

## СУБВОЛНОВАЯ ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СМЕШАННОЙ АЗИМУТАЛЬНО-ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, М.В. Котляр<sup>2</sup>, Л. О'Фаолейн<sup>3</sup>

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

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

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

### Аннотация

В данной работе был рассмотрен четырёхсекторный пропускающий преобразователь поляризации для длины волны 633 нм, с помощью которого можно получить азимутально-поляризованный пучок из линейно-поляризованного. Численно показано, что, поместив непосредственно за преобразователем поляризации зонную пластинку Френеля с фокусным расстоянием 532 нм, можно сфокусировать свет в субволновое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности меньше дифракционного предела (размеры по полуспаду интенсивности равны 0,28 и 0,45 от длины волны фокусируемого света). Если же после прохождения четырёхсекторного пропускающего преобразователя свет сначала распространяется в свободном пространстве на расстояние 300 мкм и только потом фокусируется зонной пластинкой, то размер фокусного пятна составляет 0,42 и 0,81 от длины волны фокусируемого света (при этом размер пятна, сформированного только поперечной составляющей напряженности электрического поля, был равен 0,42 и 0,59 от длины волны). Последний численный результат был проверен экспериментально, полученные размеры пятна были равны 0,46 и 0,57 от длины волны.

**Ключевые слова:** субволновый микрополяризатор, азимутальная поляризация, субволновая дифракционная решётка, острая фокусировка, СБОМ, FDTD.

**Цитирование:** Стафеев, С.С. Субволновая фокусировка лазерного излучения смешанной азимутально-линейной поляризации / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, М.В. Котляр, Л. О'Фаолейн // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 458-466. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-458-466.

### Введение

В настоящее время растёт интерес исследователей к метаповерхностям – элементам, осуществляющим изменение амплитуды, фазы и поляризации проходящего через них излучения (см., например, обзорные статьи [1, 2]). Частным случаем таких метаповерхностей можно назвать решётки с субволновым периодом [3], с помощью которых можно осуществлять преобразование поляризации проходящего через них света.

Первые субволновые бинарные микрополяризаторы были изготовлены для инфракрасного диапазона [4, 5], 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 [6]. Интерферометр для радиально-поляризованного света, созданный на основе субволновой решётки из [6], описан в [7].

В работе [8] концентрическая металлическая решётка используется для преобразования лазерного излучения с длиной волны 633 нм круговой поляризации в радиально-поляризованный свет. А в работе [9] аналогичным методом получен радиально-поляризованный пучок, но для излучения терагерцевого диапазона. Отметим, что полученный в [8] радиально-поляризованный пучок, однако, не являлся в строгом смысле радиально-поляризованным. Хотя направление поляризации было радиальным и распределение интенсивности в перпендикулярном се-

чении такого пучка имело вид кольца, однако распределение фазы в этом сечении не было одинаковым. Для исправления такой ситуации в [10, 11] был предложен элемент, представляющий собой соединение концентрической металлической решётки из [8] с голограммой с вилкой.

Перечисленные выше работы можно разделить на две группы. В первой группе [4, 5, 8–11] осуществлялось преобразование света круговой поляризации в пучки с цилиндрической симметрией. Такие элементы, являющиеся аналогом четвертьволновых пластинок, в технологическом плане изготовить проще – меньше аспектное отношение элементов рельефа решётки. Другая группа – элементы, осуществляющие преобразование линейной поляризации в радиальную или азимутальную [6, 7, 12]. В данном случае элементы являются аналогом полуволновой пластинки.

Ранее нами уже исследовались 4-секторные субволновые решётки (4-СПП) для преобразования поляризации падающего на них излучения. В работе [13] отражающий 4-СПП осуществлял преобразование линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный пучок, который затем использовался для фокусировки света в субволновую область с размерами по полуспаду интенсивности равными 0,40λ и 0,50λ. В работе [14] аналогично был предложен отражающий азимутальный преобразователь поляризации, а в работе [15] – азимутальный преобразователь поляризации, который работал на пропускание. Данная работа является продолжением работы [15] – пучок,

полученный ранее с помощью 4-СПП, будет применён для задач острой фокусировки лазерного излучения.

В данной работе нами рассматривается четырёх-секторный пропускающий преобразователь поляризации, с помощью которого можно получить азимутально-поляризованный пучок из линейно-поляризованного. При этом в полученном азимутально-поляризованном пучке есть разность фаз  $\pi$  в диаметрально противоположных точках пучка. Было показано, что, поместив непосредственно за 4-СПП зонную пластинку Френеля (ЗП) с фокусным расстоянием 532 нм, можно сфокусировать свет в субволновое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности меньше дифракционного предела ( $\text{FWHM}_x = 0,28\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,45\lambda$ ). Если же после прохождения 4-СПП свет сначала распространяется в свободном пространстве на расстояние 300 мкм и только потом фокусируется ЗП, то размер фокусного пятна составляет  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,81\lambda$  (размер пятна, сформированного только поперечной составляющей интенсивности,  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,59\lambda$ ). Последний численный результат был проверен экспериментально, полученные размеры пятна  $\text{FWHM}_x = 0,46\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,57\lambda$ .

#### Моделирование в дальней зоне от поляризатора

На первом этапе исследования нами численно моделировалась фокусировка зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием  $f = 532$  нм лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 633$  нм, прошедшего через 4-секторный преобразователь поляризации. ЗП Френеля была выбрана нами в качестве фокусирующего элемента по той причине, что при условии равенства числовых апертур она обеспечивает меньший диаметр фокусного пятна по сравнению с апланатическим объективом [16].

Моделирование осуществлялось методом FDTD, реализованным в программе FullWave. Параметры моделируемой ЗП (рис. 1) соответствовали реальной ЗП, используемой далее в эксперименте. Глубина рельефа ЗП была равна 510 нм, а диаметр – 14 мкм. ЗП имела 12 колец и центральный диск и была изготовлена из резиста с показателем преломления 1,52. Шаг моделирования в методе FDTD был равен 0,02 мкм.

В качестве пучка, освещающего ЗП, использовалось распределение комплексной амплитуды, полученное ранее для подготовки статьи [15] и показанное на рис. 2. Размер изображения составляет  $10 \times 10$  мкм.

На рис. 3–5 показаны результаты моделирования. Фокусное пятно имело эллиптическую форму с размерами по полуспаду интенсивности  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,81\lambda$ . При этом больший диаметр пятна только поперечной составляющей интенсивности составляет  $0,59\lambda$  (пунктирная кривая на рис. 5а).

#### Эксперимент

Экспериментально исследовалась фокусировка зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием  $f = 532$  нм лазерного излучения с длиной вол-

ны  $\lambda = 633$  нм, прошедшего через 4-секторный преобразователь поляризации.

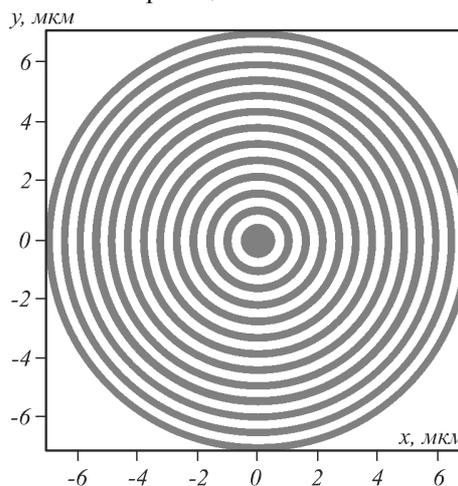


Рис. 1. Вид моделируемой ЗП в окне программы FullWave

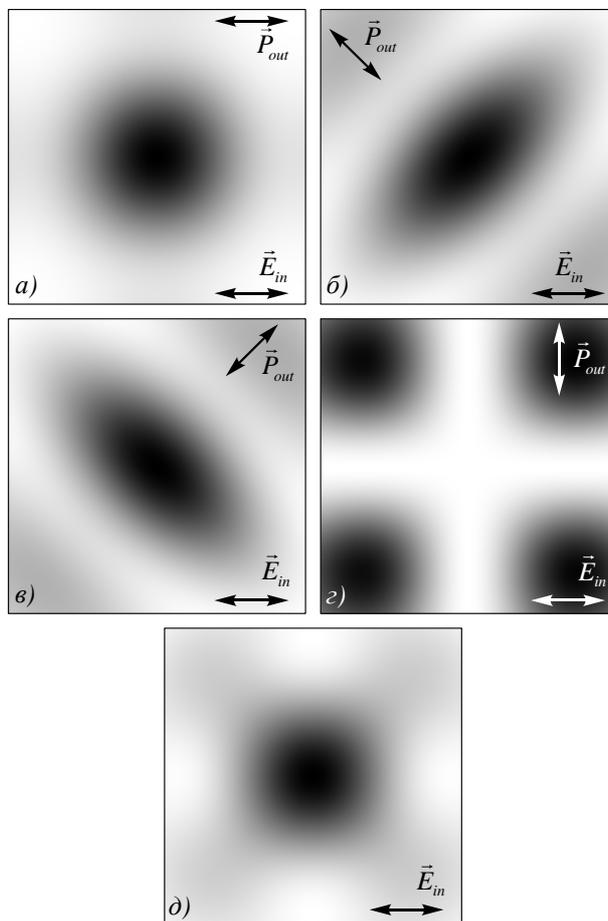


Рис. 2 (взято из [15]). Распределение интенсивности (негатив) в пучке, прошедшем через поляризатор на расстоянии 300 мкм от поверхности поляризатора. Анализатор повернут на угол  $0^\circ$  (а),  $45^\circ$  (б),  $-45^\circ$  (в) и  $90^\circ$  (г) к направлению поляризации

На рис. 6 показана схема проведённых измерений. В данном эксперименте линейно-поляризованное лазерное излучение от гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм попадало через волоконно-оптическую транспортную систему на подложку с расположен-

ными на ней 4-СПП. Центральная часть изготовленного 4-секторного поляризатора показана на рис. 7.

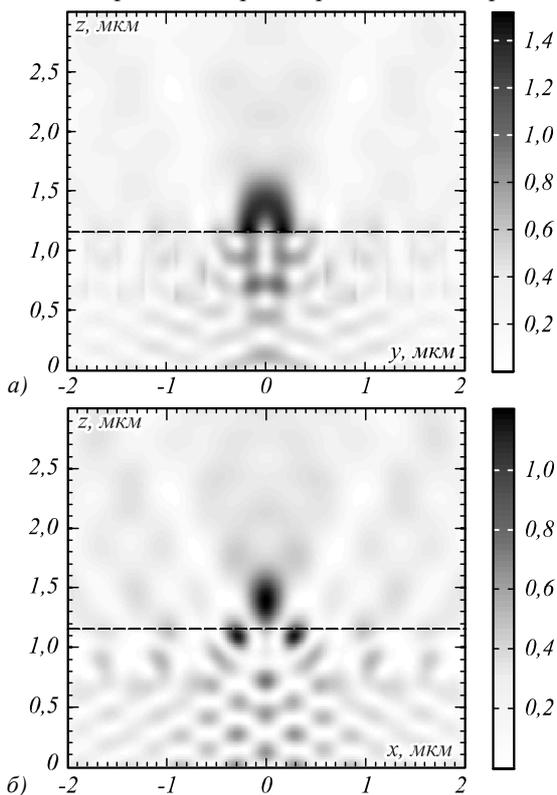


Рис. 3. Распределение интенсивности (негатив) в вычисляемой области в плоскости (а) YZ и (б) XZ. Чёрной пунктирной линией показана граница рельефа ЗП

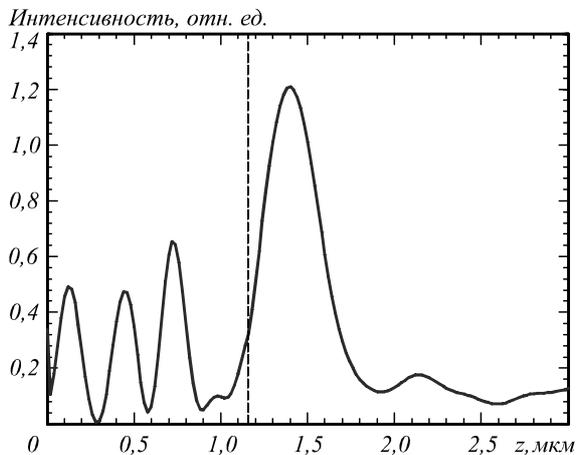


Рис. 4. Распределение интенсивности вдоль оси z. Чёрной пунктирной линией показана граница рельефа ЗП

Подложка с 4-СПП была жёстко закреплена с другой подложкой, на которой располагались зонные пластинки Френеля. На рис. 8 показано изображение ЗП на фоне 4-секторного поляризатора. Положение пятна и его размеры на зонной пластинке контролировались путем смещений зеркала  $M_1$ . Прошедшее через 4-СПП излучение фокусировалось зонной пластинкой, а распределение интенсивности в фокусе измерялось сканирующим ближнепольным оптическим микроскопом Интегра Спектра (выделен штриховой линией на рис. 6)

с помощью четырёхгранного пирамидального кантилевера  $C$ .

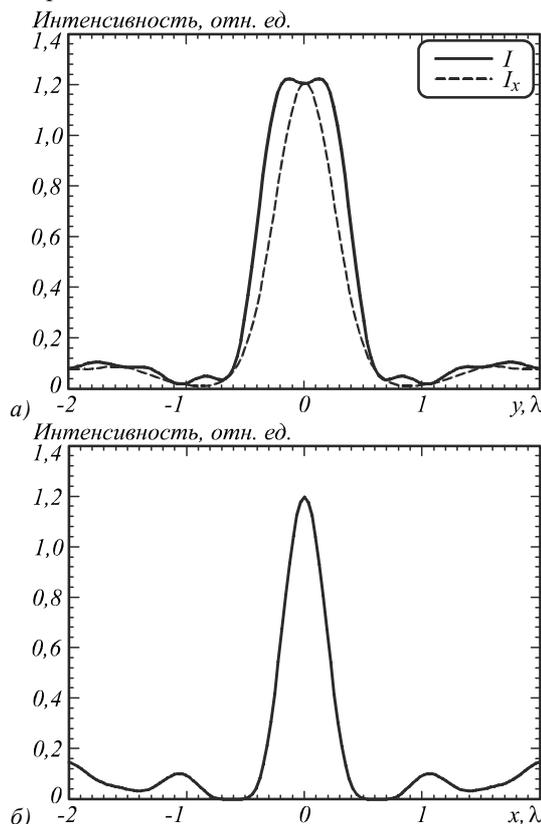


Рис. 5. Распределение интенсивности в фокусе вдоль осей (а) y и (б) x. Непрерывная кривая – суммарная интенсивность, пунктирная кривая – поперечная составляющая интенсивности

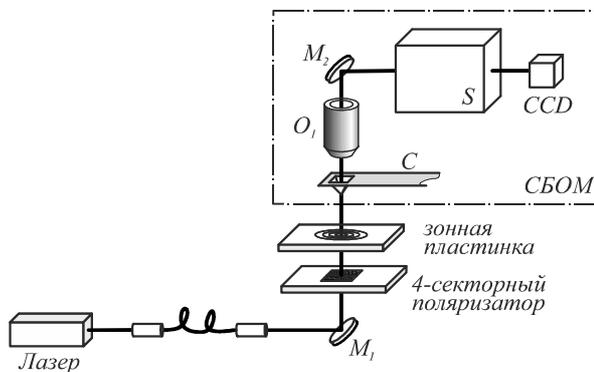


Рис. 6. Схема проводимого эксперимента.  $M_1, M_2$  – зеркала,  $O_1$  – 100× объектив,  $C$  – кантилевер,  $S$  – спектрометр,  $CCD$  – камера

Чтобы удостовериться, что свет действительно проходит через 4-секторный преобразователь поляризации, можно поместить обычный поляризатор после объектива  $O_1$ . На рис. 9 показано изображение прошедшего пучка при различных положениях поляризатора. Изображения повторяют полученные ранее в [15].

Сравнивая рис. 2 и 9, можно увидеть сходство между ними, что доказывает, что лазерное излучение, перед тем как попасть на ЗП, проходит через 4-СПП.

Измерения на сканирующем ближнепольном оптическом микроскопе показали, что на расстоянии 200 – 250 нм от поверхности ЗП формируется фокусное пятно, а его размеры по полуспаду интенсивности составляли  $0,46\lambda$  и  $0,57\lambda$  (рис. 10). Ранее в численном моделировании было показано, что размеры пятна, формируемого поперечной составляющей напряженности электрического поля, были равны  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,59\lambda$  (рис. 5).

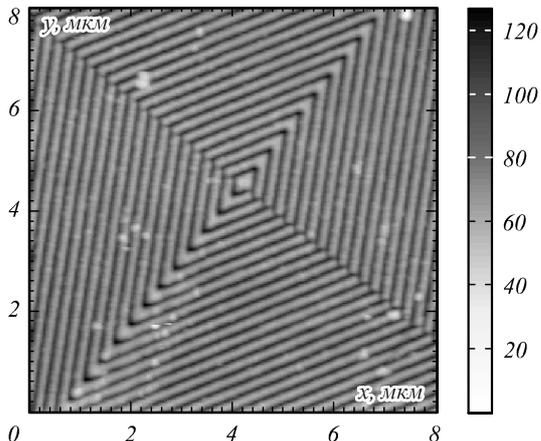


Рис. 7. АСМ изображение центральной части 4-секторного пропускающего поляризатора. Шкала показывает глубину рельефа в нм

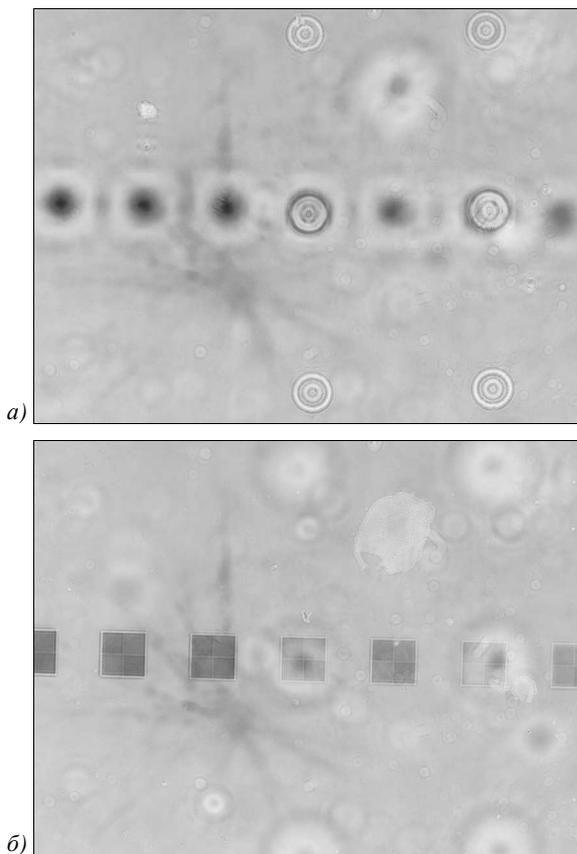


Рис. 8. Изображение (а) ЗП на фоне 4-СПП и (б) 4-СПП на фоне ЗП в оптическом микроскопе с 10-кратным увеличением

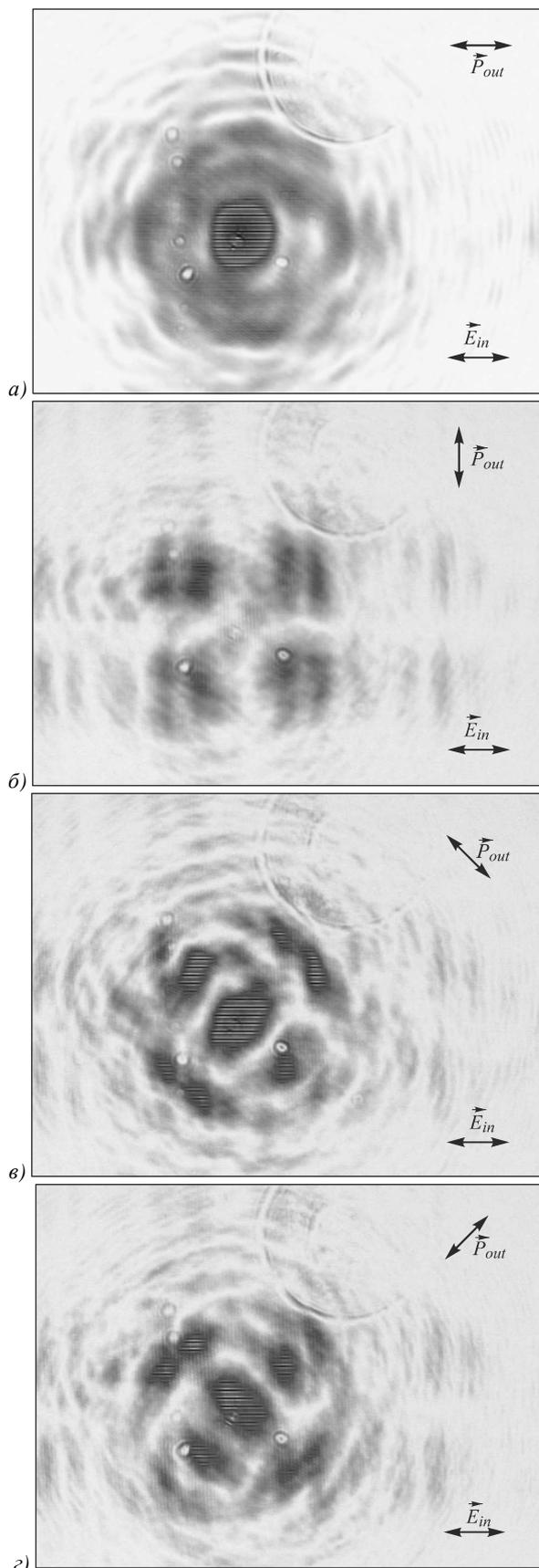


Рис. 9. Изображения прошедшего пучка при различных положениях поляризатора: 0 (а), 90 (б), 45 (в) и -45 (г)

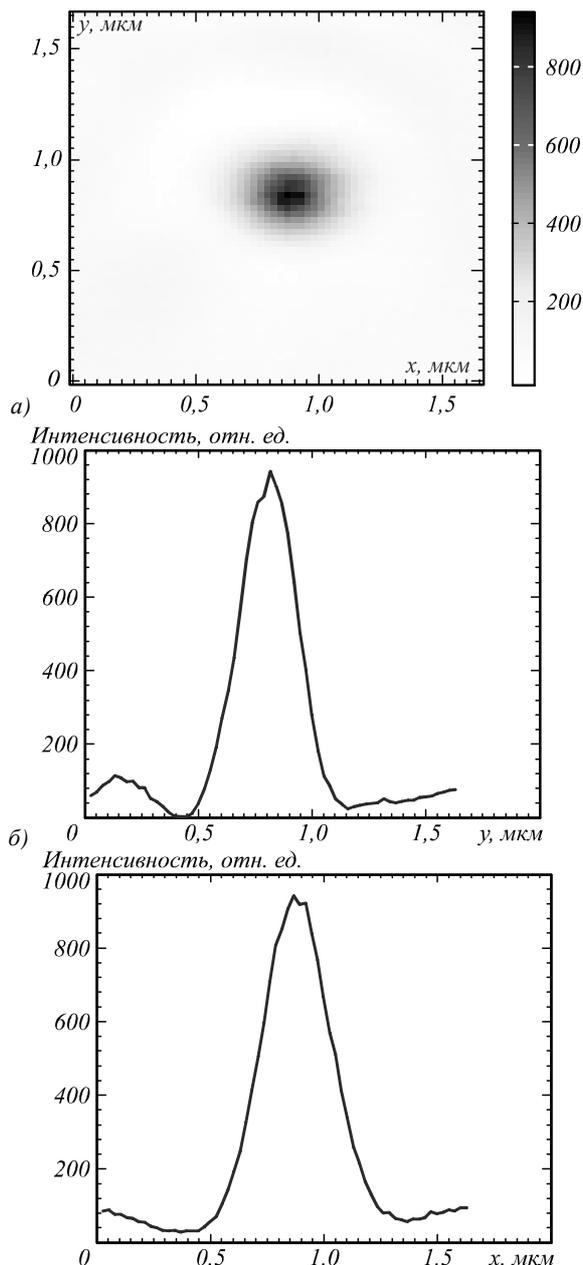


Рис. 10. Распределение интенсивности в фокусе, измеренное на сканирующем ближнепольном микроскопе

**Моделирование в ближней зоне поляризатора**

Численно моделировалась фокусировка зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием  $f=532$  нм лазерного излучения с длиной волны  $\lambda=633$  нм, прошедшего через 4-секторный преобразователь поляризации. При этом считалось, что 4-СПП располагалась непосредственно перед рельефом ЗП.

Параметры ЗП (рис. 1), как и в первом моделировании, соответствовали реальной ЗП, используемой в эксперименте. Шаг моделирования в методе FDTD был равен 0,02 мкм.

В качестве освещающего ЗП пучка использовалось распределение комплексной амплитуды, полученное ранее для подготовки статьи [15] и показанное на рис. 11.

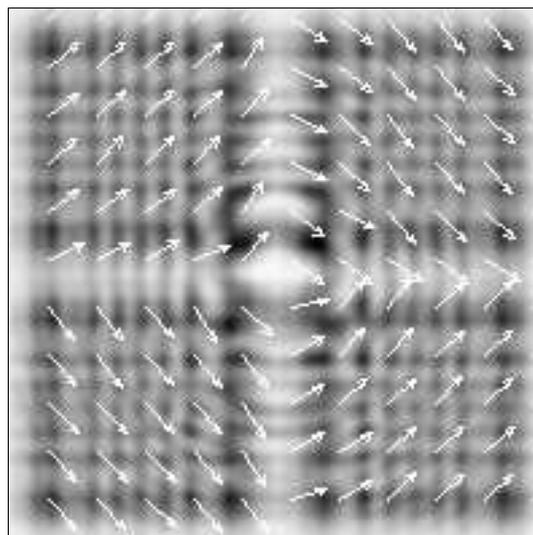


Рис. 11. Распределение интенсивности (негатив) и направление поляризации в пучке, прошедшем через поляризатор на расстоянии 5,1 мкм от поверхности поляризатора

На рис. 12–14 показаны результаты моделирования. Из рис. 12 видно, что непосредственно за поверхностью ЗП формируется область повышенной интенсивности (фокус). Фокусное пятно имеет эллиптическую форму с размерами по полуспаду интенсивности  $FWHM_x=0,28\lambda$  и  $FWHM_y=0,45\lambda$  на расстоянии 40 нм от поверхности.

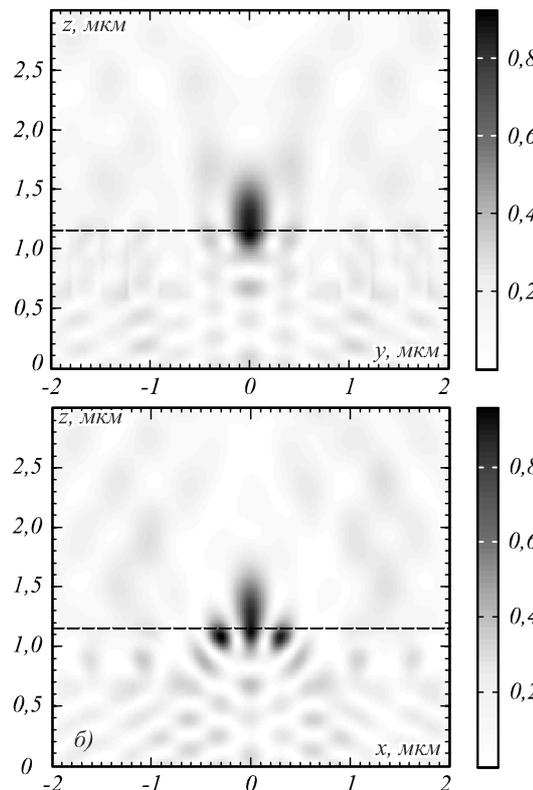


Рис. 12. Распределение интенсивности (негатив) в центральной части вычисляемой области в плоскости (а) YZ и (б) XZ. Чёрной пунктирной линией показана граница рельефа ЗП

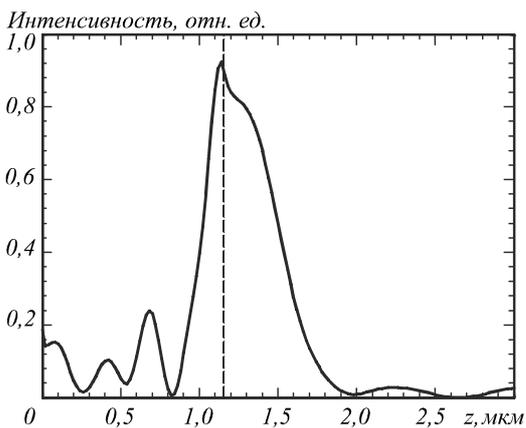


Рис. 13. Распределение интенсивности вдоль оси z. Чёрной пунктирной линией показана граница рельефа ЗП

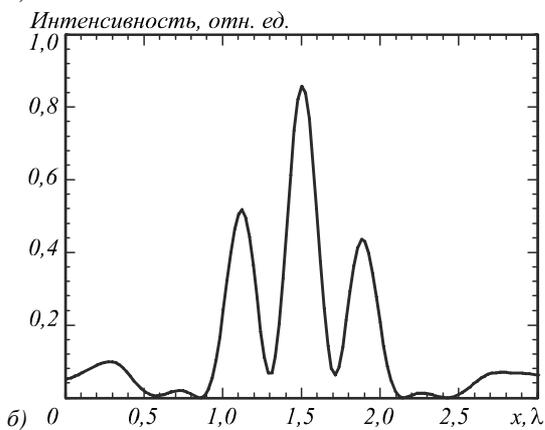
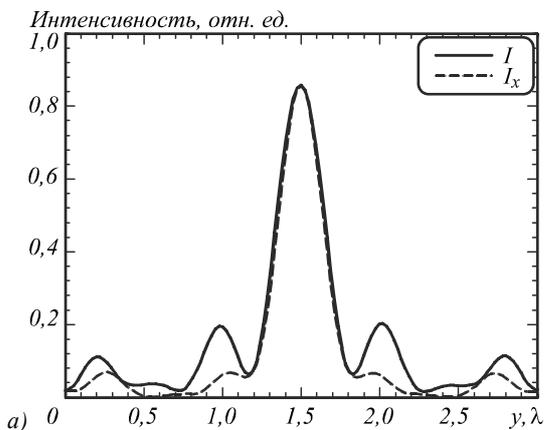


Рис. 14. Распределение интенсивности на расстоянии 40 нм от поверхности ЗП вдоль осей (а) у и (б) x. Непрерывная кривая – суммарная интенсивность, пунктирная кривая – поперечная составляющая интенсивности

При этом больший диаметр пятна только поперечной составляющей интенсивности составляет  $0,42\lambda$  (пунктирная кривая на рис. 14а), т.е. уширение пятна за счёт продольной составляющей интенсивности невелико.

При увеличении расстояния от поверхности ЗП пятно увеличивается в размерах, становясь более круглым: на расстоянии 200 нм от поверхности его размеры равны  $FWHM_x=0,37\lambda$  и  $FWHM_y=0,48\lambda$  (рис. 15).

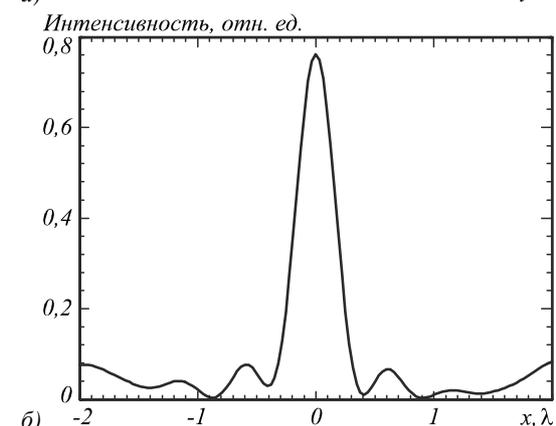
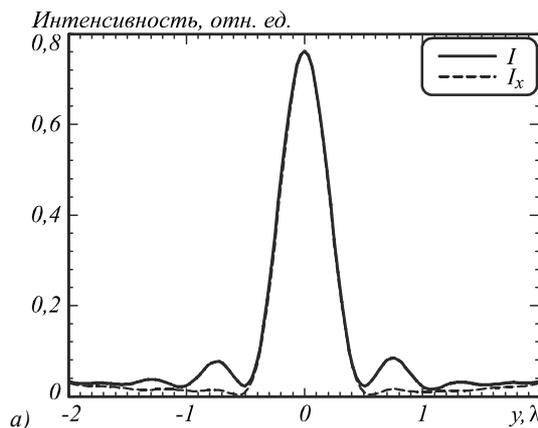


Рис. 15. Распределение интенсивности на расстоянии 200 нм от поверхности ЗП вдоль осей (а) у и (б) x. Непрерывная кривая – суммарная интенсивность, пунктирная кривая – поперечная составляющая интенсивности

Из рис. 2 видно, что центральная часть пучка, прошедшего 4-СПП, фактически полностью линейно-поляризована вдоль оси у (рис. 2д), в то время как непосредственно на выходе 4-СПП (рис. 11) наблюдается именно азимутально-поляризованный пучок. Как следствие, при увеличении расстояния от 4-СПП до ЗП до 300 мкм размеры фокусного пятна увеличиваются с  $FWHM_x=0,28\lambda$  и  $FWHM_y=0,45\lambda$  до  $FWHM_x=0,42\lambda$  и  $FWHM_y=0,81\lambda$ .

Отметим, что в эксперименте поместить 4-СПП непосредственно перед ЗП Френеля невозможно, так как последняя изготавливается на подложке, имеющей ширину в сотни микрометров. Однако можно пойти другим путем – получить изображение 4-СПП в лазерном свете перед рельефом ЗП Френеля. Направление поляризации в изображении будет совпадать с направлением поляризации на выходе из 4-СПП (рис. 11). Таким образом можно будет экспериментально подтвердить полученные выше численные результаты. Это и является дальнейшим направлением нашего исследования.

### Заключение

В работе был исследован пропускающий 4-секторный преобразователь поляризации, преобразующий линейно-поляризованный пучок в азимутально-поляризованный пучок с фазовым сдвигом  $\pi$

в диаметральном противоположных точках пучка, применительно к задачам острой фокусировки света. Были получены следующие результаты:

1. Численно с помощью метода FDTD было показано, что, освещая зонную пластинку Френеля пучком, прошедшим 4-СПП, можно получить субволновое фокусное пятно с размерами меньше дифракционного предела  $\text{FWHM}_x = 0,28\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,45\lambda$ .

2. В случае, если после прохождения 4-СПП пучок сначала распространялся в свободном пространстве на расстояние 300 мкм и только потом фокусировался ЗП, то размеры фокусного пятна были равны  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,81\lambda$  (размер пятна, сформированного поперечной составляющей напряженности электрического поля, составляет  $\text{FWHM}_x = 0,42\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,59\lambda$ ).

3. Последний численный результат был проверен экспериментально с помощью сканирующего ближнепольного микроскопа. Экспериментально полученные размеры фокусного пятна были равны  $\text{FWHM}_x = 0,46\lambda$  и  $\text{FWHM}_y = 0,57\lambda$ .

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2016.9) и молодого кандидата наук (МК-9019.2016.2), а также грантов РФФИ (14-29-07133, 14-07-97039, 15-07-01174, 15-47-02492, 15-37-20723, 16-07-00990).

### Литература

1. Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // Nature materials. – 2014. – Vol. 13(2). – P. 139-150. – DOI:10.1038/nmat3839.
2. 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.
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. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bozom, V. Kleiner, E. Hasman // Optics Letters. – 2001. – Vol. 26(18). – P. 1424-1426. – DOI: 10.1364/OL.26.001424.
5. Bomzon, Z. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings /

- Z. Bozom, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // Optics Letters. – 2002. – Vol. 27(5). – P. 285-287. – DOI: 10.1364/OL.27.000285.
6. 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.
7. Lerman, G.M. Radial polarization interferometer / G.M. Lerman, U. Levy // Optics Express. – 2009. – V. 17(25). – P. 23234-23246. – DOI: 10.1364/OE.17.023234.
8. 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.
9. Xie, Z. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers / Z. Xie, J. He, X. Wang, S. Feng, Y. Zhang // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40(3). – P. 359-362. – DOI: 10.1364/OL.40.000359.
10. 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.
11. Genevet, P. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress / P. Genevet, F. Capasso // Reports on Progress in Physics. – 2015. – Vol. 78(2). – 024401. – DOI: 10.1088/0034-4885/78/2/024401.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Davidson, N. High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens / N. Davidson, N. Bokor // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29. – P. 1318-1320. – DOI: 10.1364/OL.29.001318.

### Сведения об авторах

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ, ныне – Самарский университет) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» 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

Сведения об авторах **Налимов Антон Геннадьевич** и **Котляр Мария Викторовна** см. стр. 456 этого номера.

**О'Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин)** 1979 года рождения, из Ирландии. В 2000 году окончил физический факультет Университета города Корк. С 2001 года начал работать в группе микрофотоники Школы фи-

зики 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](mailto:jww1@st-andrews.ac.uk).

ГРПТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 22 августа 2016 г. Окончательный вариант – 29 августа 2016 г.

## SUBWAVELENGTH FOCUSING OF LASER LIGHT OF A MIXTURE OF LINEARLY AND AZIMUTHALLY POLARIZED BEAMS

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

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

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University,

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

### Abstract

We investigated a four-zone transmission polarization converter (4-TPC) for a wavelength of 633 nm, enabling the conversion of a linearly polarized incident beam into a mixture of linearly and azimuthally polarized beams. It was numerically shown that by placing a Fresnel zone plate of focal length 532 nm immediately after the 4-TPC, the incident light can be focused into an oblong subwavelength focal spot whose size is smaller than the diffraction limit (with larger and smaller size, respectively, measuring FWHM = 0.28 $\lambda$  and FWHM = 0.45 $\lambda$ , where  $\lambda$  is the incident wavelength and FWHM stands for full-width at half maximum of the intensity). If after passing through a 4-TPC, light propagates in free space over a distance of 300  $\mu$ m before being focused by a Fresnel zone plate, the resulting focal spot was found to measure 0.42 $\lambda$  and 0.81 $\lambda$  (with the focal spot contributed to just by the transverse E-field components measuring 0.42 $\lambda$  and 0.59 $\lambda$ ). This numerical result was verified experimentally, giving a focal spot of smaller and larger size, respectively, measuring 0.46 $\lambda$  and 0.57 $\lambda$ .

**Keywords:** subwavelength micropolarizer, azimuthal polarization, subwavelength grating, tight focusing, near-field microscopy, FDTD, polarization selective devices.

**Citation:** Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength focusing of laser light of a mixture of linearly and azimuthally polarized beams. *Computer Optics* 2016; 40(4): 458-466. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-458-466.

**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 the Russian Foundation for Basic Research grants (## 14-29-07133, 14-07-97039, 15-07-01174, 15-47-02492, 15-37-20723, 16-07-00990).

### References

- [1] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature materials* 2014; 13(2): 139-150. DOI:10.1038/nmat3839.
- [2] Kildishev AV, Boltasseva A, Shalaei VM. Planar photonics with metasurfaces. *Science* 2013; 339(6125): 1232009. DOI: 10.1126/science.1232009.
- [3] Kotlyar VV, Zalyalov OK. Design of diffractive optical elements modulating polarization. *Optik* 1996; 103(3): 125-130.
- [4] Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Optics Letters* 2001; 26(18): 1424-1426. DOI: 10.1364/OL.26.001424.
- [5] 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): 285-287. DOI: 10.1364/OL.27.000285.
- [6] Lerman GM, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm. *Optics Letters* 2008; 33(23): 2782-2784. DOI: 10.1364/OL.33.002782.
- [7] Lerman GM, Levy U. Radial polarization interferometer. *Optics Express* 2009; 17(25): 23234-23246. DOI: 10.1364/OE.17.023234.
- [8] 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): 2451-2457. DOI: 10.1364/AO.50.002451.
- [9] Xie Z, He J, Wang X, Feng S, Zhang Y. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers. *Optics Letters* 2015; 40(3): 359-362. DOI: 10.1364/OL.40.000359.
- [10] Lin J, Genevet P, Kats MA, Antoniou N, Capasso F. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams. *Nano Letters* 2013; 13(9): 4269-4274. DOI: 10.1021/nl402039y.
- [11] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. *Reports on Progress in Physics* 2015; 78(2): 024401. DOI: 10.1088/0034-4885/78/2/024401.

- [12] Levy U, Tsai CH, Pang L, Fainman Y. Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control. *Optics Letters* 2004; 29(15): 1718-1720. DOI: 10.1364/OL.29.001718.
- [13] Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar VV, Nalimov AG. Tight focus of light using micropolarizer and microlens. *Applied Optics* 2015; 54(14): 4388-4394. DOI: 10.1364/AO.54.004388.
- [14] Kotlyar VV, Stafeev SS, Kotlyar MV, Nalimov AG, O'Faolain L. Subwavelength micropolarizer in a gold film for visible light. *Applied Optics* 2016. 55(19): 5025-5032. DOI: 10.1364/AO.55.005025.
- [15] Stafeev SS, Kotlyar MV, O'Faolain L, Nalimov AG, Kotlyar VV. Fourzone transmitted azimuthal micropolarizer with phase shift. *Computer Optics* 2016. 40(1): 12-18. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-12-18.
- [16] Davidson N, Bokor N. High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens. *Optics Letters* 2014; 29, 1318-1320. DOI: 10.1364/OL.29.001318.

---

#### *Authors' information*

**Sergey S. Stafeev** (b. 1985) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from Samara State Aerospace University (SSAU) in 2009. He received his Candidate's degree in Physics and Mathematics from SSAU in 2012. Currently, he is a researcher of the Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” 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

The information about author's **Anton G. Nalimov** and **Maria V. Kotlyar** you can find on page 457 of this issue.

**Liam O'Faolain (William Whelan-Curtin)** (b. 1979) 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 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. Currently, he is working as a lecturer at the University of St. Andrews (UK), also coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers in peer-reviewed journals. E-mail: [jww1@st-andrews.ac.uk](mailto:jww1@st-andrews.ac.uk).

---

*Received August 22, 2016. The final version – August 29, 2016.*

---