

Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии

С. С. Стафеев¹, А. Г. Налимов¹, Л. О'Фаолейн², В. В. Котляр¹

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Технологический институт Корка, Корк, Ирландия

В данной работе численно и экспериментально рассмотрены металинзы основанные на секторных субволновых решетках и предназначенные для конверсии поляризации света и острой фокусировки получившегося пучка. Показана возможность получения субволновых фокусных пятен с их помощью.

Ключевые слова: Металинза, Субволновая решетка, Острая фокусировка, СБОМ.

Цитирование: Стафеев, С. С. Металинзы для острой фокусировки света и формирования обратных потоков энергии / С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, В. В. Котляр // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 365–367.

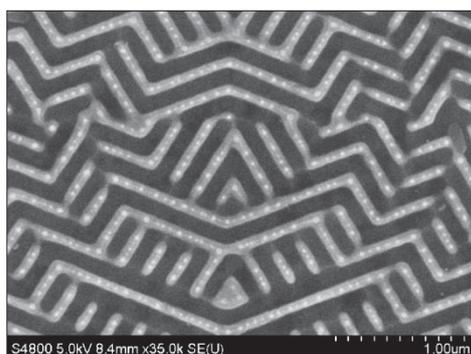
Введение

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для изменения состояния амплитуды и фазы света известны в оптике давно, но лишь относительно недавно внимание исследователей сосредоточилось на элементах, преобразующих и поляризацию света. Для этого используются дифракционные решётки с разным наклоном штрихов и с периодом меньше длины волны — субволновые решетки [1]. Показатели преломления света, проходящего через такую решётку различны для ТЕ и ТМ поляризованной волны [2,3], а следовательно, возможно создание аналогов классических волновых пластинок. Для управления поляризацией падающего света нужно рассчитать период, скважность, глубину рельефа и направление штрихов решётки в каждой точке поверхности. Для этого надо использовать строгое решение векторных уравнений Максвелла. Впервые поворот поляризации света с помощью субволновой решётки — аналога четвертьволновой пластинки, был экспериментально продемонстрирован в работах [4,5], где осуществлялось преобразование света круговой поляризации с длиной волны 10,6 мкм в азимутально-поляризованный пучок. 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 [6] впервые была экспериментально продемонстрирована работа субволновой решётки — аналога полуволновой пластинки.

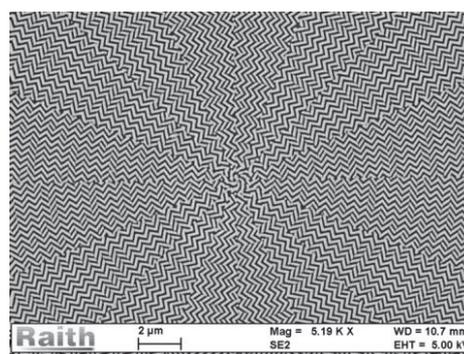
В данной работе были изготовлены, численно и экспериментально исследованы металинзы на основе субволновых решеток, предназначенные для преобразования поляризации и острой фокусировки лазерного излучения.

Металинзы для острой фокусировки лазерного излучения

Металинзы на рис. 1 были изготовлены 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. Трансформирование шаблона решётки-поляризатора с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Толщина резистора была подобраны 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.



а) Металинза для острой фокусировки лазерного излучения



б) Металинза для получения обратного потока световой энергии

Рис. 1. Изображения изготовленных металинз, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа

Металинза на рис. 1а предназначалась для преобразования линейно-поляризованного света в радиально-поляризованный пучок и его острой фокусировки. Экспериментально измеренные значения ширины пятна были равны $\text{FWHM}_x = 0,55\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,49\lambda$. Эти значения отличаются всего на 8 % от расчётных значений ($\text{FWHM}_x = 0,521\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,457\lambda$), полученных с учетом технологических погрешностей изготовления металинзы, и на 15 % от размеров фокусного пятна для идеальной металинзы ($\text{FWHM}_x = 0,434\lambda$, $\text{FWHM}_y = 0,432\lambda$), у которой нет разбросов высоты рельефа и высота рельефа равна 70 нм [7].

Металинза на рис. 1б предназначалась для получения в фокусе областей, в которых направление потока энергии было противоположно направлению распространения пучка (областей обратного потока энергии [8]). Моделирование методом FDTD, реализованным в программе FullWave показало, что металинза (рис. 1б) формирует обратный поток при освещении её светом любой поляризации: линейной, круговой правой и круговой левой [9].

Заключение

В данной работе были изготовлены, численно и экспериментально исследованы металинзы на основе субволновых решеток, предназначенные для преобразования поляризации и острой фокусировки лазерного излучения.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595).

Список источников

- [1] **Стафеев, С.С.** Бинарные дифракционные решётки для управления поляризацией и фокусировкой лазерного света / С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2017. — Том. 41. — С. 299–314.
- [2] **Lalanne, P.** On the effective medium theory of subwavelength periodic structures / P. Lalanne, D. Lemercier-Lalanne // J. Mod. Opt. — 1996. — Vol. 43. — P. 2063–2086.
- [3] **Kotlyar, V. V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V. V. Kotlyar, O. K. Zalyalov // Optik. — 1996. — Vol. 103. — P. 125–130.
- [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. — P. 1424–1426.
- [5] **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. — P. 285–287.
- [6] **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // Opt. Lett. — 2004. — Vol. 29. — P. 1718–1720.
- [7] **Котляр, В. В.** Тонкая металинза с высокой числовой апертурой / В. В. Котляр, А. Г. Налимов, С. С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2017. — Том. 41. — С. 5–12.
- [8] **Kotlyar, V. V.** Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity / V. V. Kotlyar, S. S. Stafeev, A. G. Nalimov // Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99. — P. 033840.
- [9] **Котляр, В. В.** Высокоапертурная металинза для формирования обратного потока энергии / В. В. Котляр, С. С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М. В. Котляр // Компьютерная оптика. — 2020. — Том. 44. — С. 691–698.

Metalenses for tight focusing and reverse energy flow

S. S. Stafeev¹, A. G. Nalimov¹, L. O'Faolain², V. V. Kotlyar¹

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

² Cork Institute of Technology, Cork, Ireland

In this work we have investigated numerically and experimentally metalenses based on sectoral subwavelength gratings and designed for polarization conversion and tight focusing of the incident beam. It was demonstrated the possibility of obtaining subwavelength focal spots using these metalenses.

Keywords: Metalens, Subwavelength, Grating, Tight focusing, SNOM.