

ЧЕТЫРЁХЗОННЫЙ ОТРАЖАЮЩИЙ АЗИМУТАЛЬНЫЙ МИКРОПОЛЯРИЗАТОР*С.С. Стафеев^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}, М.В. Котляр², Л. О'Фаолейн³*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**

В работе был рассчитан и изготовлен 4-зонный бинарный субволновый отражающий микропреобразователь поляризации с размерами 100×100 мкм. Микропреобразователь был синтезирован методом электронно-лучевой литографии в плёнке золота. Численно с помощью FDTD-метода и экспериментально было показано, что изготовленный микрополяризатор преобразует падающий на него линейно-поляризованный Гауссов пучок с длиной волны 532 нм в азимутально-поляризованный пучок.

Ключевые слова: субволновый микрополяризатор, азимутальная поляризация, субволновая дифракционная решётка.

Цитирование: 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.

Введение

Исследованию способов получения цилиндрических векторных пучков посвящено в последние годы значительное число работ. Одним из способов получения цилиндрических векторных пучков можно назвать субволновые решётки. Правильно подобранная высота профиля такой решётки позволяет использовать её в качестве полуволновых (или же четвертьволновых) пластинок, в то время как направление рельефа определяет ориентацию такой пластинки в пространстве.

Впервые использование субволновых решёток для изменения состояния поляризации описано в работе [1]. В качестве первых работ, где такие решётки были изготовлены, можно назвать работы [2, 3], 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 [4]. Описание технологии получения преобразователя поляризации для длин волн в диапазоне от 1030 нм до 1060 нм, изготовленного из кремния, приведено в статье [5].

Следует отметить, что большинство работ по использованию субволновых решёток для преобразования поляризации посвящены исследованию ИК-диапазона, так как изготовление таких решёток для видимого диапазона длин волн представляет технологические сложности. Удалось обнаружить только одну работу [6], в которой изготовленная из алюминия субволновая кольцевая решётка преобразовывала круговую поляризацию в радиальную в видимом диапазоне длин волн (для длины волны 633 нм). Но такая решётка не может формировать азимутальную поляризацию. Также ранее нами была рассмотрена четырёхзонная решётка-поляризатор, предназначенная для получения радиально-поляризованного пучка [7]. Полученный радиально-поляризованный пучок

использовался нами для фокусировки лазерного излучения зонной пластинкой Френеля в субволновое фокусное пятно с размером $(0,35 \times 0,38)\lambda$, где λ – длина волны фокусируемого света [8]. Использование радиально-поляризованного излучения для острой фокусировки света – наиболее востребованная область применения такого состояния поляризации. В последнее время интерес исследователей привлекает также изучение радиальной или азимутальной поляризации с оптическими вихрями.

Самой ранней работой по исследованию фокусировки оптических вихрей с пространственно неоднородной поляризацией, которую нам удалось обнаружить, оказалась работа [9]. В ней с помощью интегралов Ричардса–Вольфа, в частности, было показано, что оптический вихрь с радиальной или азимутальной поляризацией формирует в фокусе пик интенсивности, только если его топологический заряд равен $n = 1$. В [10] численно исследуется фокусировка радиально- и азимутально-поляризованных вихрей с топологическими зарядами $n = 1$ и $n = 2$ в слое двулучепреломляющего кристалла. Было показано, что в случае использования вихря с топологическим зарядом $n = 1$ в фокусе линзы ($NA = 0,9$) формируется «пиковое» распределение интенсивности, в то время как вихрь с топологическим зарядом $n = 2$ формирует кольцо. Распространение оптического вихря с начальной радиальной поляризацией рассмотрено в работе [11]. Влияние спиральной пластинки, внесённой в азимутально-поляризованный лазерный пучок с целью уменьшения фокусного пятна, изучалось в [12]. 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 $(0,17\lambda^2)$. В [13] исследовалась фокусировка азимутально-поляризованного пучка, прошедшего через концентрические кольцевые фильтры, в которых кольца представляли собой спиральные фазовые пластинки, расположенные таким образом, что разность фаз между соседними кольцами была равна π .

Такой пучок, сфокусированный широкоапертурной линзой (числовая апертура $NA = 0,95$) в слой магнитно-оптического материала, формировал иглоподобный фокус с диаметром $FWHM = 0,38\lambda$ ($FWHM$ =full width at half maximum – полная ширина по полуспаду) и глубиной $7,48\lambda$. Похожим образом магнитно-оптическая среда использовалась в работе [14], но в ней исследовался радиально-поляризованный оптический вихрь, и фокусировка осуществлялась 4 π -системой. С помощью радиально-поляризованного оптического вихря, ограниченного кольцевой маской, и 4 π фокусирующей системы представляется возможным получать цепочки фокусов длиной более 30λ [15]. Отметим, что в перечисленных выше работах исследование фокусировки радиально- или азимутально-поляризованных вихрей проводилось численно, преимущественно с помощью формул Ричардса–Вольфа. Единственная экспериментальная работа, которую удалось обнаружить [16], изучала фокусировку азимутально-поляризованного вихря линзой с числовой апертурой $NA = 1,4$. Полученное фокусное пятно имело площадь $(0,089\lambda^2)$ и было на 31 % меньше, чем пятно, полученное при фокусировке пучка с круговой поляризацией.

В данной работе изготовлена и исследуется бинарная четырёхзонная субволновая решётка-поляризатор размером 100×100 мкм в плёнке золота. Экспериментально продемонстрировано, что при падении на поляризатор линейно-поляризованного Гауссова пучка с длиной волны 532 нм отражённый от пластинки пучок обладает азимутальной поляризацией. Экспериментально показано, что внесение спиральной фазовой пластинки с топологическим зарядом $n = 1$ в полученный с помощью микрополяризатора азимутально-поляризованный пучок позволяет изменить распределение интенсивности в фокусе линзы с кольцевого на пиковое.

Численное моделирование работы поляризатора

Предложенный микрополяризатор состоит из четырёх зон (рис. 1а): в секторах, расположенных на рис. 1 справа, угол наклона рельефа к вертикальной оси составляет 70° и -70° , а период – $0,46$ мкм, в левых секторах угол наклона составляет 40° и -40° , а период – $0,4$ мкм. Размер поляризатора – 100×100 мкм, высота рельефа – 110 нм.

На рис. 1б, в показаны схемы расположения решёток 4-зонного поляризатора для преобразования линейной поляризации (вертикальная стрелка) в азимутальную (рис. 1б) и радиальную (рис. 1в). Стрелками в каждом квадрате (квадраты пронумерованы 1–4) показаны направления поляризации отражённого света. Цифрами показаны в градусах углы наклона решёток к вертикальной оси. Из рис. 1б, в видно, что нельзя простым поворотом на 90 градусов поляризатора на рис. 1б получить поляризатор на рис. 1в. Для этого надо переставить против часовой стрелки квадраты: 4-й на место 1-го, 1-й на место 2-го, 2-й на место 3-го и 3-й на

место 4-го. Заметим также, что периоды в разных квадрантах разные.

Моделирование работы поляризатора (рис. 1а, б) проводилось следующим образом: сначала методом FDTD, реализованным в программе FullWAVE, рассчитывалось поле, отражённое от элемента. Считалось, что на элемент нормально к поверхности падает линейно-поляризованная плоская волна с длиной 532 нм.

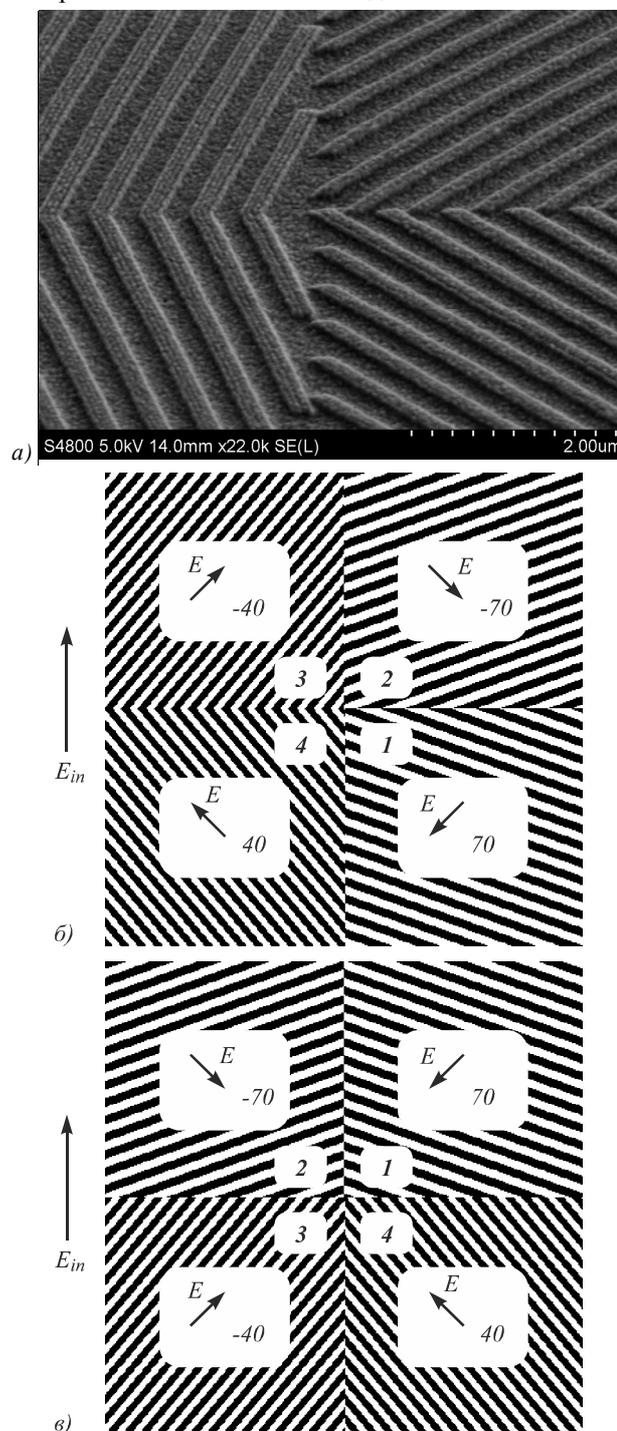


Рис. 1. Изображение центральной части изготовленного микрополяризатора, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (а), и схема расположения зон решётки-поляризатора для формирования азимутальной (б) и радиальной (в) поляризаций

Величина шага сетки метода FDTD была равна $\lambda/30$. Показатель преломления материала ступенек и основания $n = 0,312 + 3,17i$ (золото). Высота рельефа считалась равной 110 нм, а толщина основания – 150 нм. Вычисление распределения поля на значительном расстоянии от элемента осуществлялось с помощью интеграла Рэля–Зоммерфельда, в котором распределение поля на расстоянии 200 нм от поверхности, рассчитанное методом FDTD, использовалось как начальное поле. На рис. 2 показано распределение интенсивности и стрелками направление поляризации, рассчитанное на расстоянии 5 мкм, 300 мкм и 500 мкм от начальной плоскости.

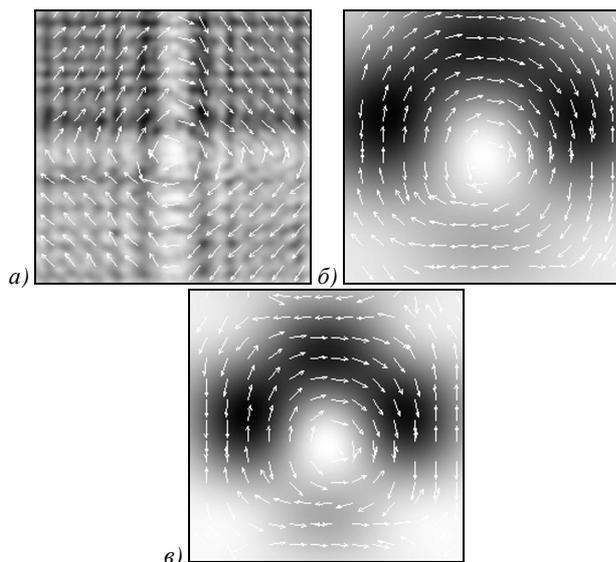


Рис. 2. Распределение интенсивности и направление поляризации в пучке, отражённом от поляризатора на расстоянии 5,2 мкм (а), 300,2 мкм (б) и 500,2 мкм (в) от поверхности поляризатора. Размер изображения – 20×20 мкм (а, б), 40×40 мкм (в)

Стрелки на рис. 2 показывают направление поляризации. То, что некоторые стрелки показывают строго в обратную сторону, свидетельствует об ошибке на π при определении поляризации в данной точке. Волновой фронт отражённого от элемента пучка из плоского превращается в сферический на большом расстоянии, а плоскость наблюдения остаётся плоской. Из-за этого появляется дополнительный набег фазы, влияющий на качество определения направления поляризации с точностью до π . Заметим, что данный «сбой» поляризации происходит локально и не влияет на общий характер поляризации пучка.

Изготовление микрополяризатора и формирование азимутальной поляризации

Микрополяризатор на рис. 1а 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 4-секторной 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.

Для проверки правильности работы изготовленного поляризатора линейно-поляризованный свет от лазера с длиной волны 532 нм (диаметр пучка 1 мм) фокусировался с помощью 10-кратного объектива O_1 на подложку с расположенными на ней решётками-поляризаторами (рис. 3). Размер пятна на микрополяризаторе контролировался с помощью увеличения расстояния от объектива O_1 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, подтверждают 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 остаются без изменения. Изображение поверхности 4-секторного поляризатора на ПЗС-камере формировалось с помощью линзы L_1 ($f \approx 1,5$ см, $NA = 0,01$). Для оценки состояния поляризации выходного пучка перед камерой помещался поляризатор (анализатор) P_2 .

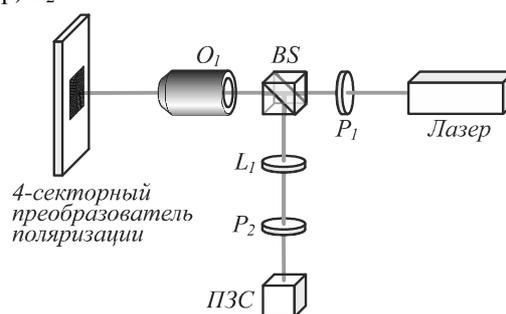


Рис. 3. Схема эксперимента:

P_1, P_2 – линейные поляризаторы, BS – неполярирующий светоделительный кубик, O_1 – 10× объектив ($NA = 0,25$), L_1 – линза ($f \approx 1,5$ см), ПЗС-камера

На рис. 4 показано изображение центральной части 4-зонного преобразователя поляризации, на который падает линейно-поляризованный Гауссов пучок с длиной волны 532 нм. Размер области засветки микрополяризатора немного меньше его размеров 100×100 мкм. Линейность поляризации излучения,

падающего на микрополяризатор, после делительного кубика проверялась с помощью обычного поляризатора. При отражении от микрополяризатора осуществляется изменение состояния поляризации света.

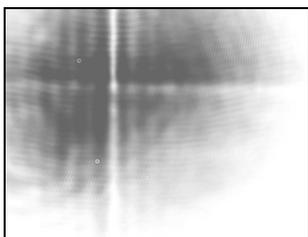


Рис. 4. Изображение микрополяризатора (рис.3) в лазерном свете без использования выходного поляризатора

На рис. 5 показано изображение микрополяризатора (рис. 1а) при наличии перед регистрирующей камерой поляризатора P_2 , ориентированного под углом 0° , 90° , -45° и 45° по отношению к направлению поляризации света, падающего на элемент. На рис. 6 показан отражённый от микрополяризатора (рис. 1а) лазерный пучок в дальней зоне дифракции, то есть в фокусе линзы L_1 (изображение на камере получалось с помощью внесения $20\times$ объектива).

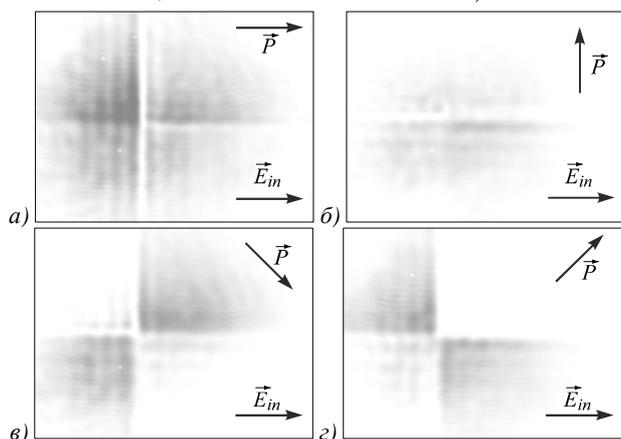


Рис. 5. Изображение микрополяризатора (рис.3) в лазерном свете. Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повёрнутый на угол 0° (а), 90° (б), -45° (в) и 45° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения

На основании рис. 5в,г можно количественно определить эффективность изготовленного микрополяризатора, вычислив в соответствующих квадрантах отношения максимальной энергии к минимальной. В частности, в первом квадранте такое отношение максимальной энергии (рис. 5в) к минимальной (рис. 5г) составило 185:1, во втором – 17:1, в нижних квадрантах – 6:1.

На основании рис. 6 можно сделать вывод, что 4-зонный микрополяризатор (рис. 1а) преобразует падающий на него линейно-поляризованный пучок света в азимутально-поляризованный пучок. Однако интенсивность в отражённом пучке распределена неравномерно по кольцу. Это объясняется тем, что 4-зонный микрополяризатор (рис. 1а) не обладает радиальной симметрией. Заметим, что в классической работе по острой фокусировке радиально-поляризо-

ванного лазерного света [17] также использовался 4-секторный преобразователь поляризации, но состоящий из повёрнутых полуволновых пластинок.

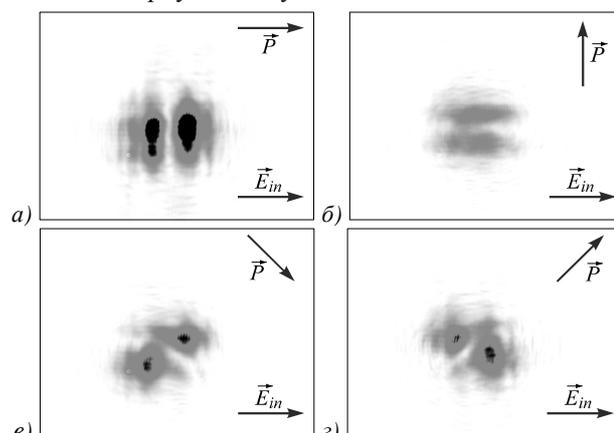


Рис. 6. Изображение в дальней зоне лазерного пучка, отражённого от 4-секторного микрополяризатора. Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повёрнутый на угол 0° (а), 90° (б), -45° (в) и 45° (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения. Размер кадров – $6,2 \times 4,2$ мм

Таким образом, четырёх зон достаточно для формирования радиальной [17] или азимутальной поляризации. Заметим, что использование 4-зонного микрополяризатора в предыдущей работе авторов [8] позволило сфокусировать лазерного света в фокусное пятно с размером $(0,35 \times 0,38)\lambda$. Хотя с помощью 4-зонного поляризатора из полуволновых пластин в [17] было получено фокусное пятно с диаметром $0,45\lambda$. Заметим, что в [18] также использовались 4- и 8-зонные поляризаторы из полуволновых пластин. Хотя картины дифракции, сформированные в ближнем поле такими поляризаторами, были невысокого качества (рис. 2в [18]). Ещё отметим, что исследуемые нами поляризаторы обладают преимуществом в технологичности изготовления по сравнению с набором полуволновых пластинок [18].

Заключение

В работе были получены следующие результаты. Впервые был рассчитан и изготовлен 4-зонный бинарный субволновый отражающий микропреобразователь поляризации в плёнке золота, осуществляющий преобразование линейно-поляризованного излучения в азимутально-поляризованное. Заметим, что 4-зонный микрополяризатор из субволновых решёток, преобразовывающий линейную поляризацию в радиальную [7], не совпадает с 4-зонным микрополяризатором (рис. 1), преобразовывающим линейную поляризацию в азимутальную. Численно с помощью FDTD-метода и экспериментально показано, что изготовленный 4-секторный микрополяризатор формирует азимутально-поляризованный пучок в ближней и дальней зоне дифракции.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и грантов РФФИ (14-07-

31092, 14-07-97039, 14-29-07133, 15-07-01174, 15-47-02492).

Литература

- Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1996. – Vol. 103, Issue 3. – P. 125-130.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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). – P. 107105. – doi:10.1117/1.OE.53.10.107105.
- 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.
- 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.
- 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.
- Helseth, L.E.** Optical vortices in focal regions / L.E. Helseth // *Optics Communications*. – 2004. – Vol. 229. – P. 85-91. – doi:10.1016/j.optcom.2003.10.043.
- Zhang, Z.** Tight focusing of radially and azimuthally polarized vortex beams through a uniaxial birefringent crystal / Z. Zhang, J. Pu, X. Wang // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47(12). – P. 1963-1967. – doi: 10.1364/AO.47.001963.
- Kotlyar, V.V.** Nonparaxial propagation of a Gaussian optical vortex with initial radial polarization / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2010. – Vol. 27, Issue 3. – P. 372-380. – DOI: 10.1364/JOSAA.27.000372.
- 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.
- Wang, S.** Ultralong pure longitudinal magnetization needle induced by annular vortex binary optics / S. Wang, X. Li, J. Zhou, M. Gu // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39(17). – P. 5022-5025. – doi: 10.1364/OL.39.005022.
- Nie, Z.** Spherical and sub-wavelength longitudinal magnetization generated by 4 π tightly focusing radially polarized vortex beams / Z. Nie, W. Ding, D. Li, X. Zhang, Y. Wang, Y. Song // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23(2). – P. 690-701. – doi: 10.1364/OE.23.000690.
- Chen, Z.** 4 π focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams / Z. Chen, D. Zhao // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(8). – P. 1286-1288. – doi: 10.1364/OL.37.001286.
- Li, X.** Super-resolved pure-transverse focal fields with an enhanced energy density through focus of an azimuthally polarized first-order vortex beam / X. Li, P. Venugopalan, H. Ren, M. Hong, M. Gu // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39(20). – P. 5961-5964. – doi: 10.1364/OL.39.005961.
- Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.
- Алферов, С.В.** Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алферов, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 57-64.

References

- Kotlyar VV, Zalyalov OK. Design of diffractive optical elements modulating polarization. *Optik* 1996; 103(3): 125-30.
- Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Optics Letters* 2001; 26(18): 1424-6. doi: 10.1364/OL.26.001424.
- Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings. *Optics Letters* 2002; 27(5): 285-7. doi: 10.1364/OL.27.000285.
- Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Optics Letters* 2008; 33(23): 2782-4. doi: 10.1364/OL.33.002782.
- 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.
- Ghadyani Z, Vartiainen I, Harder I, Iff W, Berger A, Lindlein N, Kuittinen M. Concentric ring metal grating for generating radially polarized light. *Applied Optics* 2011; 50(16): 2451-7. doi:10.1364/AO.50.002451.
- 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): 229-36.
- Stafeev S, O'Faolain L, Kotlyar V, Nalimov A. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Applied Optics* 2015; 54(14): 4388-94. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- Helseth LE. Optical vortices in focal regions. *Optics Communications* 2004; 229: 85-91. doi:10.1016/j.optcom.2003.10.043.
- Zhang Z, Pu J, Wang X. Tight focusing of radially and azimuthally polarized vortex beams through a uniaxial birefringent crystal. *Applied Optics* 2008; 47(12): 1963-7. doi: 10.1364/AO.47.001963.
- Kotlyar VV, Kovalev AA. Nonparaxial propagation of a Gaussian optical vortex with initial radial polarization. *Journal of the Optical Society of America A* 2010; 27(3): 372-80. DOI: 10.1364/JOSAA.27.000372.

- [12] Hao X, Kuang C, Wang T, Liu X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam. *Optics Letters* 2010; 35(23): 3928-30. doi: 10.1364/OL.35.003928.
- [13] Wang S, Li X, Zhou J, Gu M. Ultralong pure longitudinal magnetization needle induced by annular vortex binary optics. *Optics Letters* 2014; 39(17): 5022-5. doi: 10.1364/OL.39.005022.
- [14] Nie Z, Ding W, Li D, Zhang X, Wang Y, Song Y. Spherical and sub-wavelength longitudinal magnetization generated by 4π tightly focusing radially polarized vortex beams. *Optics Express* 2015; 23(2): 690-701. doi: 10.1364/OE.23.000690.
- [15] Chen Z, Zhao D. 4Pi focusing of spatially modulated radially polarized vortex beams. *Optics Letters* 2012; 37(8): 1286-8. doi: 10.1364/OL.37.001286.
- [16] Li X, Venugopalan P, Ren H, Hong M, Gu M. Super-resolved pure-transverse focal fields with an enhanced energy density through focus of an azimuthally polarized first-order vortex beam. *Optics Letters* 2014; 39(20): 5961-4. doi: 10.1364/OL.39.005961.
- [17] Dorn R, Quabis S, Leuchs G. Sharper focus for a radially polarized light beam. *Physical Review Letters* 2003; 91: 233901.
- [18] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Moiseev OYu. Experimental study of focusing of inhomogeneously polarized beams generated using sector polarizing plates. *Computer Optics* 2014; 38(1): 57-64.

A FOUR-ZONE REFLECTIVE AZIMUTHAL MICROPOLARIZER

S.S. Stafeev^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}, M.V. Kotlyar², L. O'Faolain³

¹Image Processing Systems Institute,

Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,

²Samara State Aerospace University, Samara, Russia,

³School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews, Scotland

Abstract

In this paper, we have designed and fabricated a four-zone binary subwavelength reflective micropolarizer. The $100\times 100\text{-}\mu\text{m}$ micropolarizer grating was synthesized by electron-beam lithography. FDTD-based numerical simulation and experimental characterization have shown the micropolarizer to be capable of transforming a linearly polarized incident Gaussian beam of wavelength 532 nm into an azimuthally polarized beam.

Keywords: polarization, diffraction gratings, subwavelength structures.

Citation: Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. A four-zone reflective azimuthal micropolarizer. *Computer Optics* 2015; 39(5): 709-15. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-709-715.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science and Russian Foundation of Basic Research grants (14-07-31092, 14-07-97039, 14-29-07133, 15-07-01174, 15-47-02492).

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.

ORCID: 0000-0002-7008-8007

Sergey Sergeevich Stafeev (b. 1985) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from Samara State Aerospace University (2009). He received his Candidate of Science degree in Physics and Mathematics in 2012. He is a researcher at the Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Current research interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.

Сведения об авторе **Налимов Антон Геннадьевич** см. стр.693 этого номера.

Котляр Мария Викторовна, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). В 2001 году окончила с отличием физический факультет Самарского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сент-Эндрюса (Великобритания). Область научных интересов: технологии изготовления элементов нанофотоники. Имеет 25 научных публикаций в Scopus.

E-mail: ichteos@km.ru.

Maria Victorovna Kotlyar, born in 1979, Ph.D. She is a researcher at the NIL-35 laboratory of Samara State Aerospace University. In 2001 she graduated with honors from the Physics department of Samara State University. She

received her PhD degree in Physics from the University of St. Andrews (UK) in 2005. Current research interests include fabrication processes for nanophotonic components. She has 25 scientific publications indexed in Scopus.

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 является координатором европейской платформы по наноструктурированию ePIXnet. Соавтор 53 научных статей с высоким индексом цитирования.

E-mail: jww1@st-andrews.ac.uk.

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 St. Andrews University (Scotland) in 2001 to begin a PhD on Modelocked Semiconductor Lasers. He received the PhD degree in Physics in 2005. His current research interests are in electron beam lithography for photonic crystals. He is now working as the coordinator of the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and a coauthor of 53 scientific papers with high citation index.

*Поступила в редакцию 3 ноября 2015 г.
Окончательный вариант – 25 ноября 2015 г.*