

Бинарные субволновые решетки для управления поляризацией света

С.С. Стафеев^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}, М.В. Котляр², Л. О'Фаолейн³, В.В. Котляр^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

³Технологический институт Корка, Корк, Ирландия

Аннотация. Рассмотрены компоненты микрооптики с наноструктурированной поверхностью для управления поляризацией лазерного излучения. Такие компоненты включают пропускающие или отражающие свет субволновые дифракционные решётки, локально меняющие свое направление и фактор заполнения, но примерно сохраняющие период и глубину рельефа, детали которого могут составлять десятки и сотни нанометров для видимого диапазона длин волн. Детально анализируются малосекторные дифракционные поляризаторы, преобразующие линейную поляризацию в радиальную или азимутальную.

1. Введение

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для изменения состояния амплитуды и фазы, проходящего (или отражённого) излучения известны в оптике давно. Однако лишь в недавнем прошлом внимание учёных переключилось на исследование элементов, преобразующих и поляризацию света. Для этого используются дифракционные решётки с разным наклоном штрихов и с периодом меньше длины волны. Такие решётки называются субволновыми.

Показатели преломления света в такой решётке различны для ТЕ и ТМ поляризованной волны [1]:

$$n_{eff}^{TE} = \sqrt{dn_r^2 + (1-d)n_m^2},$$
$$n_{eff}^{TM} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d}{n_r^2} + \frac{1-d}{n_m^2}\right)}},$$

где d – фактор заполнения решётки (отношение ширины ступеньки к периоду решётки), n_r – показатель преломления материала ступеньки, n_m – показатель преломления среды. Впервые возможность преобразования поляризации с помощью субволновых решёток была продемонстрирована в работе [2].

Если задержка по фазе между ТЕ и ТМ волной равна четверти длины волны, то решётка работает как четвертьволновая пластинка, и преобразует линейную поляризацию в круговую.

А если задержка по фазе на выходе из решётки равна половине длины волны, то такая решётка работает как полуволновая пластинка.

2. Пропускающие субволновые решетки

Технологически изготовить четвертьволновую пластинку проще, поэтому сначала был реализован именно такой тип поляризаторов. Впервые поворот поляризации света с помощью субволновой решётки – аналога четвертьволновой пластинки, был экспериментально продемонстрирован в работах [3,4], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок.

В работе [5] концентрическая металлическая решётка используется для преобразования лазерного излучения с длиной волны 633 нм круговой поляризации в радиально-поляризованный свет. Решётка из концентрических колец (аксикон) с периодом 200 нм и фактором заполнения 0,4 записывалась с помощью электроннолучевой литографии на слой резиста, а затем переносилась на слой SiO₂ с помощью реактивного ионного травления в среде фтора, а на слой алюминия – с помощью реактивного ионного травления в хлоре. Однако полученный пучок в [5] нельзя назвать в строгом смысле радиально поляризованным – у такого пучка значения фазы в точках диаметрально противоположных совпадают, в то время как у «настоящего» радиально-поляризованного пучка, колебания напряженности электрического поля в этих точках происходят в противофазе. Для исправления ситуации в [6, 7] был предложен элемент, представляющий собой соединение концентрической металлической решётки с периодом 200 нм, подобной [6], с «вилочковой» голограммой с периодом 1,2 мкм. Элемент был изготовлен в плёнке золота толщиной 150 нм на стеклянной подложке, а его работа была проверена на длинах волн 633 нм и 850 нм. В работе [8] рассмотрены субволновые решётки преобразующие линейно-поляризованный свет в свет с круговой поляризацией для длин волн 488, 532 и 632,8 нм.

Реализация полуволновой пластинки требует большего аспектного отношения отдельных элементов решётки, поэтому изготовить её сложнее. Высота рельефа такой решётки должна быть в два раза выше, чем у четвертьволновой пластинки. В [9] впервые была экспериментально продемонстрирована работа субволновой решётки – аналога полуволновой пластинки. Фактически было рассмотрено три решётки-поляризатора, отличающиеся дизайном. Все поляризаторы были изготовлены в GaAs и предназначались для длины волны 10,6 мкм (длина волны излучения CO₂ лазера). Отметим еще, что в работе [9] период изготовленной решётки не был постоянным, а изменялся от $d_{\min} = 2$ мкм до $d_{\max} = 3,05$ мкм. В работе [10] была рассмотрена субволновая решётка также являющаяся аналогом полуволновой пластинки, но уже для ближнего ИК диапазона. Такая решётка преобразовывала свет линейной поляризации с длиной волны 1064 нм в радиально поляризованный пучок. Шаблон решётки был записан с помощью электронно-лучевой литографии в резисте ZEP 520A, после чего был перенесён на подложку GaAs (показатель преломления $n = 3,478$) с помощью ионного травления.

В работе [11] был реализован четырёхсекторный пропускающий поляризатор с фазовым сдвигом. Микрополяризатор на рис. 1 был изготовлен по технологии электронной литографии. На поверхность аморфного кремния (130 нм) (a-Si) на прозрачной пирексной подложке (показатель преломления 1,47, <http://www.valleydesign.com/pyrex.htm>) нанесли 320 нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре 180 °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 была написана картина четырёхсекторной решётки-поляризатора на поверхности резиста. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА. Трансформирование шаблона решётки-поляризатора с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов 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.

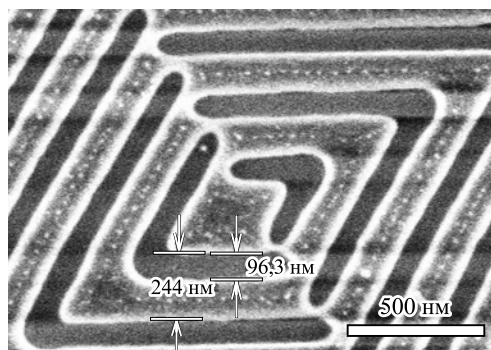


Рисунок 1. SEM изображение пропускающего поляризатора.

Четырехсекторный пропускающий поляризатор преобразует падающее на него лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 633$ нм в азимутально-поляризованное с фазовым сдвигом так, что диаметрально противоположенные точки в сечении пучка имеют одинаковую поляризацию. Измерения, выполненные с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ), показали, что на расстоянии 200–250 нм от поверхности ЗП формируется фокусное пятно с размерами $\text{FWHM} = 0,46\lambda$ и $\text{FWHM} = 0,57\lambda$.

3. Отражающие субволновые решетки

Требование высокого аспектного отношения при изготовлении полуволновой пластинки можно обойти, если использовать не пропускающую решётку, а отражающую. Высота рельефа в таком случае уменьшается в два раза. В работе [12] был предложен отражающий поляризатор, предназначенный для преобразования линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный. Микрополяризатор представлял собой субволновую решётку разбитую на четыре сектора, в каждом из которых угол между направлением рельефа и поляризацией падающего излучения был различен. В зависимости от сектора поляризация поворачивалась на угол 45, -45, 135 или -135 градусов (рис. 2).

Отражающий микрополяризатор (рис. 2а) для преобразования линейно поляризованного света и радиально поляризованный [12] 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 четырёхсекторной решётки – поляризатора. Затем выполнялась операция проявления, то есть образец травился в ксилене, 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 распылялись из участков, не защищённых резистом. На заключительном этапе остатки резиста удалялись с использованием кислородной плазмы, в результате чего шаблон поляризатора был как бы «выгравирован» на золоте. Время реактивного ионного травления было оптимизировано таким образом, чтобы достичь глубины травления золота примерно 110 нм. В работе [13] по такой же технологии был реализован тоже отражающий поляризатор, но использовался он уже для получения азимутально-поляризованного пучка (рис. 2б).

На рис. 3 показано изображение микрополяризатора (рис. 2б) при наличии перед регистрирующей CCD-камерой поляризатора, ориентированного под углом 0° (а), -45° (б) и 45° (в) по отношению к направлению поляризации света, падающего на элемент. Из рис. 3 видно, что отражённый от поляризатора (рис. 2б) свет имеет азимутальную поляризацию.

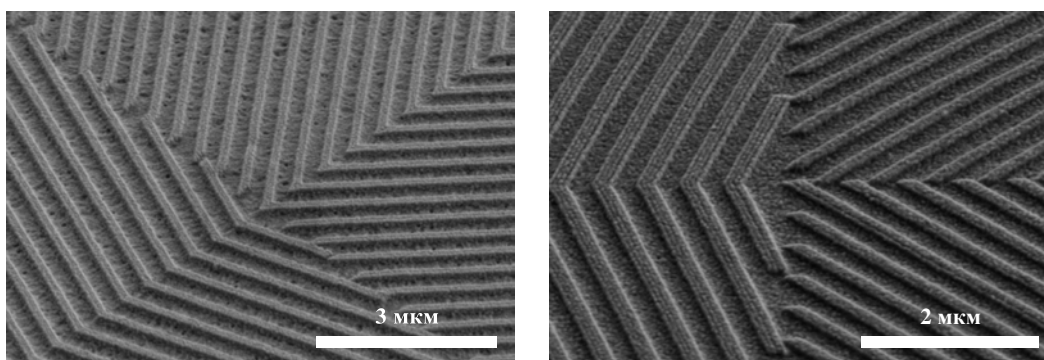


Рисунок 2. SEM изображение отражающего радиального (а) и азимутального (б) поляризаторов.

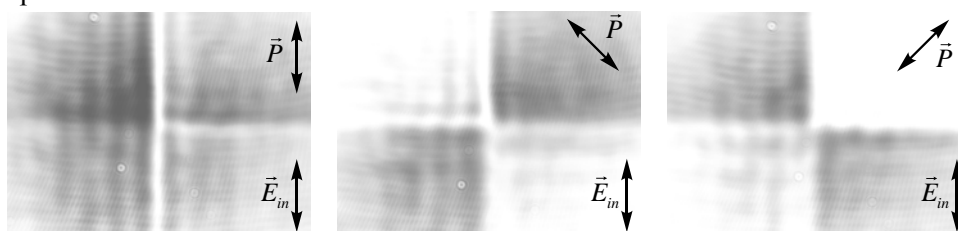


Рисунок 3. Изображение четырёхзонного микрополяризатора (рис. 5б) в лазерном свете. Перед камерой помещён выходной поляризатор (анализатор), повёрнутый на угол 0° (а), -45° (б) и 45° (в) к направлению поляризации падающего на пластинку излучения.

Отражающая волновая пластинка с периодом 400 нм, фактором заполнения 0,5 и глубиной рельефа 280 нм исследуется в работах [14]. Она сравнивалась с пропускающей решёткой с таким же периодом и фактором заполнения, но в два раза большей глубиной рельефа (450 нм). В отличие от работ [12, 13] рельеф обеих решёток в [14] был изготовлен в слое фоторезиста, отражение же достигалось благодаря использованию кремниевой подложки (в пропускающей решётке подложка была из стекла). Численно и экспериментально было показано, что обе решётки обеспечивают одинаковую задержку фазы.

4. Металлинзы на основе субволновых решёток

В последние годы в оптике изучаются плоские бинарные компоненты микрооптики толщиной меньше длины волны, состоящие из набора субволновых элементов (столбиков, щелей, отрезков, решёток) из металла или полупроводника, которые одновременно могут менять поляризацию, амплитуду и фазу падающего лазерного излучения. Такие компоненты фотоники называются компонентами с метаповерхностью (КМП). Обзор по ним можно найти в [15]. С помощью КМП можно сформировать оптические вихри [16], сфокусировать свет в кольцо [17] или в поперечный отрезок [18]. Особенно интересным является применение КМП в качестве супертонких микролинз [19].

Металлинза с рельефом, показанным на рис. 4 была изготовлена по технологии электронной литографии. На плёнку аморфного кремния (130 нм) (a-Si), напылённую на прозрачную пирексную подложку (показатель преломления 1,47), был нанесен слой 320 нм резиста ПММА, который был закреплён при температуре 180 °С. Величина толщины резиста (320 нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено 15 нм золота. Электронным лучом с напряжением 30 кВ бинарный шаблон был перенесен на поверхность резиста. Для проявления образца использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА.

Трансформирование шаблона с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Толщина резиста была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части рельефа во время травления

130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5.

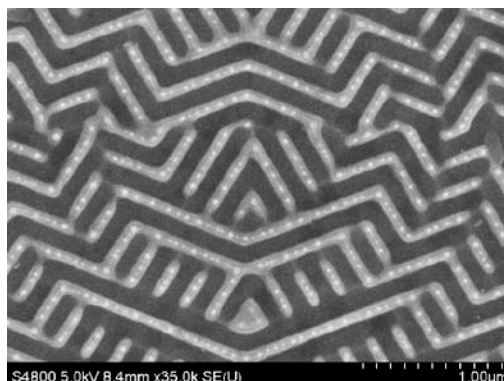


Рисунок 4. Изображение в электронном микроскопе увеличенного центрального фрагмента 3×2 мкм металлинзы в плёнке аморфного кремния.

Экспериментальное исследование фокусировки света исследуемой металлинзой осуществлялось средствами СБОМ. В эксперименте свет от гелий-неонового лазера (длина волны 633 нм, мощность 50 мВт) попадал через волоконно-оптическую транспортную систему на исследуемую металлинзу и фокусировался в субволновое пятно. Полная ширина пучка, падающего на металлинзу, составляла 30 мкм. Распределение интенсивности в фокусе исследовалось с помощью полого металлизированного пирамидального кантилевера C с отверстием при вершине 100 нм. Свет, прошедший через отверстие в кантилевере, улавливался 100-кратным объективом O_1 , после чего попадал через спектрометр S (Solar TP, Nanofinder 30) на CCD-камеру (Andor, DV401-BV). Экспериментально измеренное фокусное расстояние линзы было равно $z = 0,6$ мкм. Максимальная интенсивность в фокусе в 11 раз превышала максимальную интенсивность падающего на линзу пучка. Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны $FWHM_x = 0,55\lambda$, $FWHM_y = 0,49\lambda$. Эти значения отличаются всего на 8% от расчётных значений ($FWHM_x = 0,52\lambda$, $FWHM_y = 0,46\lambda$), полученных с учётом технологических погрешностей изготовления металлинзы.

5. Заключение

В данной работе рассмотрены субволновые решётки, работающие как аналоги волновых пластинок, предназначенные для создания цилиндрических векторных пучков. Предложен простой подход для создания компонент с метаповерхностью на основе локальных субволновых решёток.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) и гранта РФФИ 17-47-630417.

7. Литература

- [1] Lalanne, P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures / P. Lalanne, D. Lemerrier-Lalanne // *J Mod Opt.* – 1996. – Vol. 43(10). – P. 2063-2086.
- [2] Kotlyar, V.V. Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik (Stuttg.)*. – 1996. – Vol. 103(3). – P. 125-130.
- [3] Bomzon, Z. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27(5). – P. 285-287.
- [4] Bomzon, Z. Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Opt. Lett.* – 2001. – Vol. 26(18). – P. 1424-1426.

- [5] 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 // *Appl. Opt.* – 2011. – Vol. 50(16). – P. 2451-2457.
- [6] Lin, J. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams / J. Lin, P. Genevet, M.A. Kats, N. Antoniou, F. Capasso // *Nano Lett.* – 2013. – Vol. 13(9). – P. 4269-4274.
- [7] Genevet, P. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. / P. Genevet, F. Capasso // *Rep. Prog. Phys.* – 2015. – Vol. 78(2). – P. 24401.
- [8] Lin, M.-Y. Design and fabrication of birefringent nano-grating structure for circularly polarized light emission / M. Y. Lin, T.-H. Tsai, Y. L. Kang, Y.-C. Chen, Y. H. Huang, Y.-J. Chen, X. Fang, H. Y. Lin, W.-K. Choi, L.A. Wang, C. C. Wu, S.-C. Lee // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 22(7). – P. 7388-7398.
- [9] Levy, U. Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29(15). – P. 1718-1720.
- [10] Lerman, G.M. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm / G.M. Lerman, U. Levy // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33(23). – P. 2782-2784.
- [11] 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.
- [12] 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. – Vol. 54(14). – P. 4388-4394.
- [13] 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.
- [14] Yamada, I. Reflective waveplate with subwavelength grating structure / I. Yamada, T. Ishihara, J. Yanagisawa // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 54(9). – P. 092203
- [15] Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // *Nat. Mater.* – 2014. – Vol. 13(2). – P. 139-150.
- [16] Yang, Y. Dielectric Meta-Reflectarray for Broadband Linear Polarization Conversion and Optical Vortex Generation / Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I.I. Kravchenko, D.P. Briggs, J. Valentine // *Nano Lett.* – 2014. – Vol. 14(3). – P. 1394-1399.
- [17] Lan, L. Three dimensional subwavelength focus by a near-field plate lens / L. Lan, W. Jiang, Y. Ma // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102(23). – P. 231119.
- [18] Verslegers, L. Planar Lenses Based on Nanoscale Slit Arrays in a Metallic Film / L. Verslegers, P.B. Catrysse, Z. Yu, J.S. White, E.S. Barnard, M.L. Brongersma, S. Fan // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9(1). – P.235-238.
- [19] 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 Lett.* – 2012. – Vol. 12(9). – P. 4932-4936.

Binary Subwavelength Gratings for Polarization Control

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

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

³Centre for Advanced Photonics and Process Analysis, Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

Abstract. The components of microoptics with nanostructured surface for polarization control are investigated. These components include transmitting or reflecting subwavelength diffractive gratings, which have locally varying direction and filling factor of relief, but have approximately equal period and depth of the relief. The single elements of the relief can be tens and hundreds of nanometers for the visible wavelength range. Sectoral diffractive polarizers with small number of sectors, which transform linear polarization in radial or azimuthal polarization of laser light are investigated in detail.

Keywords: subwavelength grating, optical vortex, azimuthally polarized light, metasurface.