субволновых решёток из-за чрезмерно узких секторов.

Заметим, что площадь фокусного пятна по полуспаду интенсивности, созданного металинзой с числом секторов 16 (рис. 2а), равна $0,156\lambda^2$. При фокусировке апланатической идеальной линзой с единичной числовой апертурой площадь фокусного пятна для азимутально-поляризованного света с фазовой сингулярностью равна $(0,147\lambda^2)$ [12], а для радиально-поляризованного пучка площадь фокуса равна $(0,17\lambda^2)$. То есть площадь фокуса, сформированного металинзой (рис. 2а), на 10% меньше, чем площадь минимального фокусного пятна, которое можно получить с помощью апланатической линзы при фокусировке света с радиальной поляризацией.

Интересно, что в отличие от фокусировки радиально поляризованного света, в данном случае основной вклад в фокусное пятно дают поперечные компоненты электрического поля E_x и E_y , в то время как продольная компонента пренебрежимо мала. На рис. 4 показаны интенсивности отдельных компонент электрического поля в фокусном пятне, изображённом на рис. 3. Преимущество фокусировки света только поперечными составляющими электрического поля в том, что почти весь свет, попавший в фокус направляется к наблюдателю (или фотоприемнику), расположенному на оптической оси.

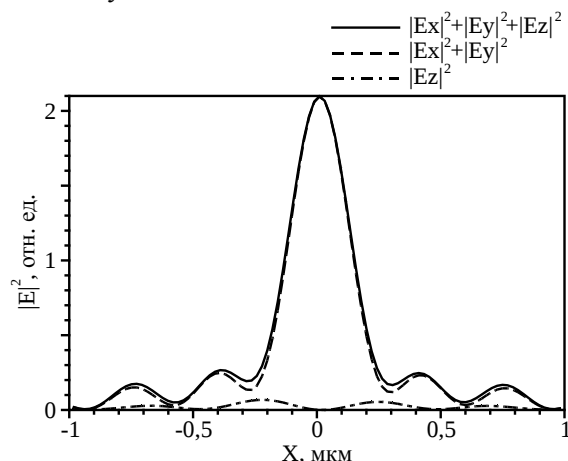


Рисунок 4. Вклад поперечных и продольной компонент в формирование фокусного пятна с помощью металинзы, фокусирующей азимутально поляризованный свет с фазовой сингулярностью (рис. 2а).

4. Заключение

В работе получены следующие численные результаты. При фокусировке лазерного света металинзой (диаметром 8 мкм) с единичной числовой апертурой (фокусное расстояние 633 нм) в тонкой пленке аморфного кремния, преобразующей линейную поляризацию падающей плоской волны в азимутальную с сингулярностью фазы, формируется субволновое почти круглое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности вдоль декартовых осей $0,435\lambda$ на $0,457\lambda$, $\lambda=633$ нм. Максимальная интенсивность в фокусе в 2 раза превышает интенсивность падающего света. При этом число градаций угла поворота вектора поляризации (или число локальных субволновых дифракционных решёток, использующихся в металинзе) может меняться от 3 до 16, что не будет приводить к существенному изменению размеров и формы фокусного пятна: эллиптичность будет меньше 1,1. Наименьший и наиболее круглый фокус формируется при числе градаций угла поворота вектора поляризации (или при числе решёток) 16. Сформированной металинзой фокус состоит из вклада только поперечных составляющих интенсивности электрического вектора, и поэтому почти без ошибки может быть измерен с помощью пирамидального полого алюминиевого зонда с отверстием 100 нм и шагом сканирования 50 нм.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-19-01186.

6. Литература

- [1] Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // Nat Mater. – 2014. – Vol. 13(2). – P. 139-150.
- [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, J. Valentine // Nano Lett. – 2014. – Vol. 14(3). – P. 1394-1399.

- [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 // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12(12). – P. 6223-6229.
- [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(23). – P. 231119.
- [5] Verslegers, L. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film / L. Verslegers, P.B. Catrys, Z. Yu, J.S. White, E.S. Barnard, M.L. Brongersma // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9(1). – P. 235-238.
- [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 // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12(9). – P. 4932-4936.
- [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.
- [8] Arbabi, A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon // *Nat Nanotechnol.* – 2015. – Vol. 10(11). – P. 937-943.
- [9] Kotlyar, V.V. Subwavelength micropolarizer in a gold film for visible light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, M.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, L. O'Faolain // *Appl. Opt.* – 2016. – Vol. 55(19). – P. 5025-5032.
- [10] Stafeev S.S. Microlens-aided focusing of linearly and azimuthally polarized laser light / S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, D. Gibson, S. Song, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24(26). – P. 29800-29813.
- [11] Kotlyar, V.V. Thin high numerical aperture metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, Changyu Hu, L. O'Faolain, M.V. Kotlyar, D. Gibson, S. Song // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25(7). – P. 8158-8167.
- [12] Hao, X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Opt Lett.* – 2010. – Vol. 35(23). – P. 3928-3930.
- [13] Dorn, R. Sharper focus for a radially polarized light beams / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters.* – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.

Engineering a sector-variant high-numerical-aperture micrometalens

A.G. Nalimov^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. It is shown using numerical differential Maxwell equations solving, that binary microlens with numerical aperture of 1 can focus laser light near its surface. The microlens contains of subwavelength diffractive gratings that work as half-wave plates, it made in a silicon film. The input light is a plane wave with linear polarization. The microlens can work with number of sectors from 3 to 16. The 16-sectors microlens focuses the light in a focal spot. The sizes of the focal spot measured at the half maximum value are 0.435 and 0.457 along Cartesian axis. The 4-sector microlens focuses light in a focal spot having sizes of 0.428 and 0.46 correspondingly.

Keywords: zone plate, diffractive grating, optical vortices, metalens.