

# СУБВОЛНОВЫЕ РЕШЁТКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕОДНОРОДНЫХ ПУЧКОВ

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

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

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

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

В данной работе экспериментально исследуются бинарные субволновые четырёхзонные решётки-поляризаторы, предназначенные для формирования азимутально-поляризованного пучка из линейно-поляризованного света. Первый исследуемый нами элемент работал на отражение (длина волны 532 нм) и был выполнен в плёнке золота, вторая субволновая решётка работала на пропускание (длина волны 633 нм) и была изготовлена в плёнке аморфного кремния.

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

## Введение

Исследованию поляризационно-неоднородных пучков [1] (в том числе и способов их получения) посвящено значительное количество научных работ, и в последнее время для получения таких пучков все активнее применяются субволновые решётки. Правильно подобранная высота профиля субволновой решётки позволяет использовать её в качестве полуволновой (или же четвертьволновой) пластинки, в то время как направление рельефа определяет ориентацию этой пластинки в пространстве.

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]. Известны также микрополяризаторы на пропускание для видимого диапазона. В [6] изготовленная из алюминия субволновая кольцевая решётка преобразовывала круговую поляризацию в радиальную в видимом диапазоне длин волн (для длины волны 633 нм). Стоит, однако, отметить, что в [6] была реализована четвертьволновая пластинка и полученный пучок не обладал в классическом смысле радиальной поляризацией – в диаметрально противоположных точках пучка колебания напряженности поля проходили в одинаковой фазе, а не в противоположной, как это должно быть. Отметим также, что нами ранее была исследована четырёхсекторная решётка-поляризатор, которая использовалась для получения радиально поляризованного света с целью фокусировки его в субволновое пятно с размерами  $(0,35 \times 0,38)\lambda$  [7] с помощью зонной пластинки.

В данной работе мы исследуем две субволновые решётки, предназначенные для преобразования линейно-поляризованного лазерного излучения в азимутально-

поляризованный пучок. Первая исследуемая субволновая решётка-поляризатор (Рис. 1а) работает на отражение и была изготовлена в плёнке золота, а вторая (Рис. 1б) – работает на пропускание и была изготовлена в кремнии на стеклянной подложке.

## Изготовление

Отражающий четырёхсекторный микрополяризатор состоит из четырёх зон (рис. 1а): в секторах, расположенных на рис. 1а справа, угол наклона рельефа к оси  $y$  составляет  $70^\circ$  и  $-70^\circ$ , а период  $0,46$  мкм, в левых секторах угол наклона составляет  $40^\circ$  и  $-40^\circ$ , а период  $0,4$  мкм. Размер поляризатора  $100 \times 100$  мкм, высота рельефа –  $110$  нм. Для изготовления такой решётки сначала на поверхность стеклянной подложки был нанесен 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 образец травился в ксилене, который растворяет участки резиста, экспонированные пучком электронов. Далее с помощью реактивного ионного травления частицы золота расплылись из участков, незащищённых резистом. На заключительном этапе остатки резиста удалялись с использованием кислородной плазмы. Время реактивного ионного травления было оптимизировано таким образом, чтобы достичь глубины травления золота примерно  $110$  нм.

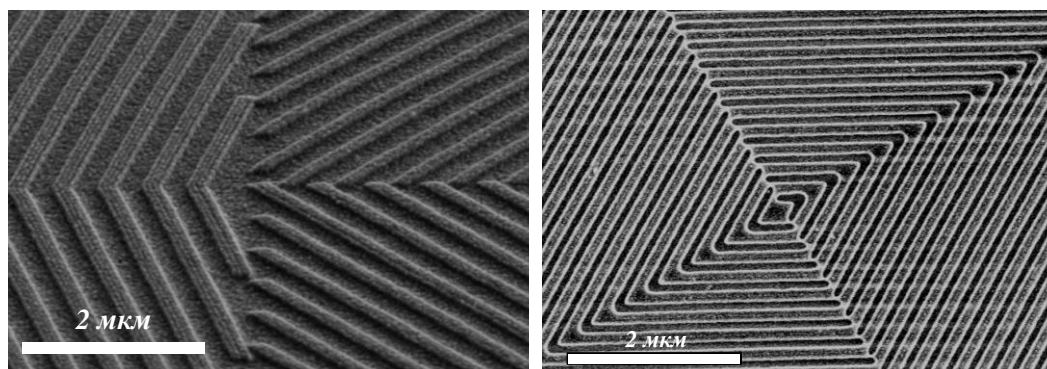


Рис. 1. Изображение центральных частей отражающего (а) и пропускающего (б) поляризаторов

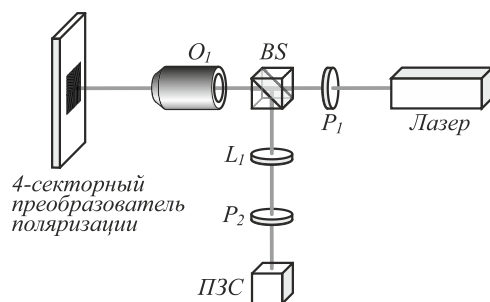
Пропускающий микрополяризатор (рис 1б) также содержит четыре зоны, но с углами наклона линий субволновых решёток  $-60^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $60^\circ$ . Такая решётка не только преобразует линейную поляризацию в азимутальную, но и добавляет разницу фаз  $\pi$  свету прошедшему через диаметрально противоположные сектора. Изготовление осуществлялось по технологии электронной литографии: на поверхность аморфного кремния ( $130$  нм) (a-Si) на прозрачной пирексной подложке, нанесли  $320$  нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре  $180$  °С. Величина толщины резиста ( $320$  нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено  $15$  нм золота. Электронным лучом с напряжением  $30$  кВ была написана картина 4 секторной решётки-поляризатора на поверхности резиста. Для проявления образца, использовался раствор воды и изопропанола в соотношении  $3:7$ . При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА. С помощью реактивного ионного травления с использованием газов  $\text{CHF}_3$  и  $\text{SF}_6$  был осуществлен перенос шаблона решётки-поляризатора с резиста на аморфный кремний. Толщина резиста была подобраны таким образом, чтобы он смог

защитить части картины во время травления 130 нм аморфного кремния. Период изготовленной решётки 230 нм, ширина ступеньки 138 нм, ширина канавки 92 нм. Размер изготовленного поляризатора (рис. 1б) 100×100 мкм.

## Эксперимент

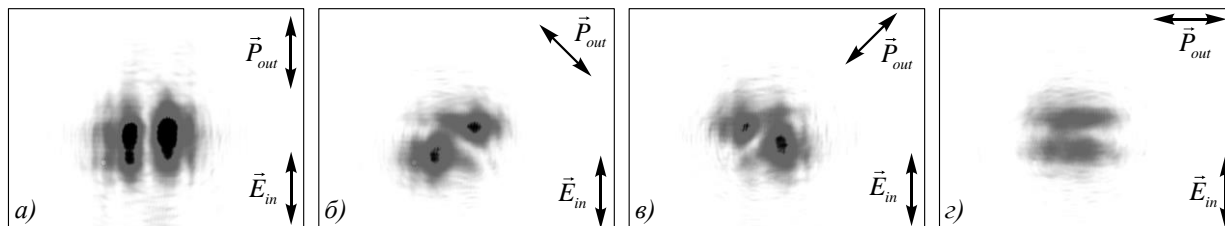
### Отражающий поляризатор

Для проверки правильности работы отражающего поляризатора (рис. 1а) 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. 2). 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.



**Рис. 2.** Схема эксперимента:  $P_1$ ,  $P_2$  – линейные поляризаторы, BS – светоделительный кубик,  $O_1$  – 10× объектив ( $NA = 0,25$ ),  $L_1$  – линза ( $f \approx 1,5$  см), ПЗС – камера

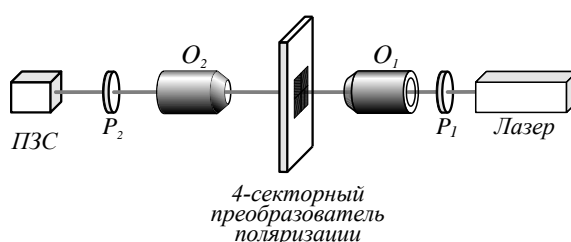
На рис. 3 показано распределение интенсивности в пучке, отражённом от 4-секторного поляризатора. Для оценки состояния поляризации выходного пучка перед камерой помещался поляризатор (анализатор)  $P_2$ . Угол между поляризатором и направлением поляризации во входном пучке был равен  $0^\circ$  (рис. 3а),  $90^\circ$  (рис. 3б),  $-45^\circ$  (рис. 3в) и  $45^\circ$  (рис. 3г). Рис. 3 доказывает, что отражённый от 4-секторного микрополяризатора пучок имеет азимутальную поляризацию.



**Рис. 3.** Изображение лазерного пучка, отражённого от поляризатора (Рис. 1а), в дальней зоне. Линейный поляризатор был помещён перед камерой. Угол между поляризатором и направлением поляризации во входном пучке был равен  $0^\circ$  (а),  $90^\circ$  (б),  $-45^\circ$  (в) и  $45^\circ$  (г). Размер кадра  $6,2 \times 4,2$  мм.

*Пропускающий поляризатор*

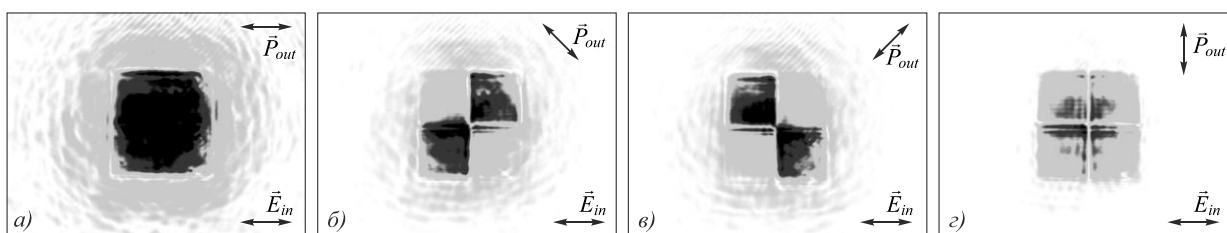
Для проверки правильности работы пропускающего поляризатора (рис. 1б) линейно-поляризованный свет от лазера с длиной волны 633 нм, прошедший через линейный поляризатор P1, (диаметр пучка 1 мм) фокусировался с помощью 40-кратного микрообъектива O1 на подложку с расположенными на ней микрополяризаторами (рис. 4). Размер пятна на микрополяризаторе контролировался с помощью увеличения расстояния от объектива O1 до подложки с микрополяризаторами. Сама подложка была установлена на подвижной основе, и положение пятна на микрополяризаторе контролировалось путем сдвигов этой основы. Изображение поверхности 4-зонного поляризатора на ПЗС-камере формировалось с помощью 10-кратного микрообъектива O2. Для оценки состояния поляризации выходного пучка перед камерой, как и ранее, помещался поляризатор (анализатор) P2.



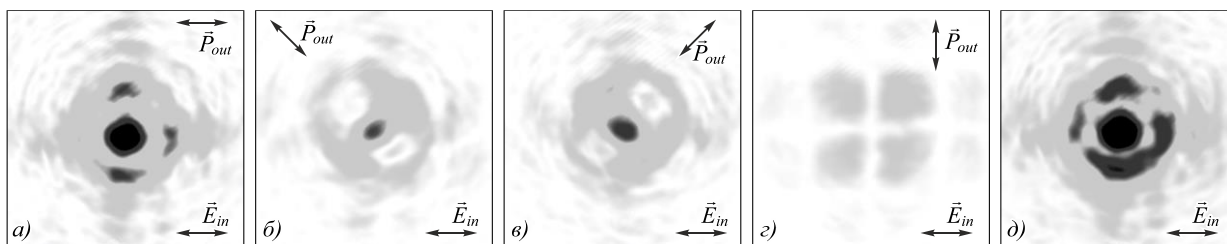
**Рис. 4.** Схема эксперимента: Laser – He-Ne лазер, P1 и P2 – линейные поляризаторы, O1 – объектив 40×, O2 – объектив 10×

На рис. 5 показан результат эксперимента (направление падающей поляризации горизонтальное на рис. 5). Выходной поляризатор (анализатор) P2 поворачивался так, чтобы составить углы 0° (рис. 5а), 45° (рис. 5б), -45° (рис. 5в) и 90° (рис. 5г) градусов по отношению к входному поляризатору. На основании рис. 5 можно сделать вывод, что 4-секторный микрополяризатор (рис. 1б) преобразует падающий на него линейно-поляризованный пучок света в азимутально-поляризованный пучок.

Для исследования распределений интенсивности в дальней зоне в схему на рис. 4 перед поляризатором P2 была помещена линза с фокусным расстоянием 24 мм. Результаты эксперимента показаны на рис. 6. Из рис. 6 видно, что 4-секторный микрополяризатор (рис. 1б) формирует в дальней зоне пучок с максимумом интенсивности на оптической оси. Причём центральный лепесток картины дифракции (рис. 6а) круглый, а боковой лепесток имеет вид неравномерного кольца, что связано с отсутствием круговой симметрии у микрополяризатора (рис. 1б).



**Рис. 5.** Изображение лазерного пучка прошедшего через поляризатор (Рис. 1б). Линейный поляризатор был помещен перед камерой; Угол между поляризатором и направлением поляризации во входном пучке был равен 0° (а), 90° (б), -45° (в) и 45° (д).



**Рис. 6.** Изображение в дальней зоне лазерного пучка, прошедшего 4-зонный микрополяризатор (рис. 1). Перед камерой помещен выходной поляризатор (анализатор), повернутый на угол  $0^\circ$  (а),  $45^\circ$  (б),  $-45^\circ$  (в) и  $90^\circ$  (г) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения. Размер кадров  $2,7 \text{ мм} \times 2,0 \text{ мм}$ .

## Заключение

В данной работе были исследованы две субволновые решётки, предназначенные для преобразования линейно-поляризованного лазерного излучения в азимутально-поляризованный пучок. Первая исследуемая субволновая решётка-поляризатор работала на отражение и была изготовлена в плёнке золота, а вторая – работала на пропускание и была изготовлена в кремнии на стеклянной подложке. Было экспериментально показано, что

1) изготовленный 4-зонный бинарный субволновый отражающий микрополяризатор при освещении его линейно-поляризованным светом с длиной волны 532 нм формирует в ближней и дальней зоне азимутально-поляризованный пучок.

2) изготовленный пропускающий 4-секторный микрополяризатор при освещении его линейно поляризованным светом с длиной волны 633 нм формирует в ближней зоне дифракции азимутально-поляризованный пучок со сдвигом фазы на  $\pi$  в диаметрально противоположенных точках пучка. В дальней зоне дифракции исследуемый элемент формирует центральное круглое фокусное пятно, окружённое световым кольцом.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-9019.2016.2), а также грантов РФФИ (14-29-07133, 14-07-97039, 15-07-01174, 15-37-20723, 15-47-02492, 16-07-00990).

## Литература

1. Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Adv. Opt. Photon.* – 2009. – V. 1. – P. 1-57.
2. Bomzon, Z. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters.* – 2001. – V. 26, Issue 18. – P. 1424-1426.
3. 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. – V. 27, Issue 5. – P. 285-287.
4. 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. – V. 33, Issue 23. – P. 2782-2784.

5. 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. – V. 53(10). – P. 107105.
6. 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. – V. 50 (16). – P. 2451-2457.
7. Stafeev, S.S. Tight focus of light using micropolarizer and microlens / S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Appl. Opt.* – 2015. – V. 54, no.14. – P. 4388-4394.