

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МИКРОЛИНЗЫ, ФОКУСИРУЮЩЕЙ СВЕТ С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В ПОЧТИ КРУГЛОЕ СУБВОЛНОВОЕ ПЯТНО

В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, М.В. Котляр<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

### Аннотация

Предложен новый вариант металинзы – поляризационная микролинза, которая фокусирует линейно поляризованный лазерный свет в субволновое круглое пятно. Поляризационная микролинза состоит из набора субволновых бинарных дифракционных решёток, которыми, как паркетом, выложены кольца зонной пластинки Френеля. Скачок фазы на  $\pi$ , который должна вносить в световое поле зонная пластинка при переходе от зоны к зоне, выполняется в поляризационной микролинзе с помощью двух решёток, примыкающих к границе зоны и формирующих вектора поляризации прошедшего излучения, направленные в противоположенные стороны. Чтобы уменьшить глубину рельефа поляризационной микролинзы, следует использовать материал с высоким показателем преломления. Для аморфного кремния глубина рельефа поляризационной микролинзы может быть от 50 нм до 120 нм. При этом на расстоянии от поляризационной микролинзы в диапазоне от 200 нм до 1300 нм формируется круглое фокусное пятно с диаметром меньше дифракционного предела: минимальное фокусное пятно имеет диаметр 0,372 от длины волны.

**Ключевые слова:** металинза, метаповерхность, радиальная поляризация, дифракционный оптический элемент.

**Цитирование:** Котляр, В.В. Моделирование поляризационной микролинзы, фокусирующей свет с линейной поляризацией в почти круглое субволновое пятно / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 451-457. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-451-457.

### Введение

В последние годы в оптике изучаются плоские бинарные компоненты микрооптики толщиной меньше длины волны, состоящие из набора субволновых элементов (столбиков, щелей, отрезков, решёток) 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 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 КМП в качестве супертонких микролинз [6–12]. В табл. 1 для более наглядного сравнения приведены параметры металинз и характеристики фокусных пятен, полученных в [6–12]. Заметим, что все пропускающие линзы из табл. 1 реализованы экспериментально.

Табл. 1. Сравнение параметров известных плоских микролинз с метаповерхностью

Ссылка	Размер фокуса, $\lambda$	Эффективность, %	Поляризация	Длина волны (нм)	Толщина линзы, $\lambda$	Материал линзы
Nano Lett, 12, 4932 (2012) [6]	33	1	линейная	1550	0,038	V-антенны из золота
Nat Commun, 6, 7069 (2015) [7], [8]	0,57	42	любая	1550	0,65	Столбики из кремния
Light Sci Appl, 2, e72 (2013) [9],[10]	0,93	10	линейная	676	0,044	Наноантенны из золота
Science, 345, 298 (2014) [11]	1,2	45	круговая	550	0,18	Решётки в аморфном кремнии
IEEE Phot Tech Lett, 26, 1375 (2014) [12]	10	70	любая	850	0,56	Столбики из кремния

Из табл. 1 видно, что 4 из 5 линз реализованы для ИК-диапазона. 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] (вторая строка табл. 1). С помощью такой линзы получено минимальное круглое фокусное пятно

с диаметром 0,57 $\lambda$  с эффективностью около 40 %. Поляризация падающего света линейная. Её недостатками 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] (четвёртая строка табл. 1). 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 металлинзы из [11] невысокая числовая апертура.

В данной работе предложен другой метод расчёта бинарных супертонких металлинз 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 решётки (достаточно четырёх), преобразующие линейную поляризацию падающего света в радиальную. Например, если в какой-то зоне линзы Френеля направления поляризации прошедшего света определяются углами  $+45^\circ$ ,  $+135^\circ$ ,  $-135^\circ$  и  $-45^\circ$  градусов, то в соседней зоне решётки должны формировать прошедшее излучение с поляризацией, определяемой углами  $-135^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . Такое расположение решёток в зонах линзы Френеля обеспечивает задержку по фазе между соседними зонами на  $\pi$ . Для уменьшения высоты рельефа субволновых решёток выбирается материал с высоким показателем преломления, в данном случае аморфный кремний. Плёнка аморфного кремния толщиной от 50 нм до 120 нм на подложке из плавленого кварца должна быть протравлена до подложки, чтобы свет проходил через кремний только в местах, где располагаются выпуклые части дифракционных решёток. Моделирование работы предложенной металлинзы осуществлялось с помощью FDTD-метода и программы Fullwave.

#### Расчёт и моделирование оптического элемента с метаповерхностью для острой фокусировки света

Известно [12, 13], что острая фокусировка лазерного света с линейной поляризацией с помощью компонент микрооптики (бинарного аксикона [12] или бинарной зонной пластинки [13]) приводит к формированию эллиптического субволнового фокусного пятна. Для наглядности на рис. 1а показана схема колец микрорельефа бинарной зонной пластинки (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). Если такую ЗП 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 (рис. 1б). Размеры этого фокусного пятна по полу-

спадку интенсивности, рассчитанные с помощью FDTD-метода и программы Fullwave, равны  $FWHM_x=0,85\lambda$  и  $FWHM_y=0,37\lambda$ . По одной из координат фокусное пятно имеет размер меньше, чем дифракционный предел ( $FWHM=0,51\lambda$ ), и поэтому названо субволновым.

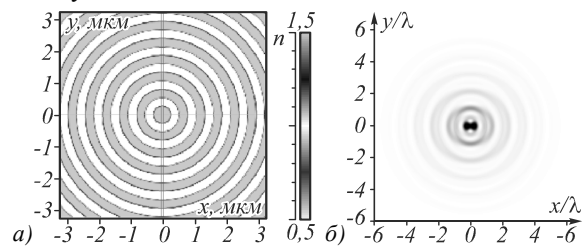


Рис. 1. Схема колец бинарной зонной пластинки (а), которая использовалась для расчёта острой фокусировки Гауссова пучка с линейной поляризацией; распределение интенсивности в фокусе (на расстоянии 200 нм) (б)

Известно также, что, преобразовав лазерный пучок с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией, можно получить круглое фокусное субволновое пятно [14].

Например, в [15] рассчитан 4-зонный микрополяризатор из субволновых решёток в плёнке золота, который преобразует падающий на его поверхность лазерный свет с линейной поляризацией в радиально поляризованный свет. На рис. 2а показана схема 4-зонного микрополяризатора, состоящего из четырёх бинарных субволновых решёток (период  $T=460$  нм, длина волны  $\lambda=633$  нм, глубина  $h=110$  нм) в плёнке золота ( $n=0,312+i3,17$ ). На рис. 2б показано распределение интенсивности света, отражённого от микрополяризатора вблизи поверхности. Стрелками показано направление поляризации в каждой зоне. Световое поле было также рассчитано с помощью FDTD-метода и программы Fullwave. Оказывается, четырёх зон достаточно, чтобы сформировать световое поле с почти радиальной поляризацией [14, 15] и получить с помощью такого светового поля острую субволновую фокусировку света [14, 16]. Заметим, что 4-зонный пропускающий микрополяризатор может быть реализован в плёнке аморфного кремния на прозрачной подложке [17]. При этом период решёток 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, объединив вместе два уже рассмотренных элемента: зонную пластинку или аксикон (рис. 1а) и 4-зонный микрополяризатор (рис. 2а). Проблема состоит

в том, чтобы при переходе от одной кольцевой зоны к соседней зоне поляризация меняла направление на противоположное, то есть чтобы реализовывался скачок фазы на  $\pi$ . Поэтому в соседних кольцах ЗП размещаются решётки из противоположенных зон (рис. 2а): 1 и 3 или 2 и 4. На рис. 3 показана схема поляризационной микролинзы (ПМЛ), которая объединяет в себе свойства микрополяризатора (рис. 2а), и зонной пластинки с высокой числовой апертурой (близка к аксикону на рис. 1а). Такая линза будет изготовлена по той же технологии, как и поляризатор, описанный в [17].

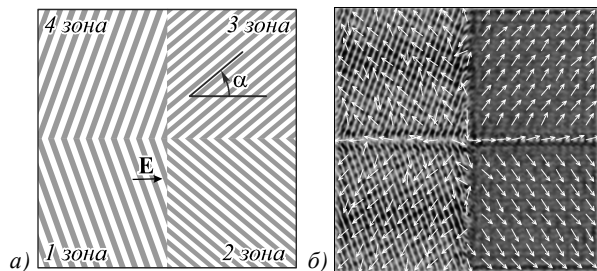


Рис. 2. Схема 4-зонного микрополяризатора из четырёх субволновых бинарных дифракционных решёток с периодом 460 нм (для длины волны 633 нм) в плёнке золота (а) и распределение отражённого света вблизи микрополяризатора (б); стрелками показано направление поляризации в каждой зоне

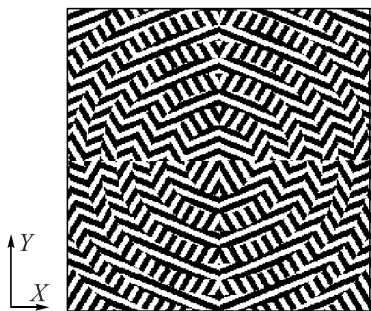


Рис. 3. Схема штрихов пропускающего бинарного субволнового компонента нанофотоники – ПМЛ или паркетной линзы, одновременно преобразующей линейную поляризацию в радиальную и фокусирующей свет

Для моделирования работы ПМЛ были выбраны следующие параметры: длина волны  $\lambda = 633$  нм, фокусное расстояние  $f = 633$  нм ( $NA = 1$ ), высота рельефа расчётная  $h = 0,24$  мкм, размер пиксела 22 нм, период решёток 220 нм, канавка у дифракционной решётки – 110 нм (5 пикселей), и ступенька – шириной 110 нм (5 пикселей); всё поле –  $5 \times 5$  мкм (рис. 3), уточнённый показатель преломления аморфного кремния  $n = 4,35 + i0,486$ ; подложка из стекла ( $n = 1,5$ ); сетка отсчётов в FDTD-методе  $\lambda/30$  по всем трём координатам.

На рис. 4 показаны зависимости размеров фокусного пятна по декартовым осям и интенсивности на оптической оси от расстояния до ПМЛ. Высота рельефа ПМЛ из аморфного кремния равна 70 нм. То есть плёнка кремния имеет толщину 70 нм и протравлена также на толщину 70 нм до подложки. Поляризация падающего света (плоская волна, ограниченная апертурой ПМЛ) направлена по оси  $y$ .

Заметим, что в развитом здесь подходе к расчёту оптических элементов высота рельефа несущественно влияет на работоспособность элемента. Такой элемент (рис. 3) при любой высоте рельефа (из некоторого диапазона высот) будет фокусировать свет в субволновый фокус за счёт преобразования поляризации из линейной в радиальную. От высоты рельефа зависит только энергетическая эффективность элемента. На ПМЛ падает плоская волна с линейной поляризацией и единичной амплитудой. На рис. 5 показаны зависимости размеров фокусного пятна по декартовым осям от расстояния до ПМЛ для двух разных элементов с высотой рельефа 60 нм (а) и 90 нм (б). Из рис. 4 и 5 видно, что фокусное пятно субволновое (меньше дифракционного предела) и почти круглое (разность диаметров по двум осям меньше 2%) на отрезке расстояния от 200 нм до 1,3 мкм.

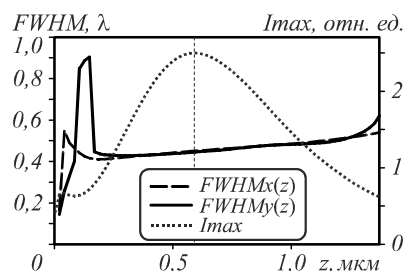


Рис. 4.  $FWHM_x$  (пунктирный график) – зависимость ширины по полупаду интенсивности вдоль оси  $x$  фокусного пятна, полученного в плоскости наблюдения на расстоянии  $z$  от верхней границы микрорельефа,  $FWHM_y$  (непрерывный график) – аналогично вдоль оси  $y$ .  $I_{max}$  (точечная линия) – зависимость интенсивности на оптической оси от расстояния  $z$ . Высота рельефа ПМЛ – 70 нм

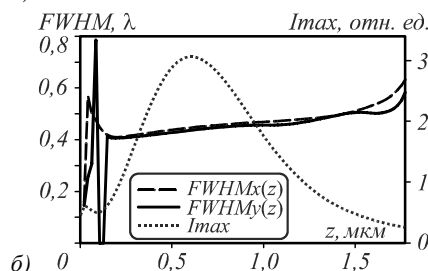
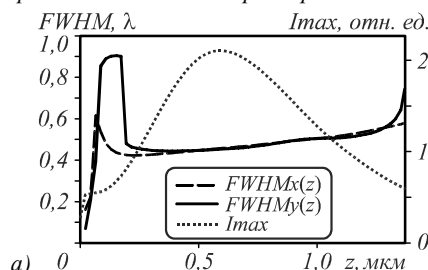


Рис. 5. Зависимость размеров фокусного пятна по осям  $x$  (пунктирный график),  $y$  (непрерывный график), и интенсивности на оптической оси (точечная линия) от расстояния до ПМЛ (рис. 3) при разной глубине рельефа субволновых решёток: 60 нм (а) и 90 нм (б). Поляризация падающего света направлена по оси  $y$

Для ПМЛ с глубиной рельефа 70 нм (рис. 4) фокусное пятно на расстоянии  $z = 391$  нм имело размеры  $FWHM_x = 0,434\lambda$ ,  $FWHM_y = 0,432\lambda$ . Далее на расстоя-

нии  $z=600$  нм ширина по полуспаду интенсивности несколько увеличилась и составила  $FWHM_x=0,448\lambda$ ,  $FWHM_y=0,458\lambda$ . Расчёт ширины фокусного пятна FWHM вдоль линий, проходящих через центр этого фокусного пятна и имеющих наклон  $\alpha$  к оси X с шагом  $0,5^\circ$ , показал, что максимальное колебание значения FWHM составило  $0,021$  мкм (1 отсчёт).

На рис. 6 показаны распределение интенсивности электрического поля на расстоянии  $z=391$  нм от ПМЛ в полутонах (рис. 6а) и два сечения интенсивности по осям  $x$  и  $y$ , проходящих через фокус (рис. 6б).

На рис. 7 показан ещё один график зависимости размеров фокусного пятна от расстояния до ПМЛ, аналогичный графикам на рис. 4 и 5 и отличающийся только тем, что глубина рельефа элемента (рис. 3)  $h=120$  нм. Он отличается от аналогичных графиков, приведённых выше, тем, что размер фокусного пятна вдоль оси поляризации падающего света (ось  $y$ ) почти всегда меньше, чем размер по оси  $x$ . И только в двух точках эти размеры почти совпадают.

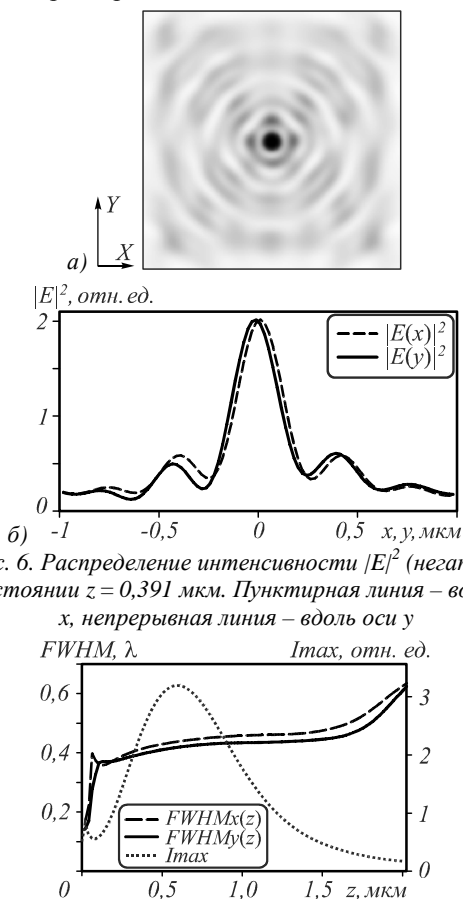


Рис. 6. Распределение интенсивности  $|E|^2$  (негатив) на расстоянии  $z=0,391$  мкм. Пунктирная линия – вдоль оси  $x$ , непрерывная линия – вдоль оси  $y$

Рис. 7. Зависимость размеров фокусного пятна по осям  $x$  (пунктирная линия) и  $y$  (сплошная линия) и интенсивности на оптической оси (точечная линия) от расстояния до ПМЛ (рис. 3) при глубине рельефа субволновых решёток  $120$  нм. Поляризация падающего света направлена по оси  $y$

На рис. 8 показаны распределение интенсивности электрического поля в полутонах на расстоянии  $z=181$  нм от ПМЛ (рис. 3) с глубиной рельефа  $h=120$  нм (рис. 8а) и два сечения интенсивности по осям  $x$  и  $y$ , проходящим через фокус (рис. 8б). Разме-

ры фокусного пятна на рис. 8 по осям равны  $FWHM_x=0,376\lambda$ ,  $FWHM_y=0,372\lambda$ . Несмотря на то, что фокусное пятно на рис. 8 имеет наименьший размер из рассмотренных и оно наиболее круглое из рассмотренных, вокруг него имеют место боковые лепестки, достигающие 50% от максимума. На рис. 6 боковые лепестки достигают только 20% от максимума интенсивности. Поэтому и величина максимальной интенсивности в фокусе на рис. 6 почти в 2 раза больше, чем на рис. 8.

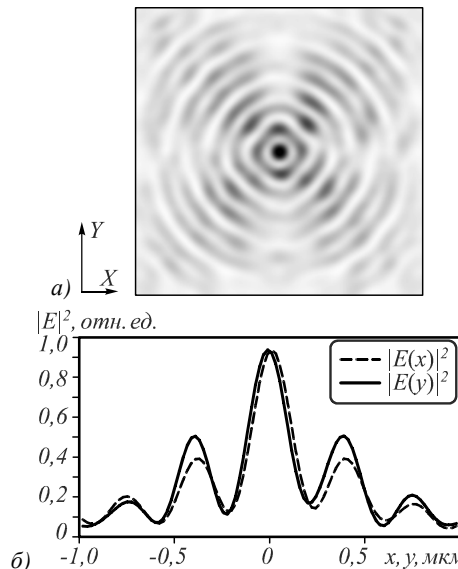


Рис. 8. Распределение интенсивности  $|E|^2$  на расстоянии  $z=0,181$  мкм. Пунктирная линия – вдоль  $x$ , сплошная линия – вдоль  $y$ . Глубина рельефа ПМЛ  $h=120$  нм

Энергетические характеристики фокусировки света рассматриваемой металлинзы приведены на рис. 9.

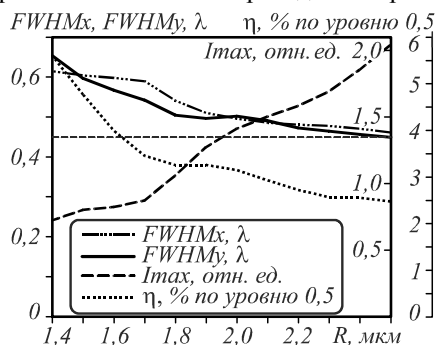


Рис. 9. Зависимость от радиуса апертуры падающей плоской волны на металлинзу: размер по полуспаду интенсивности фокусного пятна по осям  $x$  ( $FWHM_x$ ) и  $y$  ( $FWHM_y$ ), интенсивности излучения в фокусе  $I_{max}$  и эффективности фокусировки света  $\eta$ , рассчитанной по уровню  $0,5$  от максимума фокусного пятна

Эффективность фокусировки света зависит от диаметра падающего пучка. Моделирование проводилось с падающей плоской волной, ограниченной круглой апертурой радиуса  $R$ , при высоте рельефа линзы  $h=70$  нм. Чем меньше апертура пучка, тем выше эффективность, но тем хуже работает линза из-за меньшей числовой апертуры и, как следствие, шире диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсив-

ности. Например, уменьшая радиус апертуры до  $R = 1,4$  мкм, можно получить эффективность фокусировки света  $\eta = 5,6\%$ , однако ширина FWHM составит по осям  $x$  и  $y$  соответственно  $0,61\lambda$  и  $0,65\lambda$ . При максимальном рассмотренном радиусе апертуры  $R = 2,5$  мкм эффективность составит всего  $2,5\%$ . Увеличение апертуры приводит к увеличению максимальной интенсивности в центре фокусного пятна.

Таким образом, если сравнить рассмотренную ПМЛ с линзами из табл. 1, то она будет уступать четырём из пяти линз по эффективности, но будет превосходить все линзы из табл. 1 по формированию минимального фокусного пятна.

### Заключение

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

Моделирование показало, что металлинза диаметром  $5$  мкм и фокусным расстоянием  $633$  нм в тонкой плёнке кремния, состоящая из «кусков»  $4$  разных наклонов субволновых бинарных дифракционных решёток 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. Причём при изменении толщины линзы (или толщины плёнки кремния) от  $50$  нм до  $120$  нм диаметр фокусного пятна менялся несущественно, оставаясь меньше дифракционного предела, от  $0,37$  до  $0,45$  от длины волны. Авторы планируют изготовить такую линзу и провести её характеризацию.

### 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 // *Nature Materials*. – 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 Letters*. – 2014. – Vol. 14, Issue 3. – 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 Letters*. – 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 // *Applied Physics Letters*. – 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 Letters*. – 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 Letters*. – 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 // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6, Issue 5. – 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 // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10(11). – 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: Science & Applications*. – 2013. – Vol. 2. – e72 (7 p.). – 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 // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 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, Issue 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, Issue 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 // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60, Issue 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, Issue 23. – P. 233901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.

15. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 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(14). – P. 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
17. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный пропускающий микрополяризатор с фазовым сдвигом / С.С. Стафеев, М.В. Котляр, Л. О'Фаолейн, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 12-18. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.

### Сведения об авторах

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** см. стр. 436 этого номера.

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ (ныне – Самарский университет) по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 95 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Котляр Мария Викторовна**, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского университета (ранее – СГАУ). В 2001 году окончила физический факультет Самарского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сент-Эндрюса (Великобритания). Область научных интересов: нанофотоника. В Scopus 25 публикаций. E-mail: [ichteos@km.ru](mailto:ichteos@km.ru).

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г. Окончательный вариант – 30 июня 2016 г.

## MODELING A POLARIZATION MICROLENS TO FOCUS LINEARLY POLARIZED LIGHT INTO A NEAR-CIRCULAR SUBWAVELENGTH FOCAL SPOT

V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>, A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, M.V. Kotlyar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia, <sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

### Abstract

We propose a new version of the metalens, namely, a polarization microlens (PML) that focuses the linearly polarized laser light in a subwavelength circular spot. The PML consists of a set of binary subwavelength gratings, which are laid out in a parquet manner within the rings of a Fresnel zone plate. A phase shift of  $\pi$ , which the zone plate should introduce into the light field in passing the zone boundary, is implemented in the PML under study using two diffraction gratings adjacent to the zone boundary, which form oppositely polarized transmitted beams. It is shown that the PML relief depth can be reduced using a high refractive index material. For amorphous silicon, the PML relief depth can vary from 50 nm to 120 nm. In this case, a circular focal spot having a diameter smaller than the diffraction limit is formed at distances to the PML ranging from 200 nm to 1300 nm. The minimum focal spot diameter is 0.372 of a wavelength.

**Keywords:** polarization microlens (PML), planar lens, photonic crystal, sharp focus.

**Citation:** Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV. Modeling a polarization microlens to focus linearly polarized light into a near-circular subwavelength focal spot. Computer Optics 2016; 40 (4): 451-457. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-451-457.

**Acknowledgements:** The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, Presidential grants for support of leading scientific schools (NSH-9498.2016.9) and the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 14-29-07133, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-29-11698).

### References

- [1] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. Nat Mater 2014; 13: 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [2] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko II, Briggs DP. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation. Nano Lett 2014; 14: 1394-1399. DOI: 10.1021/nl4044482.
- [3] Sun S, Yang K, Wang C, Juan T, Chen WT, Liao CY, He Q, Xiao S, Kung W, Guo G, Zhou L. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces. Nano Lett 2012; 12: 6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668.

- [4] Lun L, Jiang W, Ma Y. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens. *Appl Phys Lett* 2013; 102: 231119. DOI: 10.1063/1.4810004.
- [5] Verslegers L, Catrysse PB, Yu Z, White JS, Barnard ES, Brongersma ML, Fan S. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett* 2009; 9(1): 235-238. DOI: 10.1021/nl802830y.
- [6] Aieta F, Genevet P, Kats MA, Yu N, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces. *Nano Lett* 2012; 12(9): 4932-4936. DOI: 10.1021/nl302516v.
- [7] Arbabi A, Horie Y, Ball AJ, Bagheri M, Faraon A. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nat Commun* 2015; 6: 7069. DOI: 10.1038/ncomms8069.
- [8] Arbabi A, Horie Y, Barheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotech* 2015; 10: 937-943. DOI: 10.1038/NNANO.2015.186.
- [9] Ni X, Ishii S, Kildishev AV, Shalaev VM. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Scien Appl* 2013; 2: e72. DOI:10.1038/lsa.2013.28.
- [10] West PR, Steward JL, Kildishev AV, Shalaev VM, Shkunov VV, Strohkendl F, Zakharenkov YA, Dodds RK, Byren R. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22 (21): 26212-26221. DOI: 10.1364/OE.22.026212.
- [11] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345(6194): 298-302. DOI: 10.1126/science.1253213.
- [12] Kotlyar VV, Stafeev SS, Liu Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light. *Applied Optics* 2013; 52(3): 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
- [13] 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.
- [14] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beams. *Physical Review Letters* 2003; 91: 233901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [15] Nalimov AG, O' Faolain L, Stafeev SS, Shanina MI, Kotlyar VV. Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial. *Computer Optics* 2014; 38(2): 229-236.
- [16] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Applied Optics* 2015; 54(14): 4388-4394. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [17] Stafeev SS, Kotlyar MV, O' Faolain L, Nalimov AG, Kotlyar VV. A four-zone transmission azimuthal micropolarizer with phase shift. *Computer Optics* 2016; 40(1): 12-18. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.

#### *Authors' information*

The information about author **Victor Victorovich Kotlyar** you can find on page 436 of this issue.

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in 2003. He received his Candidate's degree in Physics and Mathematics from Samara State Aerospace University in 2006 on the specialty of Optics. He currently works as an associate professor at the Technical Cybernetics sub-department at Samara National Research University, also holding a part-time researcher's position at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in Physics and Mathematics, a coauthor of 95 papers and 3 inventions. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Maria V. Kotlyar**, (b. 1979), Ph.D. She graduated with the first-class honors from Physics department of Kuibyshev (presently Samara) State University in 2001, received her PhD degree in Physics from the University of St. Andrews (UK) in 2005. Currently, she works as a researcher at the Research laboratory 35 at Samara National Research University. Research interests include nanophotonics, diffractive optics, and photonic crystals. In the Scopus, she has 25 publications. E-mail: [ichteos@km.ru](mailto:ichteos@km.ru).

*Received June 8, 2016. The final version – June 30, 2016.*