

# ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

## БИНАРНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЁТКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ И ФОКУСИРОВКОЙ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА [ОБЗОР]

С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, Л. О'Фаолейн<sup>3,4</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. Королева, Самара, Россия,

<sup>3</sup> Школа физики и астрономии, Университет Сент-Эндрюса, Великобритания,

<sup>4</sup> Технологический институт Корка, Корк, Ирландия

### Аннотация

Рассмотрены компоненты тонкой микрооптики с наноструктурированной поверхностью для управления поляризацией и фазой лазерного излучения. Такие компоненты включают пропускающие или отражающие свет субволновые дифракционные решётки, локально меняющие свое направление и фактор заполнения, но примерно сохраняющие период и глубину рельефа, детали которого могут составлять десятки и сотни нанометров для видимого диапазона длин волн. Детально анализируются малосекторные дифракционные поляризаторы, преобразующие линейную поляризацию в радиальную или азимутальную, а также субволновые бинарные микролинзы для острой фокусировки лазерного света. Приводятся примеры конкретных микрополяризаторов и металинз, изготовленных в плёнках аморфного кремния.

**Ключевые слова:** субволновая решётка, метаповерхность, фаза Панхаратнама–Берри, радиальная поляризация, азимутальная поляризация, острая фокусировка, металинза.

**Цитирование:** Стафеев, С.С. Бинарные дифракционные решётки для управления поляризацией и фокусировкой лазерного света [обзор] / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 299-314. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-299-314.

### Введение

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для изменения состояния амплитуды и фазы проходящего (или отражённого) излучения, известны в оптике давно [1]. Однако лишь в недавнем прошлом внимание учёных переключилось на исследование элементов, преобразующих и поляризацию света. Для этого используются дифракционные решётки с разным наклоном штрихов и с периодом меньше длины волны. Такие решётки называются субволновыми. В этом случае не возникает дифракционных порядков, кроме одного нулевого порядка. Управление поляризацией происходит следующим образом. Локальное направление штрихов решётки задаёт избранное направление, относительно которого вектор поляризации падающего света можно разложить на ТЕ- и ТМ-составляющие: ТЕ-направлена вдоль штрихов, а ТМ- – поперёк. При прохождении света через прозрачную решётку из-за того, что эффективные показатели преломления для ТЕ- и ТМ-составляющих разные и они приобретают разный набег фаз, вектор поляризации на выходе из решётки поворачивается на некоторый угол. Если задержка по фазе равна четверти длины волны, то решётка работает как кристаллическая четвертьволновая пластинка и преобразует линейную поляризацию в круговую. А если задержка по фазе между ТЕ- и ТМ-составляющими на выходе из решётки равна половине длины волны, то такая решётка работает как полуволновая пластинка. Для получения задержки фазы в полдлины волны света видимого диапазона в прозрачном материале с невысоким показателем преломления требуется создать рельеф с глубиной порядка длины волны. Для суб-

волновых решёток создание такой глубины рельефа является трудной задачей. Поэтому либо используют материал с высоким показателем преломления, что приводит к уменьшению пропускания решётки, либо используют геометрию отражения вместо пропускания. Для управления поляризацией падающего света нужно рассчитать период, скважность, глубину рельефа и направление штрихов решётки в каждой точке поверхности. Для этого надо использовать строгое решение векторных уравнений Максвелла.

В последнее время исследуются также оптические элементы, которые одновременно с поляризацией управляют и фазой света. Это компоненты фотоники с метаповерхностью. Компоненты с метаповерхностью для фокусировки света называются металинзами. Обычно металинза рассчитывается на основе фазы Панхаратнама–Берри и работает только при падении на неё света с круговой поляризацией. Это является недостатком, так как для формирования круговой поляризации нужен дополнительный элемент – четвертьволновая пластинка. В этой работе предлагается другой подход к управлению фазой света. Например, если требуется рассчитать линзу, то рассчитываются радиусы колец зонной пластинки Френеля с заданным фокусным расстоянием и для заданной длины волны. Далее каждая зона линзы заполняется бинарными субволновыми решётками, каждая из которых поворачивает электрический вектор нормально падающего на неё линейно-поляризованного лазерного света на заданный угол так, чтобы свет на выходе имел радиальную поляризацию. Период, глубина рельефа решётки и фактор заполнения подбираются

оптимальным образом с помощью моделирования и из условия примерного равенства амплитуды света, прошедшего через каждую локальную решётку. Фазовый сдвиг на полдлины волны между соседними зонами линзы обеспечивается тем, что две локальные решётки, примыкающие к границе зоны, должны поворачивать вектор поляризации на углы, разность которых равна  $\pi$ .

Данный обзор посвящён субволновым дифракционными решёткам, предназначенным для изменения состояния поляризации проходящего через них излучения, и металлинзам. Детально рассмотрены пропускающие и отражающие субволновые решётки, работающие как аналоги четвертьволновых и полуволновых пластинок. Рассмотрено применение таких решёток для преобразования лазерного света с линейной поляризацией в пучки с радиальной и азимутальной поляризацией. В последней части рассмотрены примеры металлинз для острой фокусировки лазерного света, состоящие из набора субволновых решёток.

### **Применение субволновых решёток для изменения поляризации света**

Самым простым способом преобразования поляризации является использование субволновых решёток. Показатели преломления света в такой решётке различны для ТЕ- и ТМ-поляризованной волны [2]:

$$n_{\text{eff}}^{\text{TE}} = \sqrt{dn_r^2 + (1-d)n_m^2},$$

$$n_{\text{eff}}^{\text{TM}} = 1/\sqrt{(d/n_r^2 + (1-d)/n_m^2)},$$

где  $d$  – фактор заполнения решётки (отношение ширины ступеньки к периоду решётки),  $n_r$  – показатель преломления материала ступеньки,  $n_m$  – показатель преломления среды.

Впервые возможность преобразования поляризации с помощью субволновых решёток была продемонстрирована в работе [3]. В силу наличия разности фаз в ТЕ- и ТМ-поляризованных волнах, прошедших через субволновый рельеф, с помощью последнего могут быть реализованы аналоги полуволновых и четвертьволновых пластинок и, как следствие, может осуществляться преобразование поляризации падающего на пластинку излучения. Технологически изготовить четвертьволновую пластинку проще, поэтому сначала был реализован именно такой тип поляризаторов. Впервые поворот поляризации света с помощью субволновой решётки – аналога четвертьволновой пластинки был экспериментально продемонстрирован в работах [4, 5], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок.

Отметим здесь, что часть работ, представленных в этой статье, посвящена применению субволновых решёток для получения цилиндрических векторных пучков. В таких пучках направление поляризации имеет радиальную симметрию [6]. Пучки с радиальной симметрией находят свое применение для острой фокусировки лазерного излучения [7] и для оптической микромани-

пуляции [8]. Азимутально-поляризованный свет также используется для острой фокусировки лазерного излучения [9]. Более того, азимутальная поляризация предпочтительнее для острой фокусировки света, чем радиальная: субволновое фокусное пятно света с радиальной поляризацией состоит в основном из продольной компоненты электрического поля (при этом свет от этого фокусного пятна почти не идёт к наблюдателю вдоль оптической оси), а фокусное пятно света с азимутальной поляризацией состоит в основном из поперечной компоненты, которая доступна наблюдателю на оптической оси. По этим причинам поперечно поляризованные фокусные пятна широко используются в таких областях, как оптическая когерентная томография [10], оптические системы хранения данных [11] и детектирование отдельных молекул [12].

В работе [13] концентрическая металлическая решётка используется для преобразования лазерного излучения с длиной волны 633 нм круговой поляризации в радиально-поляризованный свет. Для изготовления на поверхность плавленого кварца ( $n = 1,457$ ) наносился сначала слой алюминия толщиной 200 нм, а затем слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 40 нм. Показатель преломления алюминия, измеренный с помощью эллипсометра, оказался равным  $n = 1,9907 + 8,518i$  (т. е. отличным от справочного значения  $n = 1,373 + 7,618i$ ). Решётка из концентрических колец (аксикон) с периодом 200 нм и фактором заполнения 0,4 записывалась с помощью электронно-лучевой литографии на слой резиста, а затем переносилась на слой  $\text{SiO}_2$  с помощью реактивного ионного травления в среде фтора, а на слой алюминия – с помощью реактивного ионного травления в хлоре. Однако полученный пучок в [13] нельзя назвать в строгом смысле радиально-поляризованным – у такого пучка значения фазы в точках диаметра противоположных совпадают, в то время как у «настоящего» радиально-поляризованного пучка колебания напряженности электрического поля в этих точках происходят в противофазе. Для исправления ситуации в [14, 15] был предложен элемент, представляющий собой соединение концентрической металлической решётки с периодом 200 нм, подобной [14], с «вилочковой» голограммой с периодом 1,2 мкм. Элемент был изготовлен в плёнке золота толщиной 150 нм на стеклянной подложке, а его работа была проверена на длинах волн 633 нм и 850 нм. Технология, допускающая промышленное производство четвертьволновых пластинок на основе субволновых решёток, описана в работе [16] – решётки с периодом 360 нм и аспектным соотношением 5,2 для преобразования света с длиной волны 633 нм изготавливались с помощью UV-moulding процесса. В работе [17] рассмотрены субволновые решётки, преобразующие линейно-поляризованный свет в свет с круговой поляризацией для длин волн 488, 532 и 632,8 нм. Такая решётка может быть востребована в создании 3D-дисплеев [18].

Реализация полуволновой пластинки требует большего аспектного отношения отдельных элементов решётки, поэтому изготовить её сложнее. Высота

рельефа такой решётки должна быть в два раза выше, чем у четвертьволновой пластинки. В [19] впервые была экспериментально продемонстрирована работа субволновой решётки – аналога полуволновой пластинки. Фактически было рассмотрено три решётки-поляризатора, отличающиеся дизайном. Все поляризаторы были изготовлены в слое GaAs и предназначались для длины волны 10,6 мкм (длина волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера). Отметим еще, что в работе [19] период изготовленной решётки не был постоянным, а изменялся от  $d_{\min} = 2$  мкм до  $d_{\max} = 3,05$  мкм. В работе [20] была рассмотрена субволновая решётка, также являющаяся аналогом полуволновой пластинки, но уже для видимого диапазона. Такая решётка преобразовывала свет линейной поляризации с длиной волны 1064 нм в радиально-поляризованный пучок. Шаблон решётки был записан с помощью электронно-лучевой литографии в резисте ZEP 520A, после чего был перенесён на подложку из GaAs (показатель преломления  $n = 3,478$ ) с помощью ионного травления. В отличие от работы [19] период изготовленной решётки был постоянным и равным 240 нм. Интерферометр на основе решётки [20] был рассмотрен в работе [21]. В описанной выше работе [20] решётка-поляризатор была изготовлена в подложке с высоким показателем преломления. В работе [22] был предложен другой подход – решётка из материала с высоким показателем преломления была изготовлена на подложке с низким показателем преломления. Такой подход имеет ряд преимуществ: например, уменьшается аспектное отношение элементов рельефа, а также обеспечивается 100%-й коэффициент пропускания для одной из мод.

В работе [23] описано производство поляризатора по технологии кремний на диэлектрике, преобразующего линейно-поляризованный свет в радиально-азимутально-поляризованный для длин волн с 1030 нм до 1064 нм. Поляризатор из гидрогенизированного аморфного кремния (показатель преломления  $n = 3,4$ ) изготавливался на подложке из материала с низким показателем преломления (плавленый кварц  $n = 1,45$ ). В работе [24, 25] похожим образом был реализован четырёхсекторный пропускающий поляризатор с фазовым сдвигом. Микрополяризатор на рис. 1 был изготовлен по технологии электронной литографии. На поверхность аморфного кремния (130 нм) (a-Si) на прозрачной пирексной подложке (показатель преломления 1,47, <http://www.valleydesign.com/pyrex.htm>) нанесли 320 нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре 180 °C. Толщина 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 была написана картина четырёхсекторной решётки-поляризатора на поверхности резиста. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА. Трансформирование шаблона решётки-поляризатора с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного

ионного травления с использованием газов CHF<sub>3</sub> и SF<sub>6</sub> (аналогично технологии, описанной в [26]). Толщина резиста была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части картины во время травления 130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5.

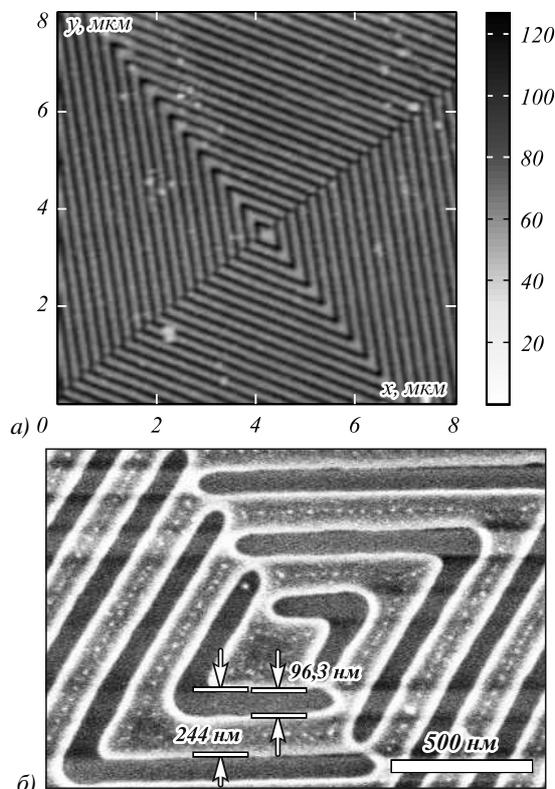


Рис. 1. Изображения пропускающего поляризатора, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа (а) и сканирующего электронного микроскопа (SEM) (б)

Четырёхсекторный пропускающий поляризатор преобразует падающее на него лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 633$  нм в азимутально-поляризованное с фазовым сдвигом так, что диаметрально противоположенные точки в сечении пучка имеют одинаковую поляризацию. В [24] прошедший поляризатор лазерный пучок фокусировался кварцевой бинарной зонной пластинкой (ЗП) (рис. 2а) с фокусным расстоянием, равным длине волны, в субволновое фокусное пятно. Измерения, выполненные с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ) [27], показали, что на расстоянии 200–250 нм от поверхности ЗП формируется фокусное пятно с размерами FWHM = 0,46λ и FWHM = 0,57λ (рис. 2б).

Другие работы по преобразованию поляризации излучения с помощью субволновых решёток – работы [28–30]. В работе [28] решётка из плавленого кварца с периодом 400 нм была покрыта слоем TiO<sub>2</sub> для использования в качестве полуволновой пластинки. Решётка работала для длины волны 628 нм, а коэффициент пропускания составлял 90%. В работе [30] исследовалась субволновая решётка с периодом 410 нм, профиль которой имел наклон к нормали поверхности.

Решётка была изготовлена следующим образом: на подложку из плавленого кварца сперва наносился слой  $TiO_2$  толщиной 640 нм, на него наносилась решётка из хрома, которая использовалась в дальнейшем в качестве маски. При проведении ионного травления образец закреплялся таким образом, чтобы обеспечить наклон протравленной канавки примерно 30 градусов к нормали поверхности. После травления остатки хрома удалялись. Несмотря на перетрав при изготовлении, решётка имела высокий коэффициент пропускания – 95,5% и обеспечивала разность фаз между ТЕ- и ТМ-волной 177 градусов (т. е. очень близкий к полуволновой пластинке).

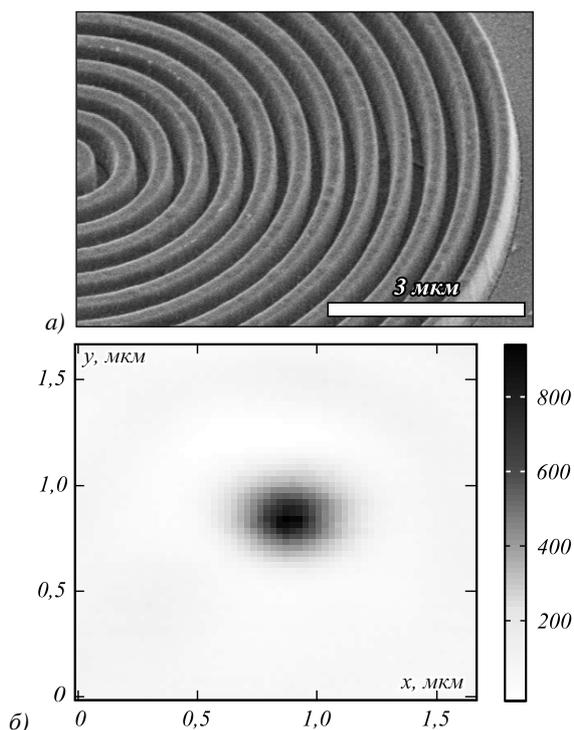


Рис. 2. SEM-изображение ЗП [27] (а) и 2D-распределение интенсивности, полученное со СБОМ Интегра Спектра (б)

В работе [31] исследуется ахроматическая волновая пластинка для ИК-диапазона, изготовленная по технологии импринтинга и создающая разность фаз 30 градусов для проходящего излучения в диапазоне длин волн 8,5–10,5 мкм. Исследуемая решётка имела период 3 мкм, глубину 1,63 мкм и фактор заполнения 0,7. На первом этапе изготовления создавался шаблон с периодом 3 мкм и фактором заполнения 0,5. На подложку из стеклоглерода был нанесен слой WSi и фоторезиста. Затем фоторезист экспонировался с помощью He-Cd лазера (длина волны 442 нм). После удаления проэкспонированного фоторезиста слой WSi подвергался реактивному ионному травлению в среде  $SF_6$ , а стеклоглерод – в среде  $O_2$ . Время экспонирования подбиралось таким образом, чтобы достичь глубины рельефа 1,94 мкм. Изготовленный шаблон использовался для выпрессовывания исследуемой решётки из халькогенидного стекла. Такое стекло обладает показателем преломления 2,7 (для исследуемого диапазона длин волн) и состоит в основном из серы (Sb-

Ge-Sn-S система). Температура, давление и время выпрессовывания составляли 253 °С, 3,8 Па и 90 с соответственно. В другой работе этих же авторов [32] также по технологии импринтинга изготавливается поляризатор для длин волн 5–9 мкм. Изготовленная решётка обладала глубиной рельефа 260 нм, шириной канавки 500 нм и шириной столбика рельефа 290 нм. Также по технологии импринтинга создавалась решётка в работе [33]. Однако работала она уже в видимом диапазоне. Период решётки был равен 300 нм, а изготовлена она была в стекле  $Bi_2O_3-GeO_2-V_2O_5$ . Для длины волны 400 нм такая решётка реализовывала разность фаз 0,46λ. Эффективный метод расчёта волновых пластинок предложен в работе [34].

**Отражающие пластинки**

Требование высокого аспектного отношения при изготовлении полуволновой пластинки можно обойти, если использовать не пропускающую решётку, а отражающую. Высота рельефа в таком случае уменьшается в два раза. В работах [27, 35] был предложен отражающий поляризатор, предназначенный для преобразования линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный. Микрополяризатор представлял собой субволновую решётку, разбитую на четыре сектора, в каждом из которых угол между направлением рельефа и поляризацией падающего излучения был различен. В зависимости от сектора поляризация поворачивалась на угол 45, -45, 135 или -135 градусов (рис. 3).

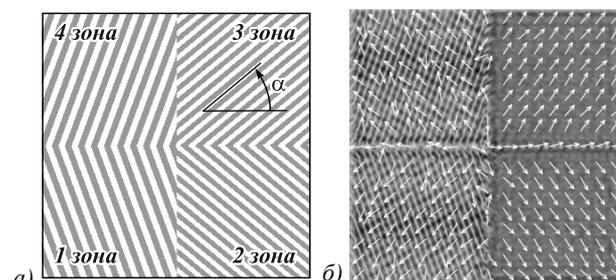


Рис. 3. Шаблон четырёхсекторного микрополяризатора с периодом 460 нм (для длины волны 633 нм) (а) и интенсивность  $|E|^2$  отражённого от ДООЭ света (негатив) (б). Стрелками показано направление поляризации

На рис. 4 показаны результаты моделирования отражения света с линейной поляризацией от субволновой решётки с параметрами, как на рис. 3. Моделирование проводилось на основе решения уравнений Максвелла FDTD-методом с помощью программы FullWAVE (RSoft).

На рис. 4 показана зависимость интенсивности отражённого света  $|E|^2$  от угла  $\alpha$  падающего поля и угла поляризации  $\theta$  от угла падающего поля  $\alpha$  к линиям решётки. Из рис. 4б видно, что интенсивность отражённого света изменяется в широком диапазоне в зависимости от угла наклона рельефа  $\alpha$ . Для формирования отражённого поля с максимально равномерным распределением интенсивности следует использовать только четыре сектора с различно ориентированными решётками.

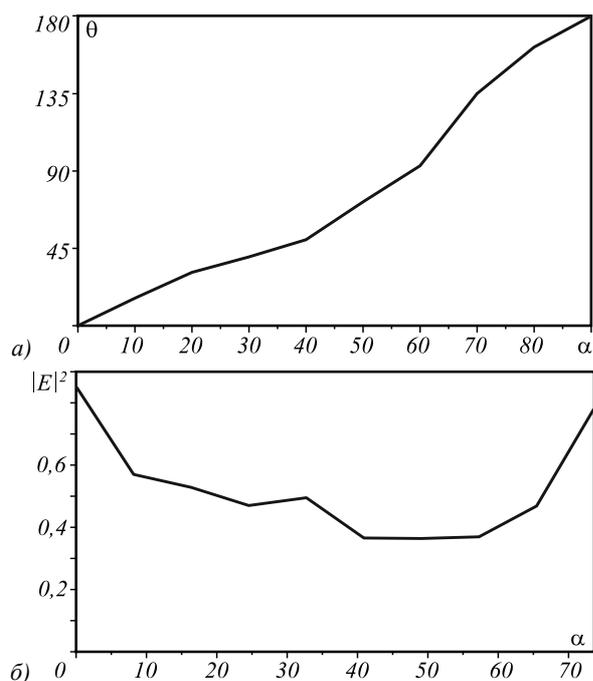


Рис. 4. Зависимость угла поляризации  $\theta$  от угла падающего поля  $\alpha$  к линиям решётки (а) и зависимость интенсивности отражённого света  $|E|^2$  от угла  $\alpha$  падающего поля (б)

Это позволит избежать областей с максимальной отраженной интенсивностью (больше 0,7 относительных единиц на рис. 4б). В четырехсекторном поляризаторе разность углов  $\theta$  между соседними секторами должна быть равна  $90^\circ$ . С учетом этого и рис. 3а, б нами были выбраны углы наклона решёток  $\alpha = \pm 40^\circ$  и  $\pm 70^\circ$  как наиболее подходящие. В таком случае углы поворота поляризации составят  $-135^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . При моделировании период всех четырех секторов был равен 0,4 мкм для всех углов  $\alpha$ . Теперь для получения равномерного распределения интенсивности отражённого света для углов  $\alpha = \pm 40^\circ$  и  $\pm 70^\circ$  период решёток также должен быть оптимизирован. Оптимальные периоды решёток были найдены равными 0,4 мкм для секторов с углом  $\alpha = \pm 40^\circ$  и 0,46 мкм для секторов с углом  $\alpha = \pm 70^\circ$ . До оптимизации отношение отраженной интенсивности к падающей на решётку для углов  $\alpha = \pm 40^\circ$  и  $\alpha = \pm 70^\circ$  было равно 58 % и 43,3 % соответственно (рис. 4б). После оптимизации коэффициент отражения для угла  $\alpha = \pm 70^\circ$  оказался равным 51 % [36, 37].

Отражающий микрополяризатор (рис. 5а) для преобразования линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный [27, 35] был изготовлен по технологии электронной литографии. На поверхность стеклянной подложки был нанесён слой золота толщиной 160–180 нм. Далее слой золота был покрыт слоем резиста, на который с помощью электронного луча (напряжение на трубке 30 кВ) проецировалась картина четырехсекторной решётки поляризатора. Затем выполнялась операция проявления, то есть образец травился в кислоте, который растворяет участки резиста, экспонированные пучком электронов. Далее с помощью реактивного ионного травления шаблон решётки-

поляризатора трансформировался в слой золота, то есть травилась плёнка золота в тех местах, где не было резиста. При этом с помощью аргоновой плазмы частицы золота расплывались из участков, не защищённых резистом. На заключительном этапе остатки резиста удалялись с использованием кислородной плазмы, в результате чего шаблон поляризатора был как бы «выгравирован» на золоте. Время реактивного ионного травления было оптимизировано таким образом, чтобы достичь глубины травления золота примерно 110 нм. В работах [36, 37] по такой же технологии был реализован тоже отражающий поляризатор, но использовался он уже для получения азимутально-поляризованного пучка (рис. 5б).

На рис. 6а показано изображение четырехзонного элемента (рис. 5а), когда перед регистрирующей камерой расположен поляризатор, ось которого направлена вертикально (падающий свет имел линейную поляризацию, направленную горизонтально). При этом светлыми оказываются все четыре зоны элемента. Причём коэффициент отражения от двух правых зон больше (на 10%), чем от двух левых. Достичь одинакового коэффициента отражения для всех четырех секторов можно, поменяв периоды и факторы заполнения решёток в отдельных секторах. На рис. 6б показано изображение поверхности микрополяризатора, когда ось поляризатора на выходе из оптической системы повернута на  $45^\circ$  градусов к горизонтальной оси. На рис. 6в показано то же, что и на рис. 6б, но ось поляризатора на выходе из оптической системы повернута на  $-45^\circ$  по отношению к горизонтальной оси. На рис. 6б и 6в видно, что из четырех зон светлыми оказываются только две квадратные зоны элемента, расположенные по диагонали, параллельной направлению оси выходного поляризатора. На рис. 7 показано изображение микрополяризатора (рис. 5б) при наличии перед регистрирующей CCD-камерой поляризатора, ориентированного под углом  $0^\circ$  (а),  $-45^\circ$  (б) и  $45^\circ$  (в) по отношению к направлению поляризации света, падающего на элемент. Из рис. 7 видно, что отражённый от поляризатора (рис. 5б) свет имеет азимутальную поляризацию.

Далее отражённый пучок (рис. 6) использовался для острой фокусировки лазерного излучения с помощью бинарной микролинзы (рис. 2а). На рис. 8 показан пример распределения интенсивности, полученного со СБОМ, с минимальным размером фокусного пятна  $\text{FWHM}_{\text{min}} = (0,38 \pm 0,02)\lambda$ .

Отражающая волновая пластинка с периодом 400 нм, фактором заполнения 0,5 и глубиной рельефа 280 нм исследуется в работах [38, 39]. Она сравнивалась с пропускающей решёткой с таким же периодом и фактором заполнения, но в два раза большей глубиной рельефа (450 нм). В отличие от работ [35–37] рельеф обеих решёток в [38, 39] был изготовлен в слое фоторезиста, отражение же достигалось благодаря использованию кремниевой подложки (в пропускающей решётке подложка была из стекла). Численно и экспериментально было показано, что обе решётки обеспечивают одинаковую задержку фазы.

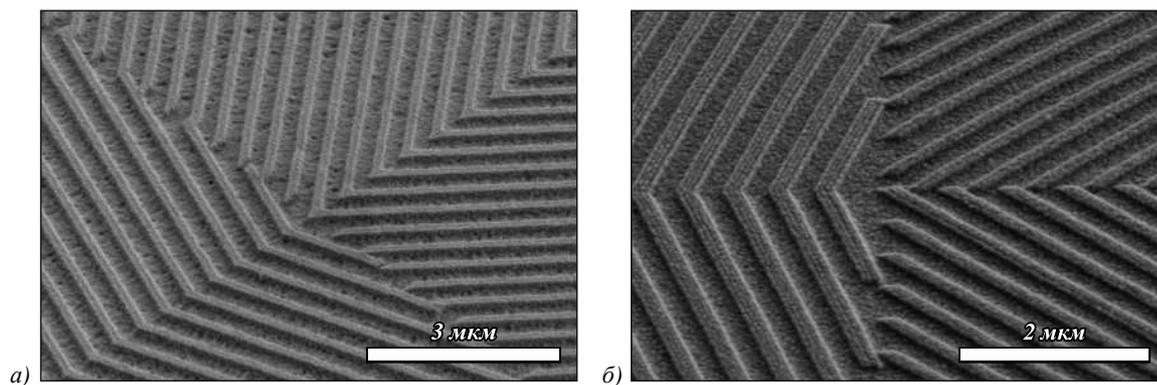


Рис. 5. SEM-изображение отражающего радиального (а) и азимутального поляризаторов (б)

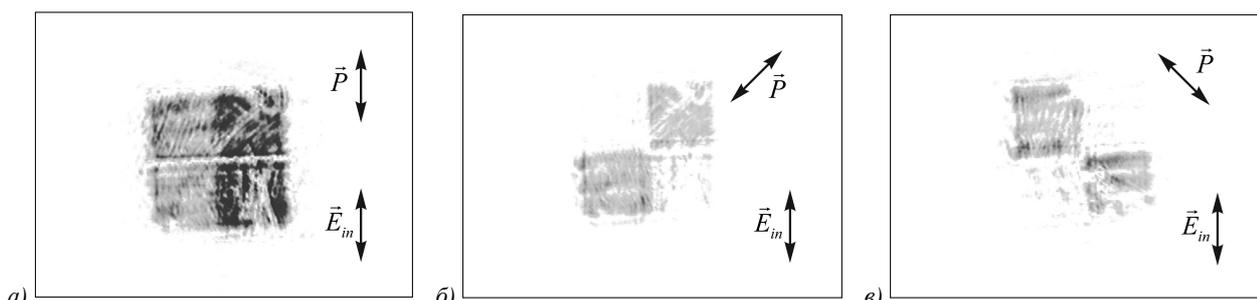


Рис. 6. Изображение (негатив) четырёхзонного элемента (рис. 5а) в лазерном свете, когда ось поляризатора на выходе (перед CCD-камерой) направлена под углом 0°(а), 45°(б), -45°(в) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения

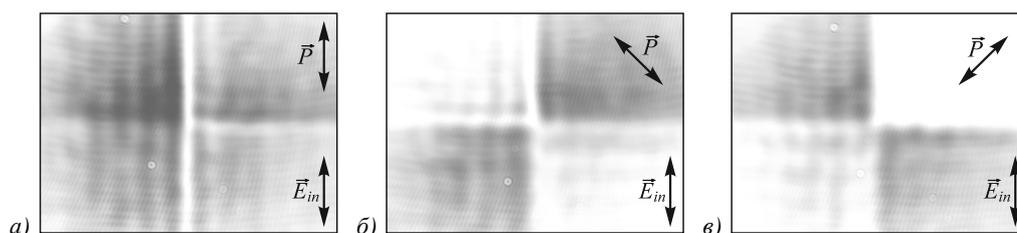


Рис. 7. Изображение четырёхзонного микрополяризатора (рис. 5б) в лазерном свете. Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повернутый на угол 0° (а), -45° (б) и 45° (в) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения

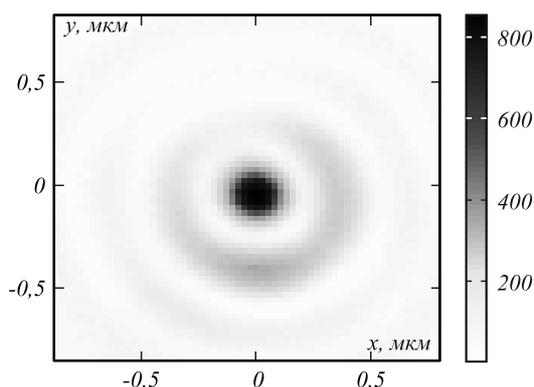


Рис. 8. Пример распределения интенсивности, полученного со СБОМ при фокусировке света, отражённого от микрополяризатора (рис. 5а) и сфокусированного микролинзой (рис. 2а)

**Решётки-поляризаторы для терагерцевого диапазона**

Относительно большое количество работ, в которых субволновые решётки применяются для создания волновых пластинок, посвящено исследова-

нию излучения терагерцевого диапазона. Например, в [40, 41] четвертьволновая пластинка для частот 2,6 ТГц, 3,2 ТГц и 3,8 ТГц представляла собой решётку с периодом 60 мкм и глубиной рельефа 330 мкм, 280 мкм и 230 мкм соответственно. А в работе [42] рассмотрена решётка с периодом 20 мкм и фактором заполнения 0,5 для частот 1,5 ТГц и 2,8 ТГц (глубина рельефа 46 и 30 мкм соответственно). Решётка была изготовлена из кремния, а антиотражающее покрытие SU8 было использовано для улучшения коэффициента пропускания решётки до 21%. В работе [43] четвертьволновая пластинка реализована уже для частоты 0,51 ТГц. Решётка [43] имела период 30 мкм и глубину 156 мкм. Решётка с периодом 10 мкм и глубиной 6 мкм используется в [44] в качестве четвертьволновой пластинки для излучения с частотой 10 ТГц. В работе [45] рассмотрена четвертьволновая пластинка для низких частот терагерцевого диапазона – от 200 ГГц до 330 ГГц. Ахроматическая четвертьволновая пластинка для диапазона частот от 0,47 до 0,8 ТГц была рассмотрена в работе [46]. Эксперимент показал, что погрешность изготовления

пластинки при освещении ее светом с частотой 0,5 ТГц приводила к отклонениям задержки фазы в пределах 3 %. Также ахроматическая, но уже отражающая четвертьволновая пластинка исследуется в [47] для частот от 1,8 до 2,8 ТГц.

#### ***Субволновые решётки, работающие как поглощающие поляризаторы***

В приведенных выше параграфах субволновые решётки работали как волновые пластинки – преобразовывали поляризацию проходящего через них излучения в силу разности эффективных показателей преломления решётки для ТЕ- и ТМ-поляризованных волн. Это не единственный способ преобразования поляризации с помощью субволновых решёток. В работе [48] было показано, что в такой решётке ТМ-поляризованная волна поглощается сильнее ТЕ-поляризованной. Используя этот эффект, можно создавать аналоги «классических поляризаторов».

Субволновые микрополяризаторы для видимого диапазона применяются в [49] для получения поляризационных изображений. Массив решёток, различающихся углом наклона рельефа (0, 45, 90 и 135 градусов), был изготовлен на стеклянной подложке в плёнке алюминия по технологии электронной литографии и ионного травления. Изготовленные решётки имели прямоугольный профиль с периодом 140 нм, фактором заполнения 0,5 и глубиной рельефа 100 нм. Размер отдельной решётки был равен  $7,4 \times 7,4$  мкм, т.е. совпадал с размером ячейки CCD. Изготовленный массив решёток совмещался с CCD-камерой и применялся для получения поляризационных изображений в режиме реального времени.

#### ***Металинзы на основе субволновых решёток***

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 [50–52].

В данной работе мы не ставим целью провести обзор КМП, существующих сегодня, так как здесь рассматривается узкий класс КМП, основанных на субволновых решётках. Тем не менее, ниже приведены ссылки, которые позволят читателю оценить прогресс и направление текущих исследований в области метаповерхностей.

В частности, в ряде работ [53–59] рассматриваются метаповерхности, основанные на графене. В работах [53, 54] метаповерхности, позволяющие управлять фазой и амплитудой отражённого света, реализованы для управления инфракрасным излучением. При этом в [54] показано, что взаимодействие света с тонким слоем графена можно усилить с помощью субволнового оптического резонатора. В [56] реализована гипербо-

лическая метаповерхность на основе графеновых полосок для терагерцевого излучения и ближнего ИК-диапазона. В [57] изучается возбуждение плазмонов в массиве графеновых микролент. Возбуждение плазмонов в графеновом тейпере наблюдалось в [60] методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. В работе [61] исследуется распространение плазмонов в слое графена, над которым расположен АСМ-зонд, освещаемый светом с длиной волны 11,2 мкм. Фильтры на основе слоев графена и диэлектрика рассмотрены в [62].

Интересны исследования метаповерхностей, поразному реагирующих на различную поляризацию падающего на них света. Так, например, в [63, 64] метаповерхность используется для возбуждения поверхностных плазмонов, распространяющихся в различных направлениях в зависимости от направления круговой поляризации возбуждающего их света. А в работе [65] в зависимости от направления вращения круговой поляризации слой метаповерхности выступает в качестве собирающей или же рассеивающей линзы.

Градиентная метаповерхность, рассмотренная в [66], способна преобразовывать распространяющиеся волны в поверхностные с эффективностью, близкой к 100 %. А в [67] градиентная метаповерхность используется в качестве линзы, работающей в диапазоне длин волн от 750 нм до 950 нм.

В работе [68] одномерная металлическая решётка (простейшая метаповерхность) используется для управления поверхностными плазмонами. Численно показано, что одна и та же решётка с периодом 120 нм, шириной ступеньки 60 нм и высотой 80 нм, освещаемая светом с различной длиной волны, формирует плазмоны, по-разному распространяющиеся: можно наблюдать явление негативной рефракции, обычной дифракции и нерасходящейся волны. Метаповерхности, основанные на V-образных антеннах, описаны в работах [69, 70]. В [69] рассмотрена двухслойная метаповерхность, работающая на пропускание в видимом диапазоне длин волн. Исследуемая метаповерхность состояла из слоя V-образных антенн из золота и золотой пленки с V-образными отверстиями, дополняющими антенны в соответствии с принципом Бабинэ. Характерный размер антенны был равен 150 нм, а два золотых слоя были разделены слоем водород-силесквioxсана толщиной 100 нм.

Ультратонкая голограмма (30 нм), основанная на использовании метаповерхности, рассмотрена в [71]. Голограмма на основе метаповерхности, рассмотренная в [72], создавала изображение размером  $330 \times 232$  мкм. Отдельный пиксель голограммы представлял собой металлический наностолбик, ориентированный в пространстве. Спиновый эффект Холла для фотонов, наблюдаемый в слое метаповерхности, рассмотрен в работе [73].

Метаповерхность, изменяющая свои оптические свойства под воздействием подведенного к ней электрического напряжения, описывается в [74]. В зависимости от напряжения удается изменять поглощение

в слое метаповерхности на 30%. Метаповерхности являются частным случаем метаматериалов. Эволюция от метаматериала к метаповерхности и далее к отдельным метаустройствам описана в [75].

С помощью КМП можно сформировать оптические вихри [76]; пилообразные решётки, отражающие 80% света в заданный угол в широком диапазоне в ближней ИК-области спектра [77]; сфокусировать свет в кольцо [78] или в поперечный отрезок [79]. Особенно интересным является применение КМП в качестве супертонких микролинз [80–85]. Причем линзы в [80–85] были реализованы для ИК-диапазона, и только линза в [85] фокусировала свет видимого диапазона с длиной волны 550 нм. Линзы на основе металлических наноматриц [80, 83, 84] имеют меньшую эффективность, чем линзы из аморфного кремния [81, 82, 85]. Наилучшими характеристиками обладает металлинза из кремниевых столбиков диаметром 200 нм и высотой около 1 мкм [81]. 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 [81] является высокое аспектное отношение (5:1), которое требуется обеспечить для качественного изготовления кремниевых столбиков. В [85] 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 [85] линза рассчитывалась на основе фазы Панхаратнама–Берри и работала 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 [85] невысокая числовая апертура. В работе [86] 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 четырех), преобразующие линейную поляризацию падающего света в радиальную. Предложенным методом рассчитана, а затем изготовлена и исследована тонкая металлинза 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 металлинза была изготовлена по технологии электронной литографии и ионного травления.

Кратко рассмотрим этапы расчёта и моделирования металлинзы из [86]. Известно [87, 88], что острая фоку-

сировка лазерного света с линейной поляризацией с помощью компонент микрооптики (бинарного аксикона [87] или бинарной зонной пластинки [88]) приводит к формированию эллиптического субволнового фокусного пятна. Например, если бинарную 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 полуоспадам 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) [61]. Известно также, что преобразовав лазерный пучок с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией, можно получить круглое фокусное субволновое пятно [7]. Например, в [35] рассчитан четырёхзонный микрополяризатор из субволновых решёток 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 [7, 35] и получить с помощью такого светового поля острую субволновую фокусировку света [27, 35]. Заметим, что четырёхзонный пропускающий микрополяризатор может быть реализован в плёнке аморфного кремния на прозрачной подложке [25]. 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, объединяя вместе два уже рассмотренных элемента. На рис. 9 показана картина бинарного рельефа металлинзы, которая объединяет в себе свойства и микрополяризатора, и зонной пластинки с высокой числовой апертурой.

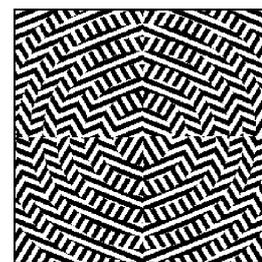


Рис. 9. Схема штрихов пропускающей бинарной металлинзы, одновременно преобразующей линейную поляризацию в радиальную и фокусирующей свет

Параметры металинзы, показанной на рис. 9, следующие: длина волны  $\lambda = 633$  нм, фокусное расстояние  $f = 633$  нм ( $NA = 1$ ), высота рельефа  $h = 0,24$  мкм, размер отсчета – 22 нм, период решёток – 220 нм, канавка у дифракционной решётки – 110 нм и ступенька – шириной 110 нм. Уточнённый (измеренный на эллипсомере) показатель преломления аморфного кремния  $n = 4,35 + i0,486$ .

Металинза с рельефом, показанным на рис. 9, 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. 9) 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.

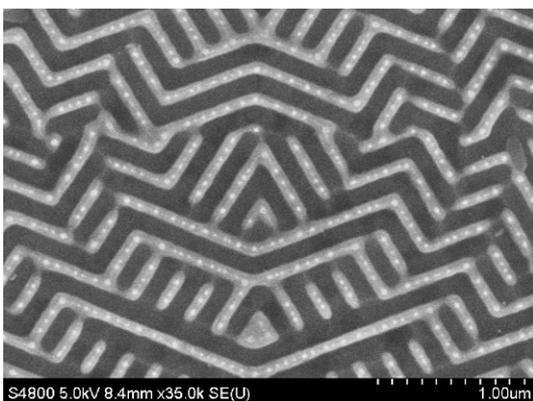


Рис. 10. Изображение в электронном микроскопе увеличенного центрального фрагмента  $3 \times 2$  мкм металинзы в плёнке аморфного кремния

Трансформирование шаблона с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов  $\text{CHF}_3$  и  $\text{SF}_6$ . 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. 10 показано изображение увеличенной центральной части металинзы, полученное с помощью электронного микроскопа.

Экспериментальное исследование фокусировки света исследуемой металинзой осуществлялось средствами СБОМ. В эксперименте свет от гелий-неонового лазера (длина волны – 633 нм, мощность – 50 мВт) попадал через волоконно-оптическую транспортную систему на исследуемую металинзу и фокусировался в субволновое пятно. Полная ширина пучка, падающего на металинзу, 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. 11 показано распределение интенсивности в фокусе, зафиксированное на СБОМ. Максимальная интенсивность в фокусе в 11 раз превышала максимальную интенсивность падающего на линзу пучка. Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны  $\text{FWHM}_x = 0,55\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,49\lambda$ . Эти значения отличаются всего на 8% от расчётных значений ( $\text{FWHM}_x = 0,52\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,46\lambda$ ), полученных с учётом технологических погрешностей изготовления металинзы.

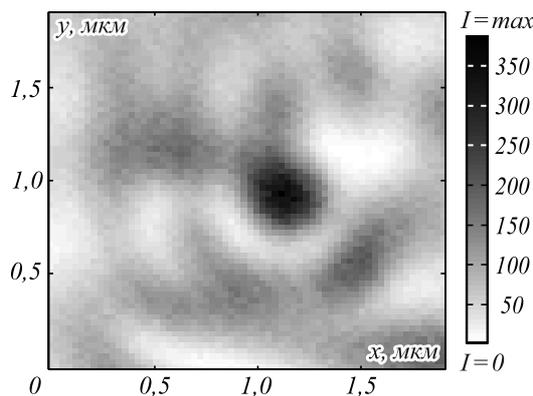


Рис. 11. Распределение интенсивности на расстоянии  $z = 0,6$  мкм от металинзы

До сих пор во всех примерах использовались субволновые решётки только четырёх направлений, которых достаточно, чтобы формировать световые поля с радиальной и азимутальной поляризацией. Но понятно, что чем больше будет таких направлений у штрихов решётки, тем точнее будет формироваться заданное световое поле. Приведем результат моделирования расчёта металинзы, у которой использовано шестнадцать разных направлений штрихов субволновых решёток. На рис. 12а показана металинза, аналогичная показанной на рис. 9, но вместо четырёх секторов имеющая шестнадцать секторов. Параметры моделирования были следующие: длина волны  $\lambda = 633$  нм, падающая волна плоская ( $E_x = 1, E_y = E_z = 0$ ), фокусное расстояние  $f = 633$  нм, высота рельефа  $h = 0,12$  мкм, размер пиксела – 22 нм, период решёток – 220 нм, канавка у дифракционной решётки – 110 нм (5 пикселей) и ступенька – шириной 110 нм (5 пикселей). Все поле на рис. 12а составляет  $8 \times 8$  мкм, показатель преломления материала решёток  $n = 4,35 + i0,486i$  (аморфный кремний), подложка из стекла ( $n = 1,5$ ); сетка отсчётов в FDTD-методе –  $\lambda/30$  по всем трем координатам.

Фокусное пятно имеет почти круглую форму (рис. 12б), и размеры по декартовым осям по полуширине интенсивности равны  $\text{FWHM}_x = 0,390\lambda$ ,  $\text{FWHM}_y = 0,401\lambda$ . Вся энергия фокусного пятна сосредоточена в продольной компоненте поля  $E_z$ , так как субволновые решётки металинзы (рис. 12а) подобра-

ны таким образом, чтобы падающую линейную поляризацию преобразовать в радиальную.

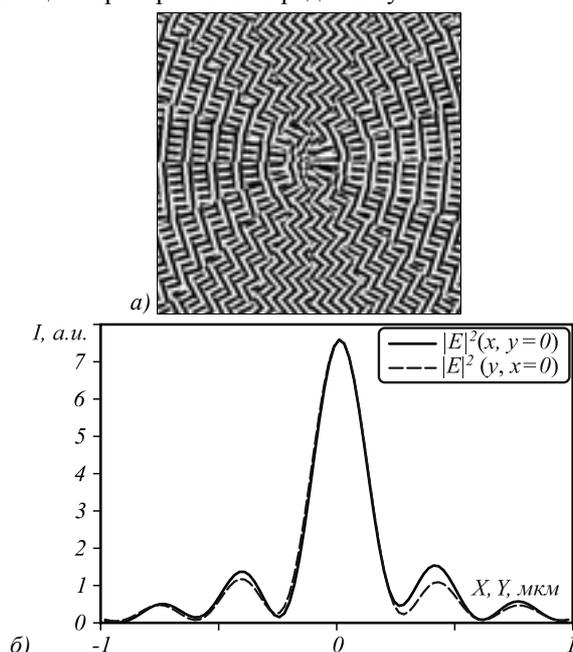


Рис. 12. Маска бинарного рельефа металлинзы из аморфного кремния с фокусным расстоянием, равным длине волны  $f = \lambda = 633$  нм (а), и сечения интенсивности на расстоянии 600 нм от поверхности линзы вдоль осей  $X$  и  $Y$  через центр фокусного пятна (б)

### Заключение

В данном обзоре проведен анализ современных статей, посвящённых созданию субволновых решёток, предназначенных для изменения состояния поляризации и фазы проходящего через них излучения. Детально рассмотрены субволновые решётки, работающие как аналоги волновых пластинок, предназначенные для создания цилиндрических векторных пучков. Предложен простой подход для создания компонент с метаповерхностью на основе локальных субволновых решёток. Этот подход отличается от обычного, основанного на методе фазы Панхаратнама–Берри, и не требует освещения светом с круговой поляризации. Приводятся конкретные примеры микрополяризаторов и металлинз.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 17-19-01186.

### Литература

1. *Diffractive Nanophotonics* / Ed. by V.A. Soifer. – Boca Raton, USA: CRC Press, 2014. – 704 p. – ISBN: 978-1-466-59069-4.
2. **Lalanne, P.** On the effective medium theory of subwavelength periodic structures / P. Lalanne, D. Lemerrier-Lalanne // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43(10). – P. 2063-2086. – DOI: 10.1080/09500349608232871.
3. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1996. – Vol. 103(3). – P. 125-130.
4. **Bomzon, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Let-*

- ters. – 2002. – Vol. 27(5). – P. 285-287. – DOI: 10.1364/OL.27.000285.
5. **Bomzon, Z.** Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26(18). – P. 1424-1426. – DOI: 10.1364/OL.26.001424.
6. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1(1). – P. 1-57. – DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
7. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91(23). – P. 233901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
8. **Salamin, Y.I.** Direct high-power laser acceleration of ions for medical applications / Y.I. Salamin, Z. Harman, C.H. Keitel // *Physical Review Letters*. – 2008. – Vol. 100(15). – P. 155004. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.155004.
9. **Hao, X.** Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35(23). – P. 3928-3930. – DOI: 10.1364/OL.35.003928.
10. **De Boer, J.F.** Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination / J.F. de Boer, T.E. Milner // *Journal of Biomedical Optics*. – 2002. – Vol. 7(3). – P. 359-371. – DOI: 10.1117/1.1483879/
11. **Li, X.** Rewritable polarization-encoded multilayer data storage in 2, 5-dimethyl-4-(p-nitrophenylazo) anisole doped polymer / X. Li, J.W.M. Chon, S. Wu, R.A. Evans, M. Gu // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(3). – P. 277-279. – DOI: 10.1364/OL.32.000277.
12. **Noto, M.** Detection of protein orientation on the silica microsphere surface using transverse electric/transverse magnetic whispering gallery modes / M. Noto, D. Keng, I. Teraoka, S. Arnold // *Biophysical Journal*. – 2007. – Vol. 92(12). – P. 4466-4472. – DOI: 10.1529/biophysj.106.103200.
13. **Ghadyani, Z.** Concentric ring metal grating for generating radially polarized light / Z. Ghadyani, I. Vartiainen, I. Harder, W. Iff, A. Berger, N. Lindlein, M. Kuittinen // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50(16). – P. 2451-2457. – DOI: 10.1364/AO.50.002451.
14. **Lin, J.** Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams / J. Lin, P. Genevet, M.A. Kats, N. Antoniou, F. Capasso // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13(9). – P. 4269-4274. – DOI: 10.1021/nl402039y.
15. **Genevet, P.** Holographic optical metasurfaces: a review of current progress / P. Genevet, F. Capasso // *Reports on Progress in Physics*. – 2015. – Vol. 78(2). – P. 24401. – DOI: 10.1088/0034-4885/78/2/024401.
16. **Päivänranta, B.** Low-cost fabrication of form-birefringent quarter-wave plates / B. Päivänranta, N. Passilly, J. Pietarinen, P. Laakkonen, M. Kuittinen, J. Tervo // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(21). – P. 16334-16342. – DOI: 10.1364/OE.16.016334.
17. **Lin, M.-Y.** Design and fabrication of birefringent nano-grating structure for circularly polarized light emission / M.-Y. Lin, T.-H. Tsai, Y. L. Kang, Y.-C. Chen, Y.-H. Huang, Y.-J. Chen, X. Fang, H. Y. Lin, W.-K. Choi, L.A. Wang, C.-C. Wu, S.-C. Lee // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(7). – P. 7388-7398. – DOI: 10.1364/OE.22.007388.
18. **Lin, M.Y.** Design and fabrication of nano-structure for three-dimensional display application / M.Y. Lin, T.H. Tsai, L.J. Hsiao, W.C. Tu, S.H. Wu, L.A. Wang, S.C. Lee, H.Y. Lin // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2016. – Vol. 28(8). – P. 884-886. – DOI: 10.1109/LPT.2016.2516338.
19. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29(15). – P. 1718-1720. – DOI: 10.1364/OL.29.001718.

20. **Lerman, G.M.** Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm / G.M. Lerman, U. Levy // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33(23). – P. 2782-2784. – DOI: 10.1364/OL.33.002782.
21. **Lerman, G.M.** Radial polarization interferometer / G.M. Lerman, U. Levy // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(25). – P. 23234-23246. – DOI: 10.1364/OE.17.023234.
22. **Kämpfe, T.** Depth-minimized, large period half-wave corrugation for linear to radial and azimuthal polarization transformation by grating-mode phase management / T. Kämpfe, O. Parriaux // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – Vol. 28(11). – P. 2235-2242. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002235.
23. **Kämpfe, T.** Segmented subwavelength silicon gratings manufactured by high productivity microelectronic technologies for linear to radial/azimuthal polarization conversion / T. Kämpfe, P. Sixt, D. Renaud, A. Lagrange, F. Perrin, O. Parriaux // *Optical Engineering*. – 2014. – Vol. 53(10). – 107105. – DOI: 10.1117/1.OE.53.10.107105.
24. **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 // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24(26). – P. 29800-29813. – DOI: 10.1364/OE.24.029800.
25. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный пропускающий азимутальный 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.
26. **Debnath, K.** Cascaded modulator architecture for WDM applications / K. Debnath, L. O'Faolain, F.Y. Gardes, A.G. Steffan, G.T. Reed, T.F. Krauss // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(25). – P. 27420-27428. – DOI: 10.1364/OE.20.027420.
27. **Stafeev, S.S.** Tight focus of light using micropolarizer and microlens / S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54(14). – P. 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
28. **Paul, T.** Half-wave phase retarder working in transmission around 630nm realized by atomic layer deposition of sub-wavelength gratings / T. Paul, A. Matthes, T. Harzendorf, S. Ratzsch, U.D. Zeitner // *Optical Material Express*. – 2015. – Vol. 5(1). – P. 124-129. – DOI: 10.1364/OME.5.000124.
29. **Kämpfe, T.** Hydrogenated amorphous silicon microstructuring for 0th-order polarization elements at 1.0-1.1  $\mu\text{m}$  wavelength / T. Kämpfe, S. Tonchev, G. Gomard, C. Seassal, O. Parriaux // *IEEE Photonics Journal*. – 2011. – Vol. 3(6). – P.1142-1148. – DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2175444.
30. **Ventola, K.** High phase retardation by waveguiding in slanted photonic nanostructures / K. Ventola, J. Tervo, P. Laakkonen, M. Kuittinen // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(1). – P. 241-246. – DOI: 10.1364/OE.19.000241.
31. **Yamada, I.** Design and fabrication of an achromatic infrared wave plate with Sb–Ge–Sn–S system chalcogenide glass / I. Yamada, N. Yamashita, T. Einishi, M. Saito, K. Fukumi, J. Nishii // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(7). – P. 1377-1382. – DOI: 10.1364/AO.52.001377.
32. **Yamada, I.** Fabrication of a mid-IR wire-grid polarizer by direct imprinting on chalcogenide glass / I. Yamada, N. Yamashita, K. Tani, T. Einishi, M. Saito, K. Fukumi, J. Nishii // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(19). – P. 3882-3884. – DOI: 10.1364/OL.36.003882.
33. **Mori, T.** Periodic sub-wavelength structures with large phase retardation fabricated by glass nanoimprint / T. Mori, N. Yamashita, H. Kasa, K. Fukumi, K. Kintaka, J. Nishii // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. – 2009. – Vol. 117(1370). – P. 1134-1137. – DOI: 10.2109/jcersj2.117.1134.
34. **Zhao, H.** Quarter wave retarder design with subwavelength gratings based on modal method / H. Zhao, D. Yuan // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. – 2016. – Vol. 127(1). – P. 212-214. – DOI: 10.1016/j.jleo.2015.10.045.
35. **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.
36. **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 // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55(19). – P. 5025-5032. – DOI: 10.1364/AO.55.005025.
37. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный отражающий азимутальный микрополяризатор / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, М.В. Котляр, Л. О'Фаолейн // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 709-715. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.
38. **Yamada, I.** Fabrication and evaluation of reflective wave plate with subwavelength grating structure / I. Yamada // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9888. – 98880P. – DOI: 10.1117/12.2214800.
39. **Yamada, I.** Reflective waveplate with subwavelength grating structure / I. Yamada, T. Ishihara, J. Yanagisawa // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 54(9). – 092203. – DOI: 10.7567/JJAP.54.092203.
40. **Saha, S.C.** Imprinted terahertz artificial dielectric quarter wave plates / S.C. Saha, Y. Ma, J.P. Grant, A. Khalid, D.R.S. Cumming // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12168-12175. – DOI: 10.1364/OE.18.012168.
41. **Saha, S.C.** Imprinted quarter wave plate at terahertz frequency / S.C. Saha, Y. Ma, J.P. Grant, A. Khalid, D.R.S. Cumming // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2010. – Vol. 28(6) – P. C6M83-C6M87. – DOI: 10.1116/1.3497023.
42. **Saha, S.C.** Low-loss terahertz artificial dielectric birefringent quarter-wave plates / S.C. Saha, M. Yong, J.P. Grant, A. Khalid, D.R.S. Cumming // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2010. – Vol. 22(2). – P. 79-81. – DOI: 10.1109/LPT.2009.2036242.
43. **Zhang, B.** Thin-form birefringence quarter-wave plate for lower terahertz range based on silicon grating / B. Zhang, Y. Gong, H. Dong // *Optical Engineering*. – 2013. – Vol. 52(3). – 030502. – DOI: 10.1117/1.OE.52.3.030502.
44. **Gong, Y.** Terahertz waveplate made with transparency / Y. Gong, H. Dong // *Proceedings of 37<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2012. – P. 1-2. – DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380469.
45. **Gong, Y.** Investigation on Terahertz waveplate at upper Terahertz band / Y. Gong, Z. Chen, M. Hong // *2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – P. 1-2. – DOI: 10.1109/irmmw-THz.2011.6104986.
46. **Zhang, B.** Achromatic terahertz quarter waveplate based on silicon grating / B. Zhang, Y. Gong // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(10). – P. 14897-14902. – DOI: 10.1364/OE.23.014897.
47. **Sun, L.** Achromatic terahertz quarter-wave retarder in reflection mode / L. Sun, Z. Lü, D. Zhang, Z. Zhao, J. Yuan // *Applied Physics B*. – 2012. – Vol. 106(2). – P. 393-398. – DOI: 10.1007/s00340-011-4723-9.
48. **Yakunin, V.P.** Generation of high power radially polarized beam / V.P. Yakunin, A.V. Nesterov, V.G. Niziev // *Proceedings of SPIE*. – 2000. – Vol. 3889. – P. 718-724. – DOI: 10.1117/12.380954.
49. **Zhang, Z.** Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry / Z. Zhang, F. Dong, T. Cheng, K. Qiu, Q. Zhang, W. Chu, X. Wu // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Vol. 85(10). – 105002. – DOI: 10.1063/1.4897270.
50. **Yu, N.** Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nature Materials*. – 2014. – Vol. 13(2). – P. 139-150. – DOI: 10.1038/nmat3839.

51. **Kildishev, A.V.** Planar photonics with metasurfaces / A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev // *Science*. – 2013. – Vol. 339(6125). – P. 1232009. – DOI: 10.1126/science.1232009.
52. **Yao, K.** Plasmonic metamaterials / K. Yao, Y. Liu // *Nanotechnology Reviews*. – 2014. – Vol. 3(2). – P. 177-210. – DOI: 10.1515/ntrev-2012-0071.
53. **Li, Z.** Graphene plasmonic metasurfaces to steer infrared light / Z. Li, K. Yao, F. Xia, S. Shen, J. Tian, Y. Liu // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5(1). – P. 12423. – DOI: 10.1038/srep12423.
54. **Lu, F.** Infrared wavefront control based on graphene metasurfaces / F. Lu, B. Liu, S. Shen // *Advanced Optical Materials*. – 2014. – Vol. 2(8). – P. 794-799. – DOI: 10.1002/adom.20140010.
55. **Bao, Q.** Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices / Q. Bao, K.P. Loh // *ACS Nano*. – 2012. – Vol. 6(5). – P. 3677-3694. – DOI: 10.1021/nm300989g.
56. **Gomez-Diaz, J.S.** Hyperbolic metasurfaces: surface plasmons, light-matter interactions, and physical implementation using graphene strips / J.S. Gomez-Diaz, M. Tymchenko, A. Alù // *Optical Materials Express*. – 2015. – Vol. 5(10). – P. 2313-2329. – DOI: 10.1364/OME.5.002313.
57. **Ju, L.** Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials / L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, M. Martin, Z. Hao, H.A. Bechtel, X. Liang, A. Zettl, Y.R. Shen, F. Wang // *Nature Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 6(10). – P. 630-634. – DOI: 10.1038/nnano.2011.146.
58. **Hwang, E.H.** Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene / E.H. Hwang, S. Das Sarma // *Physical Review B*. – 2007. – Vol. 75(20). – P. 1-6. – DOI: 10.1103/PhysRevB.75.205418.
59. **Lee, S.H.** Gate-controlled active graphene metamaterials at terahertz frequencies / S.H. Lee, M. Choi, T.T. Kim, S. Lee, M. Liu, X. Yin, H.K. Choi, S.S. Lee, C.G. Choi, S.Y. Choi, X. Zhang, B. Min // *Proceedings of 17<sup>th</sup> Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, 2012. – 2012. – Vol. 11(11). – P. 582-583. – DOI: 10.1109/OECC.2012.6276582.
60. **Chen, J.** Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons / J. Chen, M. Badioli, P. Alonso-González, S. Thongrattanasiri, F. Huth, J. Osmond, M. Spasenović, A. Centeno, A. Pesquera, P. Godignon, A.Z. Elorza, N. Camara, F.J. García de Abajo, R. Hillenbrand, F.H.L. Koppens // *Nature*. – 2012. – Vol. 487(7405). – P. 77-81. – DOI: 10.1038/nature11254.
61. **Fei, Z.** Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging / Z. Fei, A.S. Rodin, G.O. Andreev, W. Bao, A.S. McLeod, M. Wagner, L.M. Zhang, Z. Zhao, M. Thiemens, G. Dominguez, M.M. Fogler, A.H.C. Neto, C.N. Lau, F. Keilmann, D.N. Basov // *Nature*. – 2012. – Vol. 487(7405). – P. 82-85. – DOI: 10.1038/nature11253.
62. **Yan, H.** Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks / H. Yan, X. Li, B. Chandra, G. Tulevski, Y. Wu, M. Freitag, W. Zhu, P. Avouris, F. Xia // *Nature Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 7(5). – P. 330-334. – DOI: 10.1038/nnano.2012.59.
63. **Huang, L.** Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity / L. Huang, X. Chen, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, T. Zentgraf, S. Zhang // *Light Science and Applications*. – 2013. – Vol. 2(3). – P. e70. – DOI: 10.1038/lsa.2013.26.
64. **Lin, J.** Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons / J. Lin, J.P.B. Mueller, Q. Wang, G. Yuan, N. Antoniou, X.-C. Yuan, F. Capasso // *Science*. – 2013. – Vol. 340(6130). – P. 331-334. – DOI: 10.1126/science.1233746.
65. **Chen, X.** Dual-polarity plasmonic metalens for visible light. / X. Chen, L. Huang, H. Mühlenbernd, G. Li, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, C.-W. Qiu, S. Zhang, T. Zentgraf // *Nat. Commun.* – 2012. – Vol. 3. – P. 1198.
66. **Sun, S.** Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves / S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou // *Nature Materials*. – 2012. – Vol. 11(5). – P. 426-431. – DOI: 10.1038/nmat3292.
67. **Pors, A.** Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces / A. Pors, M.G. Nielsen, R.L. Eriksen, S.I. Bozhevolnyi // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13(2). – P. 829-834. – DOI: 10.1021/nl304761m.
68. **Liu, Y.** Metasurfaces for manipulating surface plasmons / Y. Liu, X. Zhang // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 103(14). – P. 141101. – DOI: 10.1063/1.4821444.
69. **Qin, F.** Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light / F. Qin, L. Ding, L. Zhang, F. Monticone, C.C. Chum, J. Deng, S. Mei, Y. Li, J. Teng, M. Hong, S. Zhang, A. Alu, C.-W. Qiu, A. Alù, C.-W. Qiu // *Science Advances*. – 2016. – Vol. 2(1). – P. e1501168. – DOI: 10.1126/sciadv.1501168.
70. **Ni, X.** Broadband light bending with plasmonic nanoantennas / X. Ni, N.K. Emani, A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev // *Science*. – 2012. – Vol. 335(6067). – P. 427. – DOI: 10.1126/science.1214686.
71. **Ni, X.** Metasurface holograms for visible light / X. Ni, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4. – P. 2807. – DOI: 10.1038/ncomms3807.
72. **Huang, L.** Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface / L. Huang, X. Chen, H. Mühlenbernd, H. Zhang, S. Chen, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, K.-W. Cheah, C.-W. Qiu, J. Li, T. Zentgraf, S. Zhang // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4. – P. 2808. – DOI: 10.1038/ncomms3808.
73. **Yin, X.** Photonic spin hall effect at metasurfaces / X. Yin, Z. Ye, J. Rho, Y. Wang, X. Zhang // *Science*. – 2013. – Vol. 339(6126). – P. 1405-1407. – DOI: 10.1126/science.1231758.
74. **Lee, J.** Ultrafast electrically tunable polaritonic metasurfaces / J. Lee, S. Jung, P.Y. Chen, F. Lu, F. Demmerle, G. Boehm, M.C. Amann, A. Alu, M.A. Belkin // *Advanced Optical Materials*. – 2014. – Vol. 2(11). – P. 1057-1063. – DOI: 10.1002/adom.201400185.
75. **Kivshar, Y.S.** Metamaterials, metasurfaces, and metadevices / Y.S. Kivshar // *Australian Physics*. – 2015. – Vol. 52(2). – P. 47-50.
76. **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 Letters*. – 2014. – Vol. 14(3). – P. 1394-1399. – DOI: 10.1021/nl4044482.
77. **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, D.P. Tsai // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12(12). – P. 6223-6229. – DOI: 10.1021/nl3032668.
78. **Lan, L.** Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens / L. Lan, W. Jiang, Y. Ma // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 102(23). – P. 231119. – DOI: 10.1063/1.4810004.
79. **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.
80. **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.

81. **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 Communication*. – 2015. – Vol. 6. – 7069. – DOI: 10.1038/ncomms8069.
82. **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 // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10(11). – P. 937-943. – DOI: 10.1038/nnano.2015.186.
83. **Ni, X.** Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic meta-lenses / X. Ni, S. Ishii, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev // *Light Science and Application*. – 2013. – Vol. 2(4). – e72. – DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
84. **West, P.R.** All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens / P.R. West, J.L. Stewart, A.V. Kildishev, V.M. Shalaev, V.V. Shkunov, F. Strohendl, Y.A. Zakharenkov, R.K. Dodds, R. Byren // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(21). – P. 26212-26221. – DOI: 10.1364/OE.22.026212.
85. **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.
86. **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.
87. **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(3). – P. 330-339. – DOI: 10.1364/AO.52.000330.
88. **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(13). – P. 1050-1059. – DOI: 10.1080/09500340.2013.831136.

### Сведения об авторах

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ 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 100 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**О'Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин)** из Ирландии. В 2000 году окончил физический факультет Университета города Корк. С 2001 года начал работать в группе микрофотоники Школы физики и астрономии Университета города Сэнт-Эндрюс (Шотландия) как аспирант по созданию полупроводниковых лазеров. В 2005 году защитил диссертацию и получил степень доктора философии. Область научных интересов: электронная литография для создания фотонных кристаллов. В настоящее время он является координатором европейской платформы по наноструктурированию ePIXnet. Соавтор 53 научных статей с высоким индексом цитирования. E-mail: [jwwl@st-andrews.ac.uk](mailto:jwwl@st-andrews.ac.uk).

**Котляр Мария Викторовна**, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского университета (СГАУ). В 2001 году окончила физический факультет Самарского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сэнт-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 5 мая 2017 г. Окончательный вариант – 21 мая 2017 г.

## BINARY DIFFRACTION GRATINGS FOR CONTROLLING POLARIZATION AND PHASE OF LASER LIGHT [REVIEW]

S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>, A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, L. O'Faolain<sup>3,4</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,

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

<sup>4</sup> Centre for Advanced Photonics and Process Analysis, Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

### Abstract

Components of thin microoptics with nanostructured surface for polarization and phase control are investigated. These components include transmitting or reflecting subwavelength diffraction gratings that have space-variant direction and filling factor, but near-uniform period and depth of the relief, whose features can vary in size from dozens to hundreds of nanometers for the visible wavelength

range. The sectoral diffractive polarizers with a small number of sectors, which transform linear polarization into radial or azimuthal polarization, and subwavelength binary microlenses for tight focusing of laser light are investigated in detail. Examples of specific micropolarizers and metalenses manufactured in amorphous silicon films are given.

**Keywords:** subwavelength grating, metasurface, Pancharatnam–Berry phase, radially polarized light, azimuthally polarized light, tight focusing, metalens.

**Citation:** Stafeev SS, Nalimov AG, O’Faolain L, Kotlyar MV. Binary diffraction gratings for controlling polarization and phase of laser light [review]. *Computer Optics* 2017; 41(3): 299-314. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-299-314.

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

### References

- [1] Soifer VA. *Diffractive Nanophotonics*. Boca Raton, USA: CRC Press; 2014. ISBN: 978-1-466-59069-4.
- [2] Lalanne P, Lemercier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures. *J Mod Opt* 1996; 43(10): 2063-2086. DOI: 10.1080/09500349608232871.
- [3] Kotlyar VV, Zalyalov OK. Design of diffractive optical elements modulating polarization. *Optik* 1996; 103(3): 125-130.
- [4] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27(5): 285-287. DOI: 10.1364/OL.27.000285.
- [5] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Opt Lett* 2001; 26(18): 1424-1426. DOI: 10.1364/OL.26.001424.
- [6] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photonics* 2009; 1(1): 1-57. DOI: 10.1364/AOP.1.000001.
- [7] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam. *Phys Rev Lett* 2003; 91(23):233901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.233901.
- [8] Salamin YI, Harman Z, Keitel CH. Direct High-Power Laser Acceleration of Ions for Medical Applications. *Phys Rev Lett* 2008; 100(15): 155004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.155004.
- [9] Hao X, Kuang C, Wang T, Liu X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam. *Opt Lett* 2010; 35(23):3928-3930. DOI: 10.1364/OL.35.003928.
- [10] de Boer JF, Milner TE. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination. *J Biomed Opt* 2002; 7(3): 359-371. DOI: 10.1117/1.1483879.
- [11] Li X, Chon JWM, Wu S, Evans RA, Gu M. Rewritable polarization-encoded multilayer data storage in 2, 5-dimethyl-4-(p-nitrophenylazo) anisole doped polymer. *Opt Lett* 2007; 32(3): 277-279. DOI: 10.1364/OL.32.000277.
- [12] Noto M, Keng D, Teraoka I, Arnold S. Detection of protein orientation on the silica microsphere surface using transverse electric/transverse magnetic whispering gallery modes. *Biophys J* 2007; 92(12):4466–72.
- [13] Ghadyani Z, Vartiainen I, Harder I, Iff W, Berger A, Lindlein N, et al. Concentric ring metal grating for generating radially polarized light. *Appl Opt* 2011; 50(16): 2451-2457. DOI: 10.1364/AO.50.002451.
- [14] Lin J, Genevet P, Kats MA, Antoniou N, Capasso F. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams. *Nano Lett* 2013; 13(9): 4269-4274. DOI: 10.1021/nl402039y
- [15] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. *Rep Prog Phys* 2015; 78(2): 24401. DOI: 10.1088/0034-4885/78/2/024401.
- [16] Päivänranta B, Passilly N, Pietarinen J, Laakkonen P, Kuitinen M, Tervo J. Low-cost fabrication of form-birefringent quarter-wave plates. *Opt Express* 2008; 16(21): 16334-16342. – DOI: 10.1364/OE.16.016334.
- [17] Lin M-Y, Tsai T-H, Kang YL, Chen Y-C, Huang Y-H, Chen Y-J, et al. Design and fabrication of birefringent nano-grating structure for circularly polarized light emission. *Opt Express* 2014; 22(7): 7388-7398. DOI: 10.1364/OE.22.007388.
- [18] Lin MY, Tsai TH, Hsiao LJ, Tu WC, Wu SH, Wang LA, et al. Design and Fabrication of Nano-Structure for Three-Dimensional Display Application. *IEEE Photonics Technol Lett* 2016; 28(8): 884-886. DOI: 10.1109/LPT.2016.2516338.
- [19] Levy U, Tsai C-H, Pang L, Fainman Y. Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control. *Opt Lett* 2004; 29(15): 1718-1720. DOI: 10.1364/OL.29.001718.
- [20] Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Opt Lett* 2008; 33(23): 2782-2784. DOI: 10.1364/OL.33.002782.
- [21] Lerman GM, Levy U. Radial polarization interferometer. *Opt Express* 2009; 17(25): 23234-23246. DOI: 10.1364/OE.17.023234.
- [22] Kämpfe T, Parriaux O. Depth-minimized, large period half-wave corrugation for linear to radial and azimuthal polarization transformation by grating-mode phase management. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(11): 2235-2242. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002235.
- [23] Kämpfe T, Sixt P, Renaud D, Lagrange A, Perrin F, Parriaux O. Segmented subwavelength silicon gratings manufactured by high productivity microelectronic technologies for linear to radial/azimuthal polarization conversion. *Opt Eng* 2014; 53(10): 107105. DOI: 10.1117/1.OE.53.10.107105.
- [24] Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar M V., Gibson D, Song S, O’Faolain L, et al. Microlens-aided focusing of linearly and azimuthally polarized laser light. *Opt Express* 2016; 24(26): 29800-29813. DOI: 10.1364/OE.24.029800.
- [25] 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.
- [26] Debnath K, O’Faolain L, Gardes FY, Steffan AG, Reed GT, Krauss TF. Cascaded modulator architecture for WDM applications. *Opt Express* 2012; 20(25): 27420-27428. DOI: 10.1364/OE.20.027420.
- [27] Stafeev SS, O’Faolain L, Kotlyar V V., Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Appl Opt* 2015; 54(14): 4388-4394. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [28] Paul T, Matthes A, Harzendorf T, Ratzsch S, Zeitner UD. Half-wave phase retarder working in transmission around 630nm realized by atomic layer deposition of subwavelength gratings. *Opt Mater Express* 2015; 5(1): 124-129. DOI: 10.1364/OME.5.000124.
- [29] Kämpfe T, Tonchev S, Gomard G, Seassal C, Parriaux O. Hydrogenated amorphous silicon microstructuring for 0th-order polarization elements at 1.0-1.1 μm wavelength. *IEEE Photonics J* 2011; 3(6): 1142-1148. DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2175444.
- [30] Ventola K, Tervo J, Laakkonen P, Kuitinen M. High phase retardation by waveguiding in slanted photonic

- nanostructures. *Opt Express* 2011; 19(1): 241-246. DOI: 10.1364/OE.19.000241.
- [31] Yamada I, Yamashita N, Einishi T, Saito M, Fukumi K, Nishii J. Design and fabrication of an achromatic infrared wave plate with Sb–Ge–Sn–S system chalcogenide glass. *Appl Opt* 2013; 52(7): 1377-1382. DOI: 10.1364/AO.52.001377.
- [32] Yamada I, Yamashita N, Tani K, Einishi T, Saito M, Fukumi K, et al. Fabrication of a mid-IR wire-grid polarizer by direct imprinting on chalcogenide glass. *Opt Lett* 2011; 36(19): 3882-3884. DOI: 10.1364/OL.36.003882.
- [33] Mori T, Yamashita N, Kasa H, Fukumi K, Kintaka K, Nishii J. Periodic sub-wavelength structures with large phase retardation fabricated by glass nanoimprint. *J Ceram Soc Japan* 2009; 117(1370): 1134-1137. DOI: 10.2109/jcersj.2.117.1134.
- [34] Zhao H, Yuan D. Quarter wave retarder design with sub-wavelength gratings based on modal method. *Optik* 2016; 127(1): 212-214. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.10.045.
- [35] 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.
- [36] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kotlyar MV, Nalimov AG, O'Faolain L. Subwavelength micropolarizer in a gold film for visible light. *Appl Opt* 2016; 55(19): 5025-5032. DOI: 10.1364/AO.55.005025.
- [37] Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. A four-zone reflective azimuthal micropolarizer. *Computer Optics* 2015; 39(5): 709-715. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.
- [38] Yamada I. Fabrication and evaluation of reflective wave plate with subwavelength grating structure. *Proceedings of SPIE* 2016; 9888: 98880P. DOI: 10.1117/12.2214800.
- [39] Yamada I, Ishihara T, Yanagisawa J. Reflective waveplate with subwavelength grating structure. *Jpn J Appl Phys* 2015; 54(9): 092203. DOI: 10.7567/JJAP.54.092203.
- [40] Saha SC, Ma Y, Grant JP, Khalid A, Cumming DRS. Imprinted terahertz artificial dielectric quarter wave plates. *Opt Express* 2010; 18(12): 12168-12175. DOI: 10.1364/OE.18.012168.
- [41] Saha SC, Ma Y, Grant JP, Khalid A, Cumming DRS. Imprinted quarter wave plate at terahertz frequency. *J Vac Sci Technol B* 2010; 28(6):C6M83-C6M87. DOI: 10.1116/1.3497023.
- [42] Saha SC, Yong M, Grant JP, Khalid A, Cumming DRS. Low-loss terahertz artificial dielectric birefringent quarter-wave plates. *IEEE Photonics Technol Lett* 2010; 22(2): 79-81. DOI: 10.1109/LPT.2009.2036242.
- [43] Zhang B, Gong Y, Dong H. Thin-form birefringence quarter-wave plate for lower terahertz range based on silicon grating. *Opt Eng* 2013; 52(3): 030502. DOI: 10.1117/1.OE.52.3.030502.
- [44] Gong Y, Dong H. Terahertz waveplate made with transparency. *37th Int Conf Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* 2012; 1-2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380469.
- [45] Gong Y, Chen Z, Hong M. Investigation on Terahertz waveplate at upper Terahertz band. In: *2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2011; 1-2. DOI: 10.1109/irmmw-THz.2011.6104986.
- [46] Zhang B, Gong Y. Achromatic terahertz quarter waveplate based on silicon grating. *Opt Express* 2015; 23(10): 14897-14902. DOI: 10.1364/OE.23.014897.
- [47] Sun L, Lü Z, Zhang D, Zhao Z, Yuan J. Achromatic terahertz quarter-wave retarder in reflection mode. *Appl Phys B* 2012; 106(2): 393-398. DOI: 10.1007/s00340-011-4723-9.
- [48] Yakunin VP, Nesterov A V, Niziev VG. Generation of high power radially polarized beam. *Proc SPIE* 2000; 3889: 718-724. DOI: 10.1117/12.380954.
- [49] Zhang Z, Dong F, Cheng T, Qiu K, Zhang Q, Chu W, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry. *Rev Sci Instrum* 2014; 85(10): 105002. DOI: 10.1063/1.4897270.
- [50] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014; 13(2): 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- [51] Kildishev AV, Boltasseva A, Shalaev VM. Planar Photonics with Metasurfaces. *Science* 2013; 339(6125): 1232009. DOI: 10.1126/science.1232009.
- [52] Yao K, Liu Y. Plasmonic metamaterials. *Nanotechnol Rev* 2014; 3(2): 177-210. DOI: 10.1515/ntrev-2012-0071.
- [53] Li Z, Yao K, Xia F, Shen S, Tian J, Liu Y. Graphene Plasmonic metasurfaces to steer infrared light. *Sci Rep* 2015; 5(1): 12423. DOI: 10.1038/srep12423.
- [54] Lu F, Liu B, Shen S. Infrared wavefront control based on graphene metasurfaces. *Adv Opt Mater* 2014; 2(8): 794-799. DOI: 10.1002/adom.20140010.
- [55] Bao Q, Loh KP. Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices. *ACS Nano* 2012; 6(5): 3677-3694. DOI: 10.1021/nn300989g.
- [56] Gomez-Diaz JS, Tymchenko M, Alù A. Hyperbolic metasurfaces: surface plasmons, light-matter interactions, and physical implementation using graphene strips. *Opt Mater Express* 2015; 5(10): 2313-2329. DOI: 10.1364/OME.5.002313.
- [57] Ju L, Geng B, Horng J, Girit C, Martin M, Hao Z, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials. *Nat Nanotechnol* 2011; 6(10): 630-634. DOI: 10.1038/nnano.2011.146.
- [58] Hwang EH, Das Sarma S. Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene. *Phys Rev B* 2007; 75(20): 1-6. DOI: 10.1103/PhysRevB.75.205418.
- [59] Lee SH, Choi M, Kim TT, Lee S, Liu M, Yin X, et al. Gate-controlled active graphene metamaterials at terahertz frequencies. *OECC'2012* 2012; 11(11): 582-583. DOI: 10.1109/OECC.2012.6276582.
- [60] Chen J, Badioli M, Alonso-González P, Thongrattanasiri S, Huth F, Osmond J, et al. Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons. *Nature* 2012; 487(7405): 77-81. DOI: 10.1038/nature11254.
- [61] Fei Z, Rodin AS, Andreev GO, Bao W, et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature* 2012; 487(7405): 82-85. DOI: 10.1038/nature11253.
- [62] Yan H, Li X, Chandra B, et al. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks. *Nat Nanotechnol* 2012; 7(5): 330-334. DOI: 10.1038/nnano.2012.59.
- [63] Huang L, Chen X, Bai B, Tan Q, Jin G, Zentgraf T, et al. Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity. *Light Sci Appl* 2013; 2(3): e70. DOI: 10.1038/lsa.2013.26.
- [64] Lin J, Mueller JPB, Wang Q, Yuan G, Antoniou N, Yuan X-C, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons. *Science* 2013; 340(6130): 331-334. DOI: 10.1126/science.1233746.
- [65] Chen X, Huang L, Mühlener H, Li G, Bai B, Tan Q, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light. *Nat Commun* 2012; 3: 1198.
- [66] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nat Mater* 2012; 11(5): 426-431. DOI: 10.1038/nmat3292.
- [67] Pors A, Nielsen MG, Eriksen RL, Bozhevolnyi SI. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces. *Nano Lett* 2013; 13(2): 829-834. DOI: 10.1021/nl304761m.
- [68] Liu Y, Zhang X. Metasurfaces for manipulating surface plasmons. *Appl Phys Lett* 2013; 103(14): 141101. DOI: 10.1063/1.4821444.

- [69] Qin F, Ding L, Zhang L, Monticone F, Chum CC, Deng J, et al. Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light. *Sci Adv* 2016; 2(1): e1501168. DOI: 10.1126/sciadv.1501168.
- [70] Ni X, Emani NK, Kildishev AV., Boltasseva A, Shalaev VM. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas. *Science* 2012; 335(6067): 427. DOI: 10.1126/science.1214686.
- [71] Ni X, Kildishev AV, Shalaev VM. Metasurface holograms for visible light. *Nat Commun* 2013; 4: 2807. DOI: 10.1038/ncomms3807.
- [72] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, Zhang H, Chen S, Bai B, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface. *Nat Commun* 2013; 4:2808. DOI: 10.1038/ncomms3808.
- [73] Yin X, Ye Z, Rho J, Wang Y, Zhang X. Photonic spin hall effect at metasurfaces. *Science*. 2013; 339(6126): 1405–1407. DOI: 10.1126/science.1231758.
- [74] Lee J, Jung S, Chen PY, Lu F, Demmerle F, Boehm G, et al. Ultrafast electrically tunable polaritonic metasurfaces. *Adv Opt Mater* 2014; 2(11): 1057-1063. DOI: 10.1002/adom.201400185.
- [75] Kivshar YS. Metamaterials, metasurfaces, and metadevices. *Aust Phys* 2015; 52(2): 47-50.
- [76] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko II, Briggs DP, Valentine J. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation. *Nano Lett* 2014; 14(3): 1394-1399. DOI: 10.1021/nl4044482.
- [77] Sun S, Yang K, Wang C, Juan T, Chen WT, Liao CY, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces. *Nano Lett* 2012; 12(12): 6223-6229. DOI: 10.1021/nl3032668.
- [78] Lan L, Jiang W, Ma Y. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens. *Appl Phys Lett* 2013; 102(23): 231119. DOI: 10.1063/1.4810004.
- [79] Verslegers L, Catrysse PB, Yu Z, White JS, Barnard ES, Brongersma ML, et al. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film. *Nano Lett* 2009; 9(1): 235-238. DOI: 10.1021/nl802830y.
- [80] Aieta F, Genevet P, Kats MA, Yu N, Blanchard R, Gaburro Z, et al. 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.
- [81] Arbabi A, Horie Y, Ball AJ, Bagheri M, Faraon A. Sub-wavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nat Commun* 2015; 6: 7069. DOI: 10.1038/ncomms8069.
- [82] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotechnol* 2015; 10(11): 937-943. DOI: 10.1038/nnano.2015.186.
- [83] Ni X, Ishii S, Kildishev AV, Shalaev VM. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light Sci Appl* 2013; 2(4): e72. DOI: 10.1038/lsa.2013.28.
- [84] West PR, Stewart JL, Kildishev AV, Shalaev VM, Shkunov V V, Strohkendl F, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Opt Express* 2014; 22(21): 26212-26221. DOI: 10.1364/OE.22.026212.
- [85] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma ML. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science* 2014; 345(6194): 298-302. DOI: 10.1126/science.1253213.
- [86] 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.
- [87] Kotlyar V V, 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.
- [88] 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.

#### Authors' information

**Sergey Sergeevich Stafeev** (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD-method, near-field optics. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 "Mathematical modeling and program complexes", finished it in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 100 papers and 3 inventions. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Liam O'Faolain (William Whelan-Curtin)** is from the Republic of Ireland and studied for a degree in Physics at University College Cork. He joined the Microphotonics Research Group of School of Physics and Astronomy of SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews (Scotland) in October 2001 to begin a PhD on Modelocked Semiconductor Lasers. He received the PhD degree in Physics in 2005. His other interests are electron beam lithography for photonic crystals. He also keeps records of the groups Fabrication Processes. He is now working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index. E-mail: [jww1@st-andrews.ac.uk](mailto:jww1@st-andrews.ac.uk).

**Maria V. Kotlyar**, born in 1979, Ph.D., a researcher at the Research laboratory 35 at Samara University. In 2001 she graduated from Physic department of Samara State University, in 2005 defended her thesis at the University of St. Andrews (UK). Research interests: nanophotonics. In the *Scopus* she has 25 publications. E-mail: [ichteos@km.ru](mailto:ichteos@km.ru).

*Received May 5, 2017. The final version – May 21, 2017.*