

ЧЕТЫРЁХЗОННЫЙ ПРОПУСКАЮЩИЙ АЗИМУТАЛЬНЫЙ МИКРОПОЛЯРИЗАТОР С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

С.С. Стафеев^{1,2}, М.В. Котляр², Л. О'Фаолайн³, А.Г. Налимов^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

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

Аннотация

Изготовлен и исследуется бинарный субволновый четырёхзонный пропускающий элемент фотоники с метаповерхностью для одновременного управления поляризацией и фазой лазерного пучка. Элемент выполнен в плёнке кремния на стекле и преобразует в ближней зоне падающей линейно-поляризованный лазерный пучок в пучок, близкий к азимутально-поляризованному пучку, но со сдвигом фазы на π в диаметрально противоположных точках пучка. В дальней зоне преобразованный пучок формирует на оптической оси не минимум, как азимутально-поляризованный пучок, а максимум интенсивности.

Ключевые слова: пропускающий субволновый микрополяризатор, азимутальная поляризация, метаповерхность, сдвиг фазы.

Цитирование: Стафеев, С.С. Четырёхзонный пропускающий азимутальный микрополяризатор с фазовым сдвигом / С.С. Стафеев, М.В. Котляр, Л. О'Фаолайн, 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.

Введение

Создание компонентов микрооптики с метаповерхностью – новое направление в нанопотонике. Интерес к ним вызван возможностью одновременного управления поляризацией, амплитудой и фазой лазерного пучка. Метаповерхность [1] – это метаматериал нулевой толщины. На метаповерхности расположены периодические субволновые неоднородности в виде рельефа или включений из другого материала, которые увеличивают взаимодействие между светом и поверхностью. В [1] подробно описывается теория таких метаповерхностей и даны расчётные и экспериментальные примеры: четвертьволновая пластинка для видимого и ближнего ИК-диапазона [2], плоская трёхслойная линза [3], плоская линза и плоский аксикон на основе V-антенн [4].

Разные типы микрополяризаторов с метаповерхностью описаны в [5–7]. Микрополяризатор с метаповерхностью, представляющий собой тонкую металлическую плёнку с нанотверстиями и поворачивающий линейную поляризацию света с длиной волны 1340 нм на 90 градусов, описан в [5]. В [6] описан другой тип преобразователя поляризации для длины волны 4,3 мкм на основе субволновых Y-образных нанотенн из алюминия. Отражающие субволновые микрополяризаторы для видимого диапазона в плёнке алюминия исследуются в [7].

Первые субволновые бинарные микрополяризаторы были изготовлены для инфракрасного диапазона [8, 9], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок. Получение радиально-поляризованного светового пучка для субволновой решётки, работающей для длины волны 1064 нм, рассмотрено в работе [10]. Описание технологии получения преобразователя поляризации для длин волн в диапазоне от 1030 нм до 1060 нм, изготовленного из кремния, приведено в статье [11]. Известны также

микрополяризаторы на пропускание для видимого диапазона [12]. В [12] изготовленная из алюминия субволновая кольцевая решётка преобразовывала круговую поляризацию в радиальную в видимом диапазоне длин волн (для длины волны 633 нм). Для видимого диапазона известны также отражающие микрополяризаторы с метаповерхностью в плёнке золота для преобразования линейной поляризации в радиальную [13–15] и азимутальную [16].

Азимутальная поляризация предпочтительнее для острой фокусировки света, чем радиальная, по нескольким причинам. Во-первых, при прочих равных условиях и при большой числовой апертуре фокусное пятно для света с азимутальной поляризацией меньше, чем для радиальной. Например, влияние спиральной пластинки, внесённой в азимутально-поляризованный лазерный пучок с целью уменьшения фокусного пятна, изучалось в [17]. Было показано, что такой пучок формирует на 13,5% меньшее фокусное пятно ($0,147\lambda^2$) по сравнению с аналогичным фокусом от радиально-поляризованного пучка ($0,17\lambda^2$). Во-вторых, субволновое фокусное пятно света с радиальной поляризацией состоит в основном из продольной поляризации (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 поляризации, которая доступна наблюдателю на оптической оси. По этим причинам поперечно поляризованные фокусные пятна широко используются в таких областях, как оптическая когерентная томография [18], оптические системы хранения данных [19] и детектирование отдельных молекул [20]. Недостатком фокусировки света с азимутальной поляризацией является необходимость использования дополнительного элемента – спиральной фазовой пластинки [17]. Но с помощью метаповерхности можно в одном элементе управлять и поляризацией, и фазой светового поля.

В данной работе впервые изготовлен и исследован для видимого диапазона бинарный субволновый пропускающий элемент с метаповерхностью, который линейную поляризацию переводит в неоднородную поляризацию, близкую к азимутальной поляризации, но у которой диаметрально противоположные точки пучка имеют сдвиг фазы на π (аналогично действию спиральной фазовой пластинки).

Численное моделирование работы поляризатора

Рассчитанный микрополяризатор с полуволновым сдвигом для преобразования линейной поляризации в азимутальную содержит четыре зоны с углами наклона линий субволновых решёток -60° , 60° , -60° , 60° (рис. 1). Период решёток – 230 нм, ширина ступеньки – 138 нм, ширина канавки – 92 нм. Материал решётки – кремний (Si), высота рельефа решётки – 130 нм. Решётка рассчитана на длину волны 633 нм, комплексный показатель преломления кремния при расчёте выбирался равным $n = 3,87 - 0,016i$. Энергия света, прошедшего через микрополяризатор, составляет 15 % от энергии падающего на поляризатор света. Невысокая эффективность связана с поглощением света в кремнии, но при этом высокий показатель преломления позволил в 2,6 раза уменьшить высоту рельефа, что существенно при ширине канавки меньше 100 нм. Размер изготовленного поляризатора (рис. 1) – 100×100 мкм.

Параметры изготовленного микрополяризатора (рис. 1) несколько отличались от рассчитанного: период – 244 нм, ширина ступеньки – 148 нм, а ширина канавки – 96 нм. Хотя это отличие укладывается в 6 %.

Моделирование работы идеального (без учёта технологических погрешностей) поляризатора (рис. 1) проводилось следующим образом: сначала методом FDTD, реализованным в программе FullWAVE, рассчитывалось поле, прошедшее через элемент. Считалось, что на микрорельеф элемента из подложки нормально к поверхности падает линейно-поляризованная плоская волна с длиной $\lambda = 633$ нм. Величина шага сетки метода FDTD была равна $\lambda/30$. Показатель преломления материала ступенек и основания $n = 3,87 - 0,016i$ (кремний). Высота рельефа считалась равной 130 нм. Показатель преломления основания равен $n = 1,5$. Вычисление распределения поля на значительном расстоянии от элемента осуществлялось с помощью интеграла Рэлея–Зоммерфельда, в котором распределение поля на расстоянии 100 нм от поверхности, рассчитанное методом FDTD, использовалось как начальное поле. На рис. 2–4 показано распределение интенсивности (негатив), рассчитанное на расстоянии 5,1 мкм (рис. 2), 100 мкм (рис. 3) и 300 мкм (рис. 4) от элемента.

Для сравнения с экспериментом распределения интенсивности приведены в предположении, что исследуемый пучок прошёл поляризатор (анализатор).

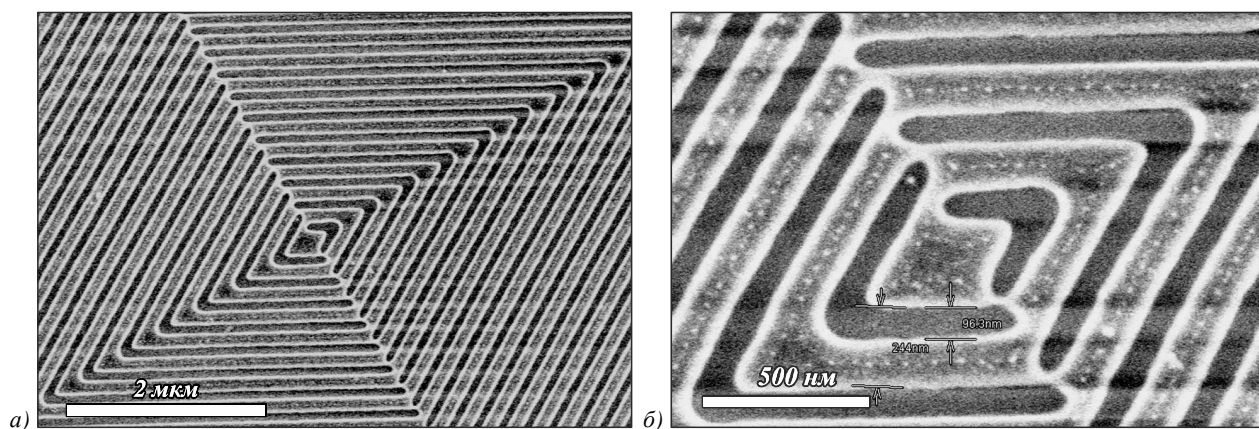


Рис. 1. Изображение части изготовленного микрополяризатора с полуволновым сдвигом, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (а), и её увеличенная центральная часть (б)

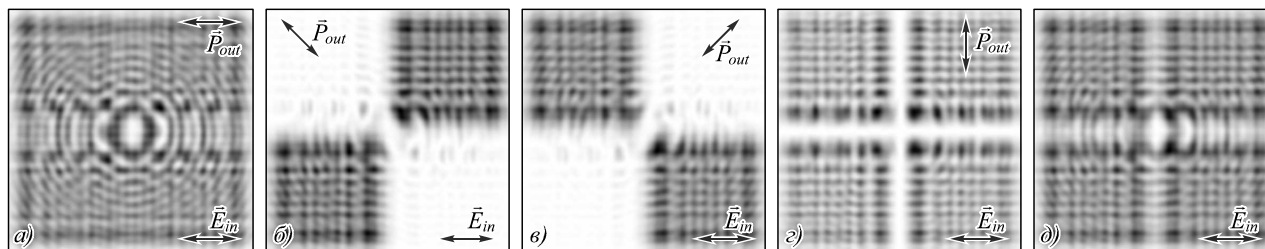


Рис. 2. Распределение интенсивности (негатив) в пучке, прошедшем через 4-секторный поляризатор на расстоянии 5,1 мкм от поверхности поляризатора. Анализатор повернут на угол 0° (а), 45° (б), -45° (в) и 90° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения и отсутствует (д). Размер изображения – 20×20 мкм

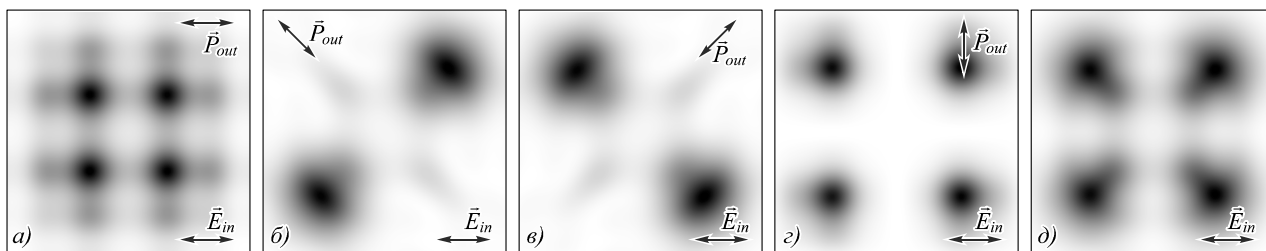


Рис. 3. Распределение интенсивности (негатив) в пучке, прошедшем через поляризатор на расстоянии 100 мкм от поверхности поляризатора. Анализатор повернут на угол 0° (а), 45° (б), -45° (в) и 90° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения и отсутствует (д). Размер изображения – 20 × 20 мкм

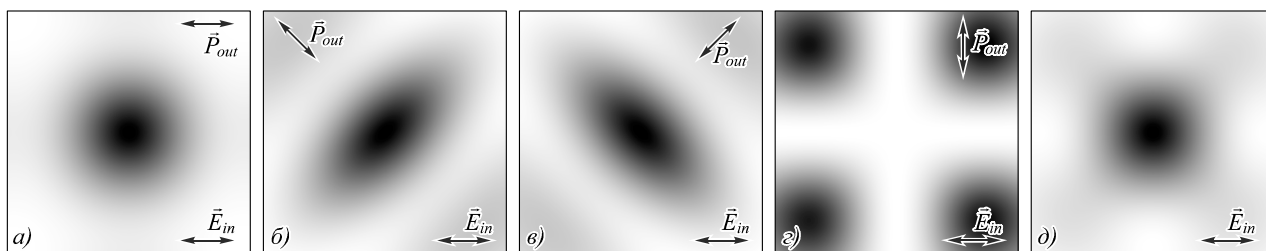


Рис. 4. Распределение интенсивности (негатив) в пучке, прошедшем через поляризатор на расстоянии 300 мкм от поверхности поляризатора. Анализатор повернут на угол 0° (а), 45° (б), -45° (в) и 90° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения и отсутствует (д). Размер изображения – 20 × 20 мкм

При этом рис. 2а–4а соответствуют направлению анализатора, совпадающему с направлением входной поляризации, рис. 2б, в–4б, в соответствуют случаю, когда анализатор повернут на углы 45° и -45° соответственно к направлению поляризации входного излучения, а рис. 2г–4г – случаю, когда направление анализатора перпендикулярно направлению входной поляризации. Рис. 2д–4д соответствуют случаю, когда анализатор отсутствует.

Из рис. 2 видно, что в ближней зоне (на расстоянии 5 мкм от микрополяризатора) поляризация близка к азимутальной. По мере удаления от микрополяризатора амплитуда светового поля приобретает вид, похожий на моду Эрмита-Гаусса (1,1), и имеет четыре локальных максимума (на расстоянии 100 мкм, рис. 3). При подходе к дальней зоне (на расстоянии 300 мкм, рис. 4) амплитуда светового поля имеет центральный максимум. Таким образом, моделирование показало, что микрополяризатор с фазовым сдвигом (рис. 1) формирует в ближнем поле пучок с поляризацией, близкой к азимутальной, и сдвигом фаз в диаметрально противоположных точках и световое поле с центральным максимумом интенсивности в дальней зоне. Эксперименты подтверждают это.

Изготовление микрополяризатора и формирование азимутальной поляризации со сдвигом фаз

Микрополяризатор на рис. 1 был изготовлен по технологии электронной литографии. На поверхность аморфного кремния (130 нм) (а-Si) на прозрачной аморфной подложке нанесли 320 нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре 180 °С. 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 бы-

ла написана картина 4-секторной 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 CHF₃ и SF₆. 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.

Для проверки правильности работы изготовленного поляризатора линейно-поляризованный свет от лазера с длиной волны 633 нм, прошедший через поляризатор P₁ (диаметр пучка 1 мм), фокусировался с помощью 40-кратного микрообъектива O₁ на подложку с расположенным на ней микрополяризатором (рис. 5).

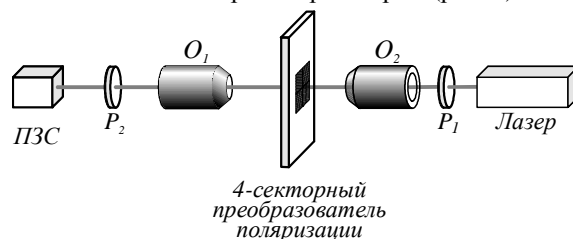


Рис. 5. Схема эксперимента: Laser – He-Ne лазер, P₁ и P₂ – линейные поляризаторы, O₁ – объектив 40 ×, O₂ – объектив 10 ×

Размер пятна на микрополяризаторе контролировался с помощью увеличения расстояния от объектива O₂ до подложки с микрополяризаторами. Несмотря на то, что в таком случае микрополяризатор расположен не в перетяжке пучка и на элемент падает сферическая волна, результаты, полученные ниже, под-

тверждают правильность работы микрополяризатора. Объясняется это тем, что направление поляризации при переходе от плоского волнового фронта к сферическому не приобретёт составляющей вдоль азимутального угла (появляется только продольная составляющая, направленная вдоль оси распространения пучка), а, следовательно, угол между направлением поляризации в плоскости микрополяризатора и направлением рельефа микрополяризатора остаётся без изменения. Сама подложка была установлена на подвижной основе, и положение пятна на микрополяризаторе контролировалось путём сдвигов этой основы. Изображение поверхности 4-зонного поляризатора на ПЗС-камере формировалось с помощью 10-кратной микрообъектива O_2 . Для оценки состояния поляризации выходного пучка перед камерой помещался поляризатор (анализатор) P_2 .

На рис. 6 показан результат эксперимента (направление падающей поляризации горизонтальное на рис. 6). Выходной поляризатор (анализатор) поворачивался так, чтобы составить углы 0° (рис. 6а), 45° (рис. 6б), -45° (рис. 6в) и 90° (рис. 6г) градусов по отношению к входному поляризатору.

На основании рис. 6в, г можно количественно определить эффективность изготовленного микрополяризатора, вычислив в соответствующих квадрантах отношения максимальной энергии к минимальной. В зависимости от квадранта эффективность составляла от 2,1:1 до 2,5:1. Рис. 6б, в хорошо согласуются с результатами моделирования на рис. 2б, в и рис. 3б, в.

Для исследования распределений интенсивности в дальней зоне в схему на рис. 5 была добавлена линза L (рис. 7) с фокусным расстоянием 24 мм. Результаты эксперимента показаны на рис. 8.

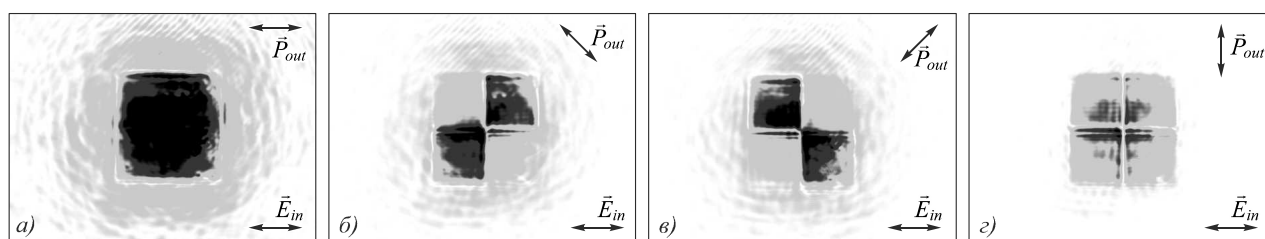


Рис. 6. Изображение микрополяризатора (рис. 1) в лазерном свете. Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повернутый на угол 0° (а), 45° (б), -45° (в) и 90° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения

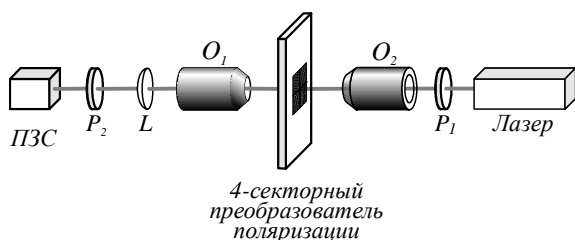


Рис. 7. Схема эксперимента: Laser – He-Ne – лазер, P_1 и P_2 – линейные поляризаторы, O_2 – объектив $40\times$, O_1 – объектив $10\times$, L – линза (с фокусным расстоянием 24 мм)

На основании рис. 8 можно сделать вывод, что 4-зонный микрополяризатор (рис. 1) преобразует падающий на него линейно-поляризованный пучок света в азимутально-поляризованный пучок с максимумом интенсивности на оптической оси.

Причём центральный лепесток картины дифракции (рис. 8а) круглый, а боковой лепесток имеет вид неравномерного кольца, что связано с отсутствием круговой симметрии у микрополяризатора (рис. 1). Результат измерения на рис. 8а, д соответствует результату моделирования на рис. 4а, д. А на рис. 8г видны четыре слабых локальных максимума интенсивности, напоминающих моду Эрмита–Гаусса (1,1) (сравните с результатами моделирования на рис. 3г и рис. 4г). Кроме того, рис. 8г показывает, что по вертикальной и горизонтальной осям поляризация горизонтальная линейная, а в четырёх квадрантах (в четырёх углах) поляризация линейная вертикальная, как на рис. 4.

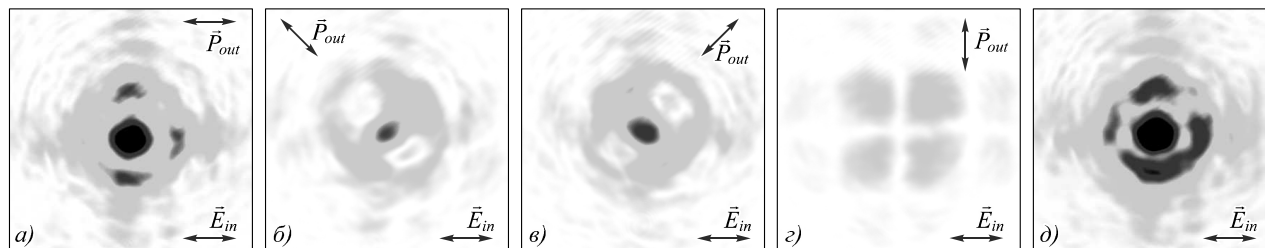


Рис. 8. Изображение в дальней зоне лазерного пучка, прошедшего 4-зонный микрополяризатор (рис. 1). Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повернутый на угол 0° (а), 45° (б), -45° (в) и 90° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения и отсутствует (д). Размер кадров – $2,7 \times 2,0$ мм

Заключение

В работе были получены следующие результаты. Впервые был рассчитан и изготовлен 4-зонный бинарный субволновый пропускающий микропреобразователь поляризации и фазы в плёнке кремния на стекле для видимого диапазона, осуществляющий преобразование линейно-поляризованного излучения в азимутально-поляризованное со сдвигом фазы в диаметрально противоположных точках на π . Численно с помощью FDTD-метода и экспериментально показано, что изготовленный пропускающий 4-зонный микрополяризатор при освещении его линейно-поляризованным светом формирует в дальней зоне дифракции центральное круглое фокусное пятно.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2016.9), а также грантов РФФИ (14-29-07133, 14-07-97039, 15-07-01174, 16-07-00990).

Литература

1. **Zhao, Y.** Recent advances on optical metasurfaces / Y. Zhao, X. Liu, A. Alu // *Journal of Optics*. – 2014. – Vol. 16. – 123001. – DOI: 10.1088/2040-8978/16/12/123001.
2. **Zhao, Y.** Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates / Y. Zhao, A. Alu // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13(3). – P. 1086-1091. – DOI: 10.1021/nl304392b.
3. **Monticone, F.** Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen / F. Monticone, N.M. Estakhri, A. Alu // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 110. – 203903. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.203903.
4. **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.
5. **Huang, C.** Efficient and broadband polarization conversion with the coupled metasurfaces / C. Huang // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 25. – P. 32015-32024. – DOI: 10.1364/OE.23.032015.
6. **Veysi, M.** Thin anisotropic metasurfaces for simultaneous light focusing and polarization manipulation / M. Veysi, C. Guclu, O. Boyraz, F. Capolino // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2015. – Vol. 32, Issue 2. – P. 318-323. – DOI: 10.1364/JOSAB.32.000318.
7. **Zhang, Z.** Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry / Z. Zhang, F. Dong, T. Chwng, K. Qui, Q. Zhang, W. Chu, X. Wu // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – Vol. 85, Issue 10. – 105002. – DOI: 10.1063/1.4897270.
8. **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, Issue 18. – P. 1424-1426. – DOI: 10.1364/OL.26.001424.
9. **Bomzon, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, Issue 5. – P. 285-287. – DOI: 10.1364/OL.27.000285.
10. **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, Issue 23. – P. 2782-2784. – DOI: 10.1364/OL.33.002782.
11. **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.
12. **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.
13. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолайн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 229-236.
14. **Стафеев, С.С.** Острая фокусировка смешанного линейно-радиально-поляризованного света бинарной микролинзой / С.С. Стафеев, Л. О'Фаолайн, М.И. Шанина, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 606-613.
15. **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, Issue 14. – P. 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
16. **Стафеев, С.С.** Четырёхзонный отражающий азимутальный микрополяризатор / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, М.В. Котляр, Л. О'Фаолайн // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 709-715.
17. **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.
18. **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, Issue 3. – P. 359-371. – DOI: 10.1117/1.1483879.
19. **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, Issue 3. – P. 277-279. – DOI: 10.1364/OL.32.000277.
20. **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, Issue 12. – P. 4466-4472. – DOI: 10.1529/biophysj.106.103200.

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 опти-

ка, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com.
ORCID: 0000-0002-7008-8007

Котляр Мария Викторовна, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета (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.

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: jww1@st-andrews.ac.uk.

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 СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 78 работ и 3 патентов. E-mail: anton@smr.ru.

Сведения об авторе Котляр Виктор Викторович см. стр.10 этого номера.

*Поступила в редакцию 2 февраля 2016 г.
Окончательный вариант – 12 февраля 2016 г.*

A FOUR-ZONE TRANSMISSION AZIMUTHAL MICROPOLARIZER WITH PHASE SHIFT

S.S. Stafeev^{1,2}, M.V. Kotlyar², L. O'Faolain³, A.G. Nalimov^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}
¹ Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,
² Samara State Aerospace University, Samara, Russia,
³ SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews, Scotland

Abstract

A binary subwavelength four-zone transmission element with metasurface for simultaneously controlling the polarization and phase of laser light was synthesized and characterized. The element was manufactured in a silicon film sputtered on a glass substrate. It performs the near-field conversion of a linearly polarized incident laser beam into a near azimuthally polarized beam with a phase shift of π at diametrically opposite points of the beam. In the far field, the converted beam produces an intensity maximum at the center, as opposed to the minimum from the azimuthally polarized beam.

Keywords: transmission subwavelength micropolarizer, azimuthally polarized light, metasurface, phase shift.

Citation: 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.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, Presidential grants for support of leading scientific schools (NSh-4128.2016.9) and Young Candidate of Science (MK-9019.2016.2) and Russian Foundation of Basic Research Grants (14-29-07133, 14-07-97039, 15-07-01174, 16-07-00990).

References

- [1] Zhao Y, Liu X, Alu A. Recent advances on optical metasurfaces. *J Opt* 2014; 16: 123001. – DOI: 10.1088/2040-8978/16/12/123001.
- [2] Zhao Y, Alu A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates. *Nano Lett* 2013; 13(3): 1086-1091. – DOI: 10.1021/nl304392b.
- [3] Monticone F, Estakhri NM, Alu A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen. *Phys Rev Lett* 2013; 110: 203903. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.203903.
- [4] 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.
- [5] Huang C. Efficient and broadband polarization conversion with the coupled metasurfaces. *Opt Express* 2015; 23(25): 32015-32024. – DOI: 10.1364/OE.23.032015.
- [6] Veysi M, Guclu C, Boyraz O, Capolino F. Thin anisotropic metasurfaces for simultaneous light focusing and polarization manipulation. *J Opt Soc Am B* 2015; 32(2): 318-323. – DOI: 10.1364/JOSAB.32.000318.

- [7] Zhang Z, Dong F, Chwng T, Qui K, Zhang Q, Chu W, Wu X. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry. *Rev Sci Instr* 2014; 85(10): 105002. – DOI: 10.1063/1.4897270.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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. *Optical Engineering* 2014; 53(10): 107105. – DOI:10.1117/1.OE.53.10.107105.
- [12] Ghadyani Z, Vartiainen I, Harder I, Iff W, Berger A, Lindlein N, Kuittinen M. Concentric ring metal grating for generating radially polarized light. *Appl Opt* 2011; 50(16): 2451-2457. – DOI: 10.1364/AO.50.002451.
- [13] 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.
- [14] Stafeev SS, O'Faolain L, Shanina MI, Nalimov AG, Kotlyar VV. Sharp focusing of a mixture of radially and linearly polarized beams using a binary microlens. *Computer Optics* 2014; 38(4): 606-613.
- [15] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Appl Opt* 2015; 54(14): 4388-4394. – DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] De Boer JF, Milner TE. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination. *Journal of Biomedical Optics* 2002; 7(3): 359-371. – DOI: 10.1117/1.1483879.
- [19] 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.
- [20] 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. *Biophysical Journal* 2007; 92(12): 4466-4472. – DOI: 10.1529/biophysj.106.103200.

Authors' information

Sergey S. 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. ORCID: 0000-0002-7008-8007

Maria V. Kotlyar, born in 1979, Ph.D., a researcher at the Laboratory 35 Samara State Aerospace University. In 2001 she graduated from the 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.

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 Microphontonic 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 Post-Doc 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.

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 SSAU as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 78 papers and 3 inventions. E-mail: anton@smr.ru.

The information about authors **Victor Victorovich Kotlyar** you can find on page 10 of this issue.

Received February 2, 2016. The final version – February 12, 2016.