

ОТРАЖАЮЩИЙ ЧЕТЫРЁХЗОННЫЙ СУБВОЛНОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ МИКРООПТИКИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В РАДИАЛЬНУЮ

Налимов А.Г.^{1,2}, О' Фаолейн Л.³, Стафеев С.С.^{1,2}, Шанина М.И.^{1,2}, Котляр В.В.^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет),

³ Школа физики и астрономии Университета Сент-Эндрюса, Шотландия

Аннотация

Рассчитан и изготовлен четырёхзонный субволновый бинарный дифракционный оптический микроэлемент (размером 100×100 мкм) для преобразования поляризации из линейной в радиальную. Период решёток равен 400 нм, и высота субволнового микрорельефа в плёнке золота для длины волны света 633 нм составила всего 110 нм. Моделирование FDTD-методом и с помощью интеграла Релея–Зоммерфельда показало, что, несмотря на наличие всего четырёх зон, поворачивающих поляризацию падающего пучка на четыре различных угла, в дальней зоне формируется радиально-поляризованный пучок с гладким изменением поляризации по его окружности. Экспериментально показано, что в ближней зоне в зависимости от направления оси поляризатора на выходе светлыми оказываются две зоны 4-зонного микроэлемента по одной или по другой диагонали, что доказывает наличие радиальной поляризации в отражённом пучке.

Ключевые слова: радиальная поляризация, отражающая субволновая дифракционная решётка в плёнке золота.

Введение

Использование субволновых дифракционных решёток для манипулирования состоянием поляризации лазерного света и формирования заданного распределения интенсивности в некоторой плоскости было предложено в [1]. В [2–8] предложено использовать субволновые дифракционные решётки для преобразования поляризации лазерного излучения. При падении линейно-поляризованного света на такую решётку поляризация поворачивается в зависимости от угла между направлением вектора поляризации падающего излучения и направлением линий или канавок решётки. В [2] для преобразования лазерного пучка света с длиной волны 10,6 мкм с круговой поляризацией в пучок с азимутальной поляризацией использована бинарная амплитудная субволновая дифракционная решётка с искривлёнными линиями и изменяющимся периодом. Такая решётка на просвет была изготовлена с помощью напыления на подложку из GaAs золотых полосок, которые поглощали свет. Период решётки менялся от 2 мкм до 3 мкм, радиус всего элемента был равен 9,6 мм. В [3] уже используется более эффективная фазовая дифракционная решётка, которая преобразует свет с левой круговой поляризацией в пучок с радиальной поляризацией, а свет с правой круговой поляризацией – в пучок с азимутальной поляризацией. Сама решётка была протравлена в подложке из GaAs (показатель преломления $n=3,13$) диаметром 10 мм, период решётки локально менялся от 2 мкм до 3 мкм, глубина травления была равна 2,5 мкм, длина волны света – 10,6 мкм. Однако решётка давала такую радиальную поляризацию, что на любом диаметре точки поля, расположенные на одинаковом расстоянии с разных сторон от центра пучка, колебались в фазе. А для стандартной радиальной поляризации нужно, чтобы эти точки колебались в противофазе. Такая «неправильная» радиальная поляризация приводит к тому, что в дальней зоне лазерный пучок

имеет в центре максимум интенсивности, окружённый ярким кольцом. В [4] показано экспериментально, что с помощью дополнительной спиральной фазовой пластинки [5] можно «неправильную» радиальную поляризацию преобразовать в правильную. В [6] усовершенствовали решётку, которую использовали в [3, 4], сделав её бороздки с сечением в виде трапеции и глубиной 5,5 мкм. Такая глубина рельефа для показателя преломления 3,13 (для длины волны 10,6 мкм) даёт требуемую задержку по фазе π . Данная решётка преобразовывала лазерный свет с круговой поляризацией в радиально-поляризованный свет с высокой точностью. Преобразователь поляризации для ближнего ИК-диапазона (для длины волны 1,064 мкм) исследовался в [7]. В [7] была также использована бинарная субволновая решётка на GaAs ($n=3,478$), но уже для длины волны $\lambda=1,06$ мкм. Диаметр решётки – 1 мм, период штрихов – 240 нм, а глубина канавок – 470 нм. Решётка преобразовывала лазерный пучок с линейной поляризацией в пучок с радиальной поляризацией. В дальней зоне дифракционная картина такого пучка имеет вид светлого кольца. В [8] применялся другой оптический элемент: азимутально-поляризованный лазерный пучок формировался с помощью многослойной субволновой решётки с двулучепреломлением на длине волны 1,55 мкм. Такая решётка создавалась по технологии литографического клонирования, когда на исходную профилированную поверхность решётки напыляют диэлектрические плёнки, слой за слоем, так что они повторяют профиль исходной решётки. Период решётки – 400 нм. Напылялись 64 чередующихся слоя из SiO₂ ($n=1,446$) и SiN ($n=1,977$) общей высотой 8 мкм. В дальней зоне формировалось светлое кольцо.

В рассмотренных выше работах [2–4, 6–8] все оптические элементы работали на просвет. В этом случае, чтобы глубина рельефа решётки и её аспектное отношение (отношение глубины рельефа к поперечному размеру линии решётки) были небольшими, ис-

пользовался свет дальнего [2–4, 6] и ближнего [7, 8] ИК-диапазонов и диэлектрик с высоким показателем преломления (GaAs). Например, для телекоммуникационной длины волны $\lambda=1,55$ мкм и решётки-поляризатора из кремния с показателем преломления $n=3,47$ оптимальная глубина рельефа [9] равна 0,62 мкм (0,4 λ). Для видимого света таких решёток-преобразователей поляризации не описано. Это связано с тем, что субволновая решётка такого оптического элемента из-за малой длины волны ($\lambda=633$ нм) и небольшого показателя преломления материала ($n=1,5$) должна иметь относительно большое aspectное отношение (около 5). Если же использовать решётку-поляризатор на отражение, то глубину рельефа можно уменьшить, по крайней мере, в 2 раза.

В данной работе исследуется отражающая четырёхзонная бинарная субволновая микрорешётка для преобразования линейной поляризации лазерного света видимого диапазона в радиально поляризованный пучок.

1. Определение оптимальных параметров решётки-поляризатора

Моделирование проводилось с помощью разностного решения уравнений Максвелла FDTD-методом, реализованным в программе Fullwave. Был рассчитан ДОЭ (решётка-поляризатор) для преобразования поляризации, рельеф которого выполнен в золоте. Выбор материала был обусловлен хорошей отражательной способностью и возможностью изготовить ДОЭ средствами электронной литографии. На рис. 1 представлена взаимосвязь между направлением падающего и отражённого от ДОЭ векторов напряжённости электрического поля световой волны.

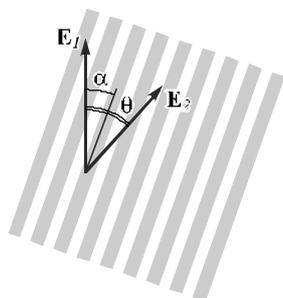


Рис. 1. Взаимосвязь между направлением падающего E_1 и отражённого E_2 от ДОЭ векторов электрической компоненты света

Здесь α – угол между направлением линий дифракционной субволновой решётки и направлением вектора падающего электрического поля, θ – угол между векторами электрических компонент падающего и отражённого от ДОЭ света, E_1 – вектор падающего электрического поля, E_2 – вектор отражённого электрического поля. На рис. 2 представлена зависимость между углами α и θ для решётки с высотой субволнового рельефа $h=110$ нм, выполненной в золоте (показатель преломления золота для длины волны $\lambda=633$ нм был принят $n=0,312+3,17i$). Высота рельефа выбрана оптимальной для наименьшей эллиптичности отражённой поляризации (отношение малого и большого ради-

усов эллипса менее 1:5), период дифракционной решётки был выбран $T=0,4$ мкм. Выбор периода решётки обусловлен наилучшим соотношением между возможностью его качественного изготовления и работоспособностью. Если период сделать больше, вырастает эллиптичность поляризации, если меньше – решётку с таким периодом будет сложнее изготовить.

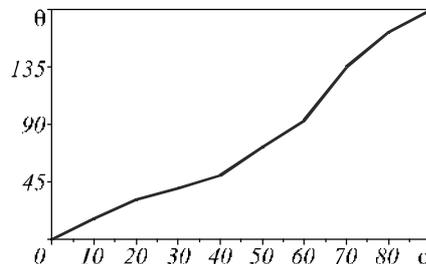


Рис. 2. Зависимость угла поляризации θ от угла падающего поля α к линиям решётки (рис. 1)

Из графика видно, что при углах поворота линий решётки α от 0 до 90° угол изменения поляризации выходного пучка поворачивается от 0 до 180°. То есть, манипулируя углом линий дифракционной решётки от -90° до 90° , можно сформировать на выходе любую требуемую поляризацию. Однако при преобразовании поляризации обычно нужно сохранить заданную интенсивность света. На рис. 3 показана зависимость интенсивности отражённого света от угла α наклона штрихов решётки к электрическому вектору.

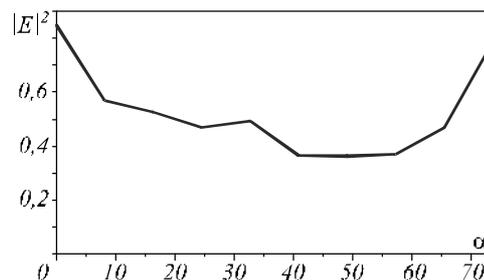


Рис. 3. Зависимость интенсивности отражённого света $|E|^2$ от угла α падающего поля

Как видно из рис. 3, интенсивность отражённого света имеет сильную зависимость от угла α . В среднем эффективность преобразования поляризации составляет 40-50%. Для уменьшения разностей в интенсивности отражённого от каждой зоны ДОЭ света весь элемент был поделён на четыре зоны. Таким образом, была получена возможность расположить углы α внутри каждой зоны в пределах схожих коэффициентов отражения. Углы поляризации θ составляли $-135^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 135^\circ$, углы линий решёток α для этого были использованы $-70^\circ, -40^\circ, 40^\circ, 70^\circ$ соответственно. На рис. 4 представлен внешний вид полученной структуры.

У показанного на рис. 4 ДОЭ зоны 1, 4 представляют собой дифракционные решётки с углами $\alpha=-70^\circ$ и 70° , зоны 2 и 3 – с углами $\alpha=-40^\circ$ и 40° . Коэффициент отражения от зон 1, 4 составляет 0,35, от зон 2, 3 – 0,49. Такой ДОЭ будет работать с любым периодом решётки менее длины волны падающего света, однако для уменьшения разницы в интенсивности отражения света от разных зон период зон 1, 4 можно несколько увеличить.

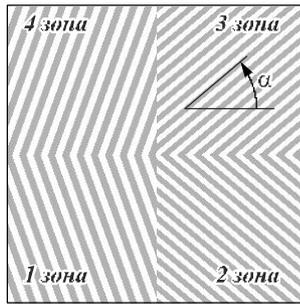


Рис. 4. Внешний вид ДОЭ (решётки-поляризатора)

На рис. 5 показана зависимость коэффициента отражения света от зон 3 и 4 с углом наклона 40° и 70° от периода решёток.

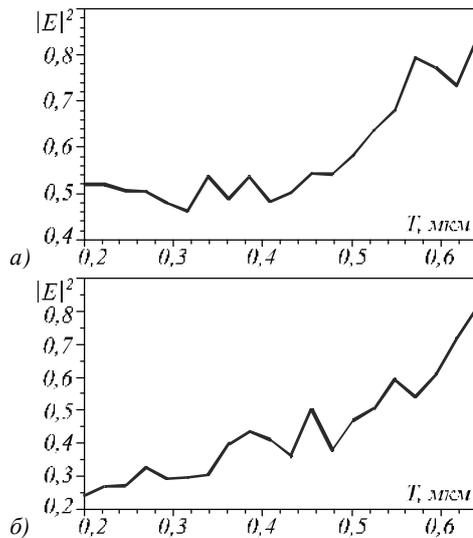


Рис. 5. Зависимость отражённой интенсивности $|E|^2$ от периода T решётки, $\lambda=633$ нм, высота $h=110$ нм, угол поворота а) $\alpha=40^\circ$, б) $\alpha=70^\circ$. За единицу принято отражение от гладкой поверхности без решётки

Как видно из рис. 5, некоторое увеличение периода решётки в зоне с углом $\alpha=70^\circ$ даст прирост интенсивности отражённого света приблизительно на 11%. Увеличение периода дифракционной решётки выше 0,46 мкм приводит к дальнейшему росту коэффициента отражения, однако появляется эллиптичность в отражённом от ДОЭ свете и при дальнейшем увеличении периода решётка перестаёт работать как поляризатор. В качестве компромисса период решётки с углом наклона линий α , равным -70° , 70° , в зонах 1, 4 был принят $T=0,46$ мкм. Ограничение на минимальный период решётки с углом $\alpha=40^\circ$ носит технический характер, обуславливающий возможность изготовления средствами электронной литографии. Этот период составил $T=0,4$ мкм.

На рис. 6 показана интенсивность $|E|^2$ отражённой от ДОЭ плоской световой волны с линейной поляризацией (плоскость поляризации совпадает с плоскостью XZ), падающей перпендикулярно на него. Были приняты: заполнение каждой зоны – 0,5 (скважность 2), размер области моделирования FDTD-методом – $(20 \times 20 \times 1,11)$ мкм, сетка разбиения – $\lambda/30$ по всем трём координатам. Дифракционная решётка имеет

показатель преломления $n=0,312+3,17i$ (золото), высота рельефа решётки $h=110$ нм.

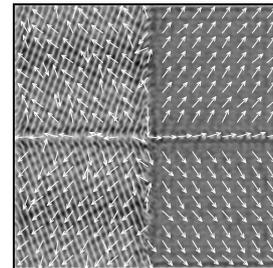


Рис. 6. Интенсивность $|E|^2$ отражённого от ДОЭ света (негатив). Стрелками показано направление поляризации

Эффективность преобразования поляризации составила $\eta=39\%$. За 100% принято отражение от идеального зеркала. Из рис. 6 видно, что элемент формирует в отражённом пучке 4 зоны, каждая из которых содержит преимущественно одну поляризацию. Линии поляризации в областях 1 и 3 (рис. 4) почти параллельны друг другу, но направлены в разные стороны (разница в фазе между этими зонами составляет π). То же самое можно сказать про зоны 2 и 4. То есть направление поляризации на рис. 6 соответствует радиально поляризованному свету. Местами переналоженные друг на друга стрелки объясняются тем, что они отображают противоположные по направлению поляризации в двух разных точках на рисунке, отстоящих относительно друг друга на длину стрелки. Такое происходит из-за наличия полос минимумов и максимумов интенсивности близко к дифракционной решётке, имеющей максимально возможный период. В этом случае различия фазы при правильной плоскости поляризации в двух точках приводят к противоположным направлениям стрелок, поскольку направление стрелки с точностью до π зависит от фазы колебаний электрического вектора.

2. Моделирование распространения и фокусировки отражённого света

На рис. 7 показана интенсивность отражённого света и распределение поляризации в нём на разных расстояниях от решётки-поляризатора.

Начиная с расстояния $z \approx 300$ мкм, распределение интенсивности и поляризации в пучке перестаёт изменяться, однако весь пучок постепенно расширяется в поперечной плоскости. За счёт меньшего коэффициента отражения от зон 1 и 4 интенсивность пучка в области отрицательных значений вдоль оси X ослаблена, что ведёт к сдвигу нуля интенсивности вдоль оси X (и линейному наклону фазы светового поля). На расстоянии 10 мм от решётки-поляризатора смещение центра пучка (нуля интенсивности в центре) составляет приблизительно 111 мкм. В установившемся распределении интенсивности в отражённом пучке преобладают четыре области с четырьмя составляющими радиальной поляризации.

Для определения эффективности фокусировки светового пучка с полученными поляризацией и распределением интенсивности была промоделирована

фокусировка света с помощью бинарного микроаксикона с периодом $T=\lambda$ на расстоянии $\lambda/2$ от его поверхности. Отражение света от ДОО (рис. 6) было промоделировано методом FDTD (948×948 отсчётов), а далее (рис. 7) с помощью векторного интеграла Релея–Зоммерфельда было рассчитано световое поле на расстоянии $z=200$ мкм от ДОО. Так как в полученном распределении интенсивности поля центр декартовой системы координат не совпадает с центром пучка (с нулём интенсивности на рис. 7), то микроаксикон был смещён вдоль горизонтальной оси X на $2,18$ мкм, чтобы центр аксикона совпал с центром освещающего пучка (рис. 7в). Прохождение света через субволновый аксикон было рассчитано с помощью FDTD-метода. Показатель преломления материала аксикона $n=1,5$, высота бинарного микрорельефа аксикона составляла $h=1,266$ мкм. Подложка у аксикона не учитывалась, т.е. кольца аксикона «висели» в свободном пространстве. Интенсивность $|E|^2$ рассчитывалась на расстоянии $\lambda/2$ от поверхности аксикона, где имеется максимум продольной интенсивности.

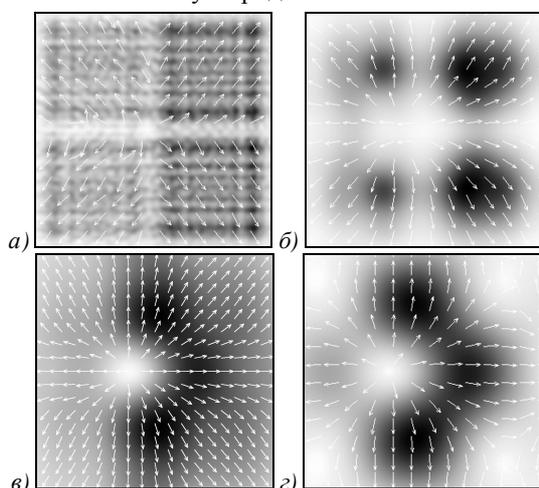


Рис. 7. Распределение интенсивности $|E|^2$ (градации серого, негатив), поляризации (стрелки) в отражённом пучке на разных расстояниях z : $5,2$ мкм (а), 100 мкм (б), 200 мкм (в), 10 мм (г). Размер приведённых полей интенсивности составил: 20×20 мкм (а–в), 800×800 мкм (г). Оптическая ось проходит по центру кадра

На рис. 8 показаны результаты моделирования фокусировки света при наличии и отсутствии микрорельефа у ДОО-поляризатора (рис. 4).

Сфокусированная плоская волна формирует эллиптическое пятно шириной по полуспаду интенсивности равной $\text{FWHM}_x=0,64\lambda$ и $\text{FWHM}_y=0,305\lambda$ вдоль осей X и Y . В случае фокусировки радиально поляризованного света (рис. 7в) эти же значения ширины фокуса равны $\text{FWHM}_x=0,407\lambda$ и $\text{FWHM}_y=0,351\lambda$. Это фокусное пятно по обем координатам имеет размер меньше дифракционного предела $\text{FWHM}=0,51\lambda$. Таким образом, несмотря на погрешность формирования поляризованного света с помощью рассматриваемого ДОО, вызванную малым количеством зон и различным коэффициентом отражения света от них, элемент формирует световой пучок, который существенно отличается

по своим свойствам от линейно поляризованного света и может быть использован в задачах острой фокусировки света со сверхразрешением.

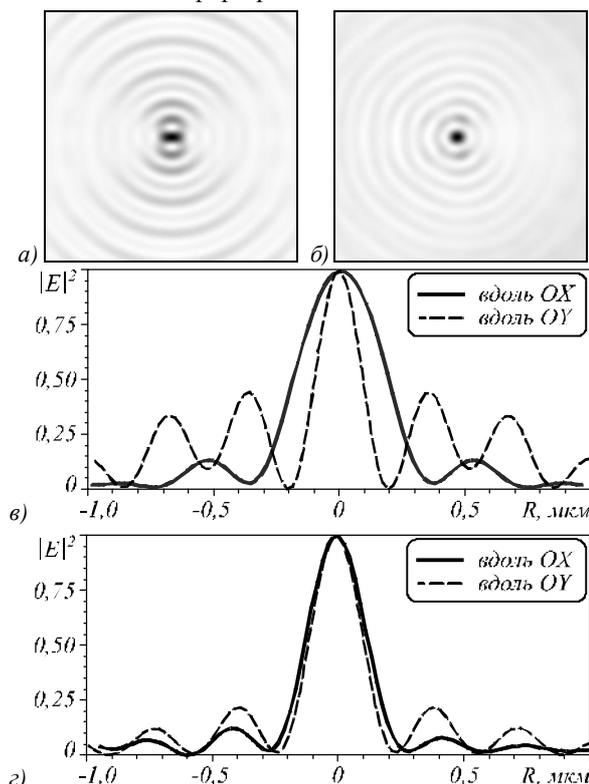


Рис. 8. Фокусировка линейно поляризованной плоской волны (а, в) и радиально поляризованного света (б, г), отражённого от решётки-поляризатора (рис. 7в), на расстоянии $\lambda/2$ за аксиконом. Приведены интенсивности $|E|^2$ (негативы) фокусных пятен (а, б) и сечения через центр пятна (в, г) вдоль горизонтальной оси X и вертикальной оси Y

3. Изготовление отражающей решётки-поляризатора

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 (рис. 4). Затем образец травился в ксилене, который растворяет участки резиста, экспонированные пучком электронов. Далее с помощью реактивного ионного травления шаблон решётки-поляризатора (рис. 4) трансформировался в слой золота. С помощью аргоновой плазмы частицы золота расплылись из участков, не защищённых резистом. На заключительном этапе остатки резиста удалялись с использованием кислородной плазмы, в результате чего шаблон поляризатора был выгравирован на золоте. Время реактивного ионного травления было оптимизировано таким образом, чтобы достичь глубины травления золота примерно 110

На рис. 9 с помощью сканирующего электронного микроскопа показано изображение центральной части решётки-поляризатора. Полный размер поляризатора – 100×100 мкм.

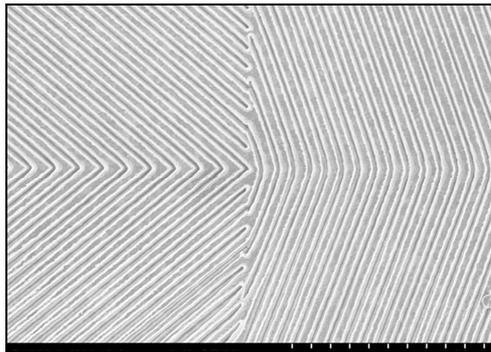


Рис. 9. Изображение в электронном микроскопе центральной части (13×13) мкм золотой бинарной субволновой 4-секторной решётки-поляризатора: период – 400 нм, глубина канавок – 110–120 нм

4. Эксперимент в ближней зоне

Наглядное доказательство радиальной поляризации отражённого света дано в эксперименте, проведённом в ближней зоне дифракции. С помощью оптической схемы, показанной на рис. 10, проведён эксперимент по демонстрации наличия радиальной поляризации при регистрации отражённого от 4-зонного оптического элемента (решётки-поляризатора на рис. 9) лазерного излучения с длиной волны 633 нм в ближней зоне. Свет от гелий-неонового лазера (с длиной волны 633 нм) проходил через фильтр нейтральной интенсивности ND и поляризатор P1, после чего фокусировался с помощью длиннофокусной линзы L (фокусное расстояние $f=25$ см) и светоделительного кубика BS на подложку, на которой располагались исследуемые четырёхзонные элементы. Свет, отражённый от пластины, проходил через светоделительный кубик BS и попадал через 10-кратный объектив O на CCD-камеру. Между объективом O и CCD-камерой помещался поляризатор P2, который позволял «заглушить» излучение входного пучка, отражённое от зеркальной поверхности, окружающей четырёхзонный элемент.

На рис. 11 показано изображение поверхности 4-зонного элемента 100×100 мкм (рис. 9), когда ось поляризатора на выходе из оптической системы повернута на 45 градусов к горизонтальной оси.

На рис. 12 показано то же, что и на рис. 11, но ось поляризатора на выходе из оптической системы повернута на 135 градусов по отношению к горизонтальной оси. На рис. 11 и 12 видно, что из четырёх зон светлыми оказываются только две квадратные зоны элемента (рис. 9), расположенные по диагонали, параллельной направлению оси выходного поляризатора. Этот эксперимент доказывает работоспособность созданного преобразователя поляризации (рис. 9), который линейную поляризацию преобразует в радиальную.

На рис. 13 изображение 4-зонного элемента (рис. 9), когда ось поляризатора на выходе оптической схемы (рис. 10) направлена вертикально (падающий свет имел линейную поляризацию, направленную горизонтально). При этом светлыми оказываются все четыре зоны элемента (рис. 9). Причём коэффициент отражения от двух правых зон больше, чем от двух левых. Это согласуется с результатами моделирования, показанными на рис. 6 и рис. 7а.

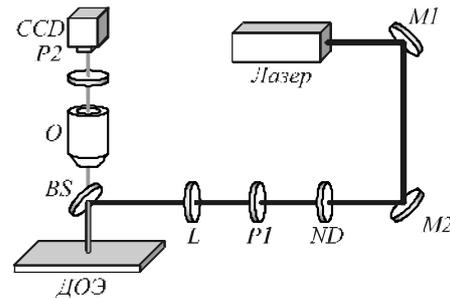


Рис. 10. Оптическая схема эксперимента. Лазер – He-Ne лазер, M1, M2 – зеркала, ND – фильтр нейтральной интенсивности, P1, P2 – поляризаторы, L – линза с фокусным расстоянием $f=25$ см, BS – светоделительный кубик, ДОЭ – подложка с расположенными на ней четырёхзонными элементами, O – объектив с десятикратным увеличением, CCD – камера. Чёрным цветом показан путь луча, падающего на элемент, серым – путь регистрируемого луча

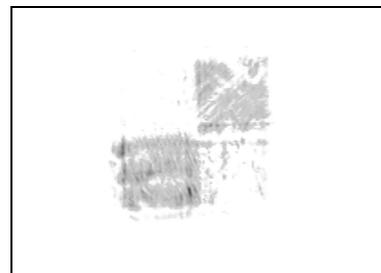


Рис. 11. Изображение (негатив) 4-зонного элемента (рис. 9) в лазерном свете, когда ось поляризатора на выходе (перед CCD-камерой) направлена под углом 45 градусов к горизонтальной оси

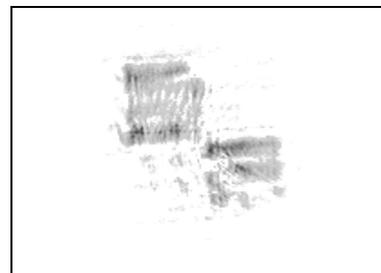


Рис. 12. Изображение (негатив) 4-зонного элемента (рис. 9) в лазерном свете, когда ось поляризатора на выходе (перед CCD-камерой) направлена под углом 135 градусов к горизонтальной оси

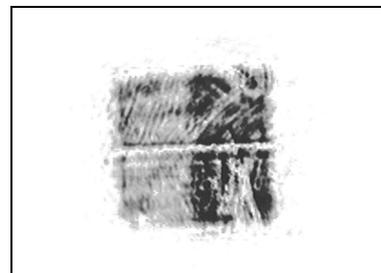


Рис. 13. Изображение (негатив) 4-зонного элемента (рис. 9) в лазерном свете, когда ось поляризатора на выходе (перед CCD-камерой) направлена под углом 90 градусов к горизонтальной оси

В дальнейшем авторы планируют использовать этот компактный преобразователь поляризации (рис. 9)

совместно с бинарным микроаксиконом [10] и бинарной микролинзой [11] для того, чтобы провести эксперимент по субволновой фокусировке лазерного света, аналогичный показанному на рис. 8.

Заключение

В работе получены следующие результаты:

- рассчитан и изготовлен отражающий четырёхзонный субволновый бинарный дифракционный оптический элемент для преобразования поляризации из линейной в радиальную; для длины волны света 633 нм высота субволнового микрорельефа в плёнке золота составила всего 110 нм, период решётки – 400 нм, коэффициент отражения – 39 %;
- моделирование FDTD-методом и с помощью интеграла Релея–Зоммерфельда показало, что, несмотря на наличие всего четырёх зон, поворачивающих поляризацию падающего пучка на четыре различных угла, в дальней зоне формируется радиально-поляризованный пучок с гладким изменением поляризации по окружности;
- экспериментально показано, что в ближней зоне (в плоскости изображения поверхности четырёхзонного преобразователя) в лазерном свете с длиной волны 633 нм из четырёх зон светлыми оказываются по две зоны, расположенные по диагонали, параллельной оси поляризатора, который находится на выходе оптической системы перед плоскостью регистрации; это однозначно доказывает, что отражённый свет радиально поляризован.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Морозову и А.П. Порфирьеву за помощь при проведении эксперимента.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9), молодого доктора наук (МД-1929.2013.2) и молодого кандидата наук (МК-4816.2014.2), а также грантов РФФИ 13-07-97008, 14-07-31092 и 14-07-97039.

Литература

1. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1996. – V. 103, Issue 3. – P. 125-130.
2. **Bozom, Z.** Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bozom, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – V. 26, Issue 18. – P. 1424-1426.
3. **Bozom, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bozom, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2002. – V. 27, Issue 5. – P. 285-287.
4. **Niv, A.** Formation of linearly polarized light with axial symmetry by use of space-variant subwavelength gratings / A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2003. – V. 28, Issue 7. – P. 510-512.
5. **Котляр, В.В.** Вихревые лазерные пучки / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв. – Самара: ИСОИ РАН, 2012. – 248 с.

6. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – V. 29, Issue 15. – P. 1718-1720.
7. **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.
8. **Mehta, A.** Spatially polarizing autocloned elements / A. Mehta, J.D. Brown, P. Srinivasan, R. Rumph [et al.] // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32, Issue 13. – P. 1935-1937.
9. **Ковалёв, А.А.** Аналитическое описание радиально и азимутально поляризованного света и моделирование преобразования поляризации с помощью субволновых ДОО / А.А. Ковалёв, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 393-400.
10. **Kotlyar, V.V.** Tight focusing with a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36, Issue 16. – P. 3100-3102.
11. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Yu. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52, Issue 3. – P. 330-339.

References

1. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1996. – V. 103, Issue 3. – P. 125-130.
2. **Bozom, Z.** Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bozom, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – V. 26, Issue 18. – P. 1424-1426.
3. **Bozom, Z.** Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings / Z. Bozom, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2002. – V. 27, Issue 5. – P. 285-287.
4. **Niv, A.** Formation of linearly polarized light with axial symmetry by use of space-variant subwavelength gratings / A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2003. – V. 28, Issue 7. – P. 510-512.
5. **Kotlyar, V.V.** Vortex laser beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev. – Samara: "IPSI RAS" Publishers, 2012. – 248 p. – (In Russian).
6. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – V. 29, Issue 15. – P. 1718-1720.
7. **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.
8. **Mehta, A.** Spatially polarizing autocloned elements / A. Mehta, J.D. Brown, P. Srinivasan, R. Rumph [et al.] // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32, Issue 13. – P. 1935-1937.
9. **Kovalev, A.A.** Analytical description of radial and azimuthal polarized light and modeling of polarization conversion by subwavelength DOE / A.A. Kovalev, A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33(4). – P. 393-400. – (In Russian).
10. **Kotlyar, V.V.** Tight focusing with a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, L. O'Faolain, V.A. Soifer // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36 (16). – P. 3100-3102.
11. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linear polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Yu. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52, Issue 3. – P. 330-339.

REFLECTED FOUR-ZONES SUBWAVELENGTH MICROOPTICS ELEMENT FOR POLARIZATION CONVERSION FROM LINEAR TO RADIAL

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

¹ Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,

² Samara State Aerospace University,

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

Abstract

A four zone subwavelength binary diffraction optical micro element (size of 100x100 mkm) for polarization transformation from linear to radial was calculated and designed. A grating period was equal to 400 nm, a height of the element was equal to 110 nm in a gold film for a wavelength of 633 nm. Simulation by FDTD method and Rayleigh-Zommerfeld integral shown, that despite only four zones used for polarization transformation to four different angles there are radial polarized light beam in the far field with smooth angle dependence on the beam circle observation position. Experimentally shown that in the near field, depending on the direction of the axis of the polarizer on the output light are two zones 4-zone trace element for one or the other diagonal, which proves the presence of radial polarization in the reflected beam.

Key words: radial polarization, diffraction subwavelength grating in gold film.

Сведения об авторах



Налимов Антон Геннадьевич, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 78 работ и 3 патентов.

Anton Gennadyevich Nalimov (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 "Mathematical modeling and program complexes", graduated from in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". Nalimov A.G. works on Technical Cybernetics department in SSAU as

an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 78 papers and 3 inventions.



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 он 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 the 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. He also keeps records of the groups Fabrication Processes. Now he is working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index.



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: sergev.stafeev@gmail.com.

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



Шанина (Котляр) Маргарита Иннокентьевна. В 1979 г. окончила физический факультет Куйбышевского государственного университета, где одновременно получила квалификацию переводчика в сфере профессиональной деятельности. 1981-1982 работала инженером на заводе «Экран». В 1981-1990 работала преподавателем физики, математики и информатики в медицинском училище. С 1990 года работает в ИСОИ РАН на должности инженера, затем ведущего переводчика. С 1993 г. по настоящее время по совместительству работает инженером в НИЛ-35 СГАУ. В 2009, 2010 и 2013 годах была с исследовательскими визитами в группе микрофотоники в Школе физики и астрономии университета Сэнт-Эндрюса в Шотландии, где занималась изготовлением устройств нанофотоники. Имеет 6 научных публикаций.

E-mail: rita@smr.ru .

Margarita Innokentievna Shanina (Kotlyar). Graduated from Kuibyshev State University's Physics department in 1979, simultaneously completing an optional university course in profession-related translation. In 1981-1982 worked as an engineer at "Ekran" plant. In 1982-1990 taught physics and informatics in a medical college. In 1990 joined the Image Processing Systems Institute of the RAS as an engineer, later taking the position of the leading translator. Since 1993 has worked part-time as a laboratory assistant and then an engineer with Samara State Aerospace University. In 2009, 2010, 2013 paid research visits to the Microphotonics Research group of the School of Physics and Astronomy of St. Andrews University (Scotland) aimed at fabricating nanophotonics devices. She is a co-author of six scientific publications.

Сведения об авторе Котляр Виктор Викторович см. стр. 169 этого номера.

Поступила в редакцию 26 февраля 2014 г.