

ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА СМЕШАННОГО ЛИНЕЙНО-РАДИАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА БИНАРНОЙ МИКРОЛИНЗОЙ

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

³ Школа физики и астрономии Университета Сент-Эндрюса, Шотландия

Аннотация

С помощью бинарной микролинзы в резисте диаметром 14 мкм и фокусом 532 нм (числовая апертура 0,997) лазерный пучок с длиной волны 633 нм со смешанной линейно-радиальной поляризацией, сформированной при отражении линейно-поляризованного Гауссова пучка от четырёхзонного субволнового бинарного дифракционного оптического микроэлемента (микрополяризатора) с золотым покрытием и размером 100×100 мкм, был сфокусирован вблизи поверхности микролинзы в почти круглое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности $0,37 \pm 0,02$ и $0,39 \pm 0,02$ от длины волны. В случае фокусировки линейно-поляризованного света (при прочих равных условиях) формировалось эллиптическое фокусное пятно с размерами $0,35 \pm 0,02$ и $0,41 \pm 0,02$ от длины волны. При этом площади обоих фокусных пятен равны 0,113 от квадрата длины волны. Субволновая фокусировка с помощью двух компонент микрооптики (бинарных микролинзы и микрополяризатора) осуществлена впервые.

Ключевые слова: радиальная поляризация, отражающая субволновая дифракционная решётка в плёнке золота, бинарная микролинза, субволновый фокус, ближнепольная микроскопия.

Введение

Использование субволновых дифракционных решёток для манипулирования состоянием поляризации лазерного света и формирования заданного распределения интенсивности в некоторой плоскости было предложено в [1]. В [2–7] 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. Все решётки в [2–7] работают на пропускание и сделаны из разных материалов для разных длин волн инфракрасного диапазона. В [2–5] использовались решётки из GaAs для длины волны 10,6 мкм. При этом глубина травления решётки-поляризатора была равна 2,5 мкм. А в [6] для длины волны 1,06 мкм использовалась решётка в GaAs с периодом 240 нм и глубиной травления 470 нм. В [7] азимутально-поляризованный лазерный пучок формировался с помощью многослойной субволновой решётки с двулучепреломлением на длине волны 1,55 мкм. Использовались чередующиеся слои из SiO₂ и SiN общей высотой 8 мкм. Сделать субволновую решётку на просвет для видимого диапазона составляет большие трудности из-за высокого аспектного отношения (около 5). Поэтому в [8] для формирования радиальной поляризации света с длиной волны 633 нм была использована отражающая 4-зонная бинарная решётка в плёнке золота с периодом 400 нм и глубиной 110 нм.

В работах авторов [9–11] была экспериментально осуществлена острая фокусировка линейно-поляризованного лазерного света с помощью компонент микрооптики. В [9] использовался бинарный

микроаксикон с периодом кольцевой решётки 800 нм (числовая апертура NA = 0,67). В [10] была использована бинарная микролинза с фокусным расстоянием $f = 0,532$ мкм, диаметром 14 мкм и глубиной рельефа 510 нм. С помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ) исследовалось прохождение линейно-поляризованного Гауссова пучка с длиной волны $\lambda = 532$ нм через такую микролинзу. Было экспериментально зарегистрировано фокусное пятно с диаметром по полуспаду интенсивности, равным $\text{FWHM} = (0,44 \pm 0,02)\lambda$. Замена длины волны 532 нм на 633 нм в [11] позволила сформировать с помощью той же микролинзы меньшее фокусное пятно с диаметром $\text{FWHM} = (0,40 \pm 0,02)\lambda$.

Работы по субволновой фокусировке света с радиальной и азимутальной поляризацией также хорошо известны [12–15]. В этих работах экспериментально и численно получены фокусные пятна с размерами $\text{FWHM} = 0,43\lambda$ (NA = 0,95) [12,14], $\text{FWHM} = 0,30\lambda$ (NA = 1,4) [13]. В [13] с таким разрешением экспериментально осуществлена запись 3 Тбит информации на обычный оптический диск.

В данной работе с помощью бинарной микролинзы в резисте диаметром 14 мкм с фокусом 532 нм (числовая апертура 0,997) лазерный пучок с длиной волны 633 нм со смешанной линейно-радиальной поляризацией, сформированной при отражении линейно-поляризованного Гауссова пучка от четырёхзонного субволнового бинарного дифракционного оптического микроэлемента (микрополяризатора) с золотым покрытием и размером 100×100 мкм, был сфокусирован вблизи поверхности микролинзы в почти круглое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности $0,37 \pm 0,02$ и $0,39 \pm 0,02$ от длины волны. Измерение размеров фокусного пятна с шагом 20 нм производилось с помощью СБОМ с металлическим

пирамидальным полым кантилевером с углом при вершине в 70 градусов и с отверстием 100 нм. Такой кантилевер в 3 раза более чувствителен к поперечной составляющей напряжённости электрического поля, чем к продольной [16].

1. Отражающий бинарный микрополяризатор

По технологии электронной литографии на поверхности 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) проектировалась картина 4-секторной решётки-поляризатора. Затем образец травился в ксилене, который растворяет участки резиста, экспонированные пучком электронов. Далее с помощью реактивного ионного травления шаблон решётки-поляризатора 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 нм.

На рис. 1 с помощью сканирующего электронного микроскопа показано изображение центральной части решётки-поляризатора. Полный размер поляризатора – 100×100 мкм. На рис. 1 приведён образец микрополяризатора с улучшенным фактором заполнения (фактор заполнения равен 0,5) по сравнению с [8].

При отражении белого света с линейной поляризацией от такого микрополяризатора (рис.1) в плоскости изображения его поверхности тёмными (или светлыми) являются только две из четырёх секций (рис. 2), если наблюдать через поляризатор, повернутый на +45 или -45 градусов по отношению к плоскости поляризации падающего света.

Из рис. 2 видно, что у пучка, отражённого от каждого микрополяризатора, нет круговой симметрии и средняя интенсивность в двух диагональных квадратах разная. В дальней зоне это приводит к тому, что формируется не кольцевое распределение интенсив-

ности, как это имеет место у пучка с идеальной радиальной поляризацией, а пучок, похожий на квадрат, у которого при повороте выходного поляризатора на +45 и -45 градусов максимумы интенсивности (рис. 3) тоже расположены по диагонали (как на рис. 2). Данный световой пучок имеет смешанную линейно-радиальную поляризацию.

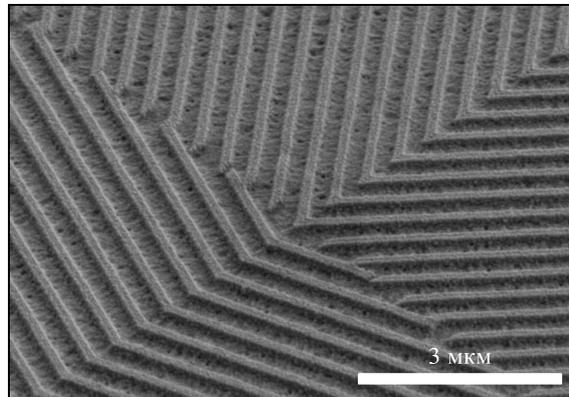


Рис. 1. Изображение в электронном микроскопе центральной части (13×13) мкм золотой бинарной субволновой 4-секторной решётки-поляризатора: период – 400 нм, глубина канавок – 110±10 нм

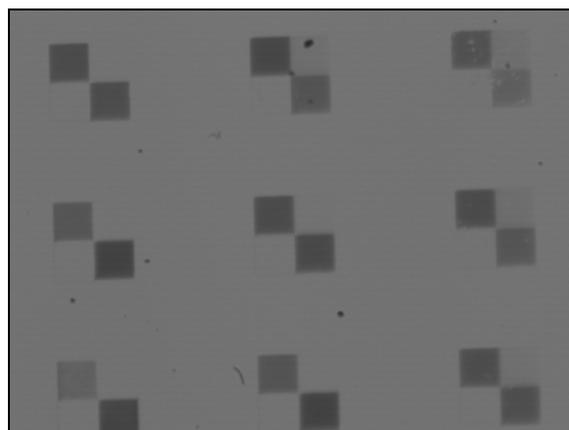


Рис. 2. Изображение в белом свете с линейной поляризацией золотой подложки, на которой изготовлены 9 образцов микрополяризаторов (рис. 1) при наблюдении через поляризатор, повернутый на -45 градусов. Истинный размер каждого тёмного квадрата – около 50×50 мкм

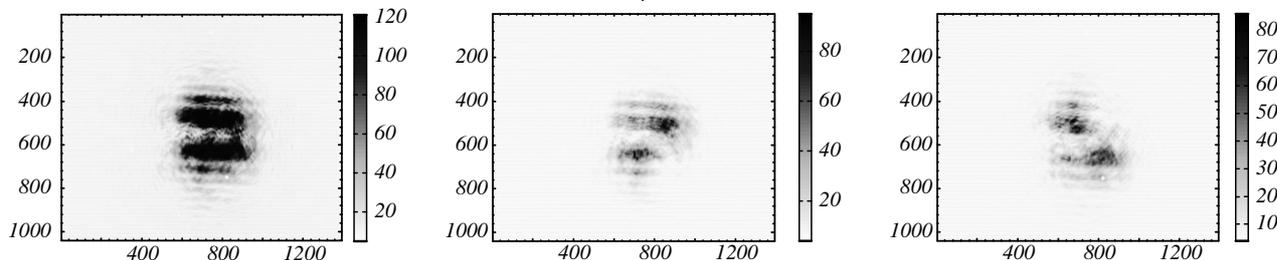


Рис. 3. Распределение интенсивности лазерного света (633 нм), отражённого от микрополяризатора (рис. 1) в дальней зоне: без выходного поляризатора (а), с поляризатором, повернутым на 45(б) и -45(в) градусов (негатив)

2. Бинарная микролинза в резисте

Бинарная микролинза [10, 11] высокого качества была изготовлена по технологии литографии из резиста ZEP520A (показатель преломления резиста

$n = 1,52$) с помощью реактивного ионного травления. На рис. 4 показано изображение ЗП в электронном микроскопе: глубина рельефа – 510 нм, диаметр – 14 мкм, крайняя зона – $0,5\lambda = 266$ нм. ЗП имеет 12 колец и центральный диск.

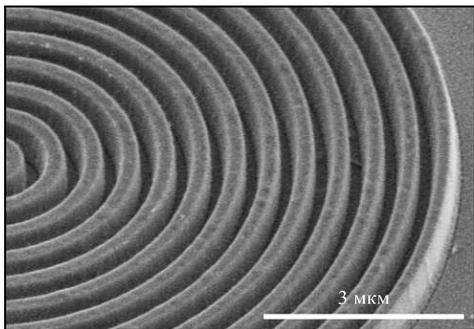


Рис. 4. Изображение микролинзы в электронном микроскопе с увеличением 18000 раз

Радиусы кольцевого рельефа микролинзы рассчитывались по известной формуле $r_m = (m\lambda f + m^2\lambda^2/4)^{1/2}$, где $f = \lambda = 532$ нм – фокусное расстояние, m – номер радиуса. Числовая апертура микролинзы равна $NA = 0,997$. Если осветить такую линзу (рис. 4) линейно-поляризованным Гауссовым пучком с длиной волны 633 нм и радиусом примерно равным радиусу микролинзы (7 мкм), то фокус будет ближе расчётного (532 нм) и, как показано в [11], он будет на расстоянии 230 нм от линзы. В [11] также показано, что расчётные (FDTD-метод) минимальный и максимальный диаметры эллиптического фокусного пятна равны $FWHM_{min} = (0,40 \pm 0,02)\lambda$ и $FWHM_{max} = (0,87 \pm 0,02)\lambda$. А экспериментально полученные с помощью СБОМ минимальный и максимальный диаметры фокусного пятна равны $FWHM_{min} = (0,40 \pm 0,02)\lambda$, $FWHM_{max} = (0,60 \pm 0,02)\lambda$.

3. Моделирование

Моделировалась (FDTD-метод) фокусировка зонной пластинкой Френеля (ЗП) с фокусным расстоянием 532 нм, рассчитанной под длину волны 532 нм, радиально-поляризованной моды R-TEM₀₁ с длиной волны $\lambda = 633$ нм и параметром моды $R = 10\lambda$. На рис. 5 показана интенсивность в фокусе (а) и то, что должно получиться в эксперименте со СБОМ с пирамидальным металлическим кантилевером [16], который в 3 раза менее чувствителен к поперечной составляющей электрического поля, чем к продольной (б). Диаметр фокуса на рис. 5а $FWHM = 0,37\lambda$.

Из рис. 5 видно, что в случае идеального формирования радиальной поляризации в фокусе бинарной линзы (рис. 4) СБОМ должен обнаружить круглое пятно интенсивности (рис. 5б) с диаметром $FWHM = 0,47\lambda$. То есть при регистрации острого фокуса для света с идеальной радиальной поляризацией с помощью СБОМ с полым металлическим пирамидальным кантилевером диаметр фокусного пятна будет больше, чем на самом деле. В нашем случае вместо $FWHM = 0,37\lambda$ СБОМ должен показать $FWHM = 0,47\lambda$.

Однако 4-секторный микрополяризатор (рис. 1) формирует смешанный линейно-радиально поляризованный свет [8]. Про моделируем, как такой свет будет фокусировать микролинза (рис. 4) и как такой фокус будет регистрировать СБОМ. На рис. 6 показана картина интенсивности на расстоянии 200 мкм от

микрополяризатора (рис. 1) и отрезками показано направление поляризации.

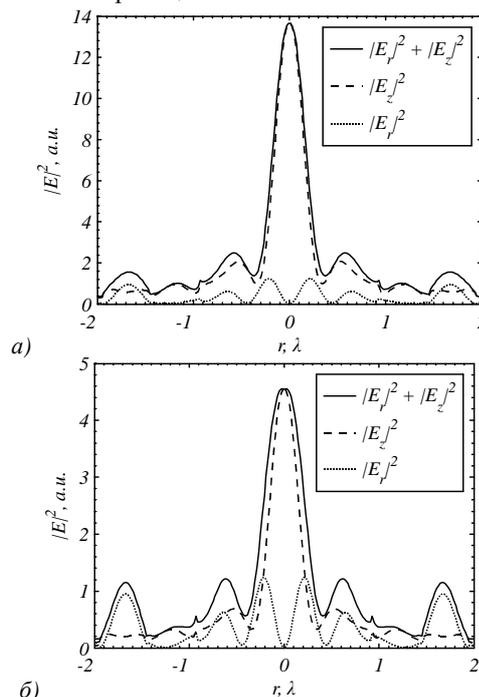


Рис. 5. Распределение интенсивности вблизи поверхности ЗП (фокус) при фокусировке моды R-TEM₀₁ с параметром моды $R = 10\lambda$ (а) и то же самое, но при условии ослабления продольной компоненты в 3 раза (б)

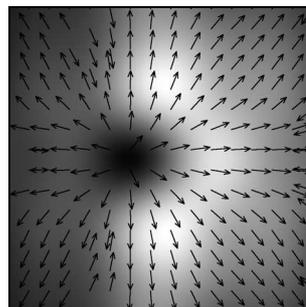


Рис. 6. Рассчитанная интенсивность $|E|^2$ света на расстоянии 200 мкм от микрополяризатора (рис. 1). Размер кадра – 5×5 мкм

На рис. 7 показаны сечения интенсивности в фокусе микролинзы (рис. 4), которая освещается смешанным линейно-радиально поляризованным полем (рис. 6) от микрополяризатора (рис. 1). Из рис. 7 видно, что поперечная составляющая интенсивности ведёт себя как при фокусировке линейно-поляризованного света, а продольная составляющая – радиально-поляризованного. Поэтому свет с такой поляризацией и назван смешанным линейно-радиально поляризованным. В этом случае фокусное пятно не является идеальным кругом (как на рис. 5 для идеальной радиальной поляризации), а является слабым эллипсом с диаметрами по осям $FWHM_{max} = (0,40 \pm 0,02)\lambda$ (рис. 7а), $FWHM_{min} = (0,35 \pm 0,02)\lambda$ (рис. 7б). Напомним, что круглый фокус для идеальной радиальной поляризации имел промежуточный диаметр $FWHM = 0,37\lambda$ (рис. 5а). Площади этих двух фокусных пятен отличаются всего на 3%. Из рис. 7 видно, что у поперечной

интенсивности E_x^2 на оптической оси нет нуля, а наоборот, максимум, хотя продольная интенсивность E_z^2 в 6 раз больше поперечной E_x^2 . На рис. 8 показаны те же сечения интенсивности, что и на рис. 7б, но продольная интенсивность уменьшена в 3 раза. Диаметр фокуса при этом немного увеличился $FWHM_{min} = (0,36 \pm 0,02)\lambda$ (рис. 8). Из рис. 5 и 8 видно, что в обоих случаях (радиальная и смешанная линейно-радиальная поляризации) при измерении СБОМ с пирамидальным металлическим полым кантилевером [16], который в 3 раза более чувствителен к поперечной компоненте электрического поля, чем к продольной, в фокусе должен быть максимум интенсивности.

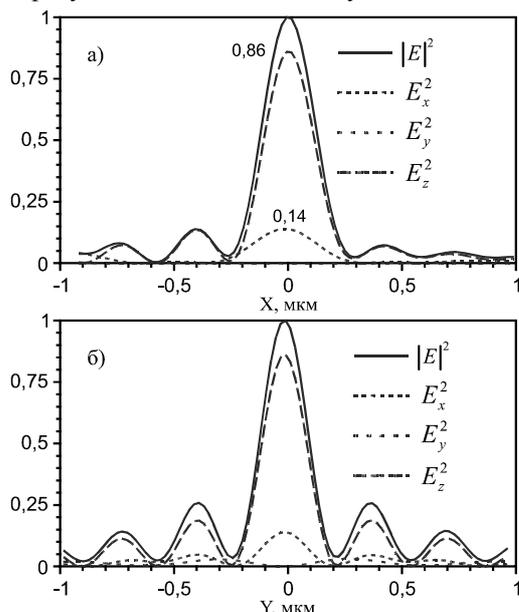


Рис. 7. Рассчитанные FDTD-методом сечения распределения интенсивности компонент вектора напряжённости электрического поля в фокусе микролинзы (рис.4) вдоль осей X (а) и Y (б)

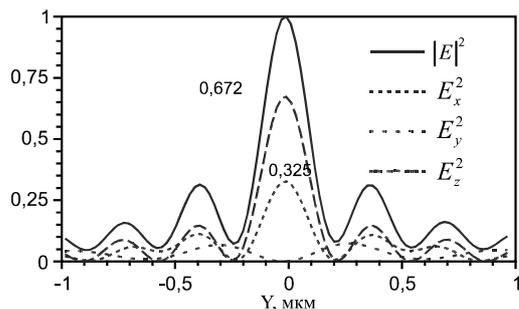


Рис. 8. Рассчитанные FDTD-методом сечения распределения интенсивности компонент вектора напряжённости электрического поля в фокусе микролинзы (рис.2) вдоль оси Y. Продольная интенсивность E_z^2 уменьшена в 3 раза

В следующем разделе будет показано, что использование смешанного линейно-радиально поляризованного света, сформированного с помощью микрополяризатора (рис. 1), позволяет с помощью микролинзы (рис. 4) получить действительно почти круглое фокусное пятно с уменьшенным диаметром по сравнению с результатами работы [11].

4. Эксперимент по фокусировке смешанного линейно-радиально поляризованного света бинарной микролинзой

В эксперименте исследовалась острая фокусировка света, отражённого от четырёхсекторной пластинки (рис. 1) для преобразования линейной поляризации в радиальную. Схема проводимого эксперимента представлена на рис. 9.

Свет от гелий-неонового лазера (длина волны – 633 нм) фокусировался с помощью объектива O_1 на 4-секторный микрополяризатор (рис. 1), преобразующий линейную поляризацию в радиальную. Поляризаторы P_1 и P_2 использовались как для того, чтобы удостовериться, что свет, падающий на микрополяризатор, линейно поляризован, так и для ослабления мощности света от лазера. Отражённый от микрополяризатора свет фокусировался снизу на микролинзу (рис. 4) с фокусным расстоянием 532 нм, проходил через неё, образуя субволновый фокус. Распределение интенсивности в фокусе измерялось с помощью СБОМ Интегра Спектра (НТ-МДТ) (на рис. 9 выделен пунктирным прямоугольником). На рис. 10 показан пример распределения интенсивности, полученный со СБОМ. Минимальный и максимальный диаметры фокусного пятна на рис.10 по полуспаду интенсивности равны $FWHM_{min} = (0,37 \pm 0,02)\lambda$, $FWHM_{max} = (0,39 \pm 0,02)\lambda$. Результаты моделирования этого случая показаны на рис. 7 и 8: диаметры фокусного пятна равны $FWHM_{min} = (0,35 \pm 0,02)\lambda$, $FWHM_{max} = (0,40 \pm 0,02)\lambda$. То есть между расчётом и экспериментом разница укладывается в ошибку (5 %). Боковые лепестки картины дифракции в фокусе составляют 20 % от максимальной интенсивности основного лепестка (рис. 10). Это указывает на то, что бинарная микролинза с высокой числовой апертурой (рис. 4) работает как бинарный аксикон и формирует в фокусе распределение интенсивности, описываемое квадратом функции Бесселя нулевого порядка. Известно, что дифракционный предел для пучка Бесселя равен по полуспаду интенсивности $0,36\lambda$.

Чтобы оценить влияние микрополяризатора, были проведены измерения, в которых подложка с микрополяризатором была сдвинута в поперечном направлении так, чтобы свет от лазера отражался от золотой поверхности подложки без рельефа. В этом случае в фокусе микролинзы формировалось световое пятно с размерами $FWHM_{min} = (0,35 \pm 0,02)\lambda$, $FWHM_{max} = (0,41 \pm 0,02)\lambda$. То есть при фокусировке линейно-поляризованного света сформировалось более эллиптическое пятно, минимальный диаметр которого даже меньше диаметра фокусного пятна для случая смешанной линейно-радиальной поляризации. И это понятно, так как использовалась одна и та же линза, и падающий пучок имел один и тот же размер. В этом случае площадь фокусного пятна должна оставаться одинаковой, что и получается в эксперименте:

$$S_{linear} = S_{radial} = \pi(FWHM_{min} FWHM_{max}) / 4 = 0,113\lambda^2.$$

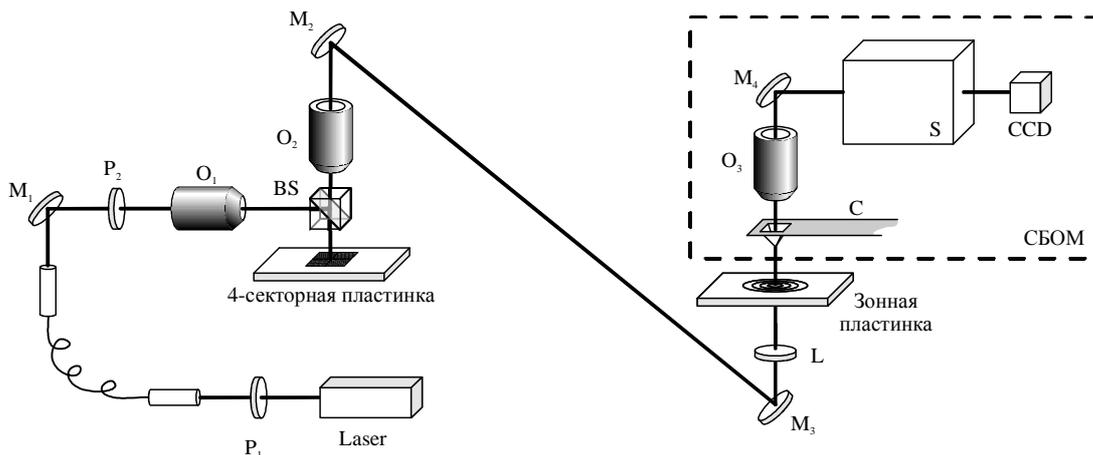


Рис. 9. Схема эксперимента. Laser – гелий-неоновый лазер (длина волны – 633 нм), P₁, P₂ – поляризаторы, M₁, M₂, M₃, M₄ – зеркала, O₁ – 3,7× объектив, BS – светоделительный кубик, O₂ – 20× объектив, O₃ – 100× объектив, C – кантилевер, L – линза, S – спектрометр, CCD – камера

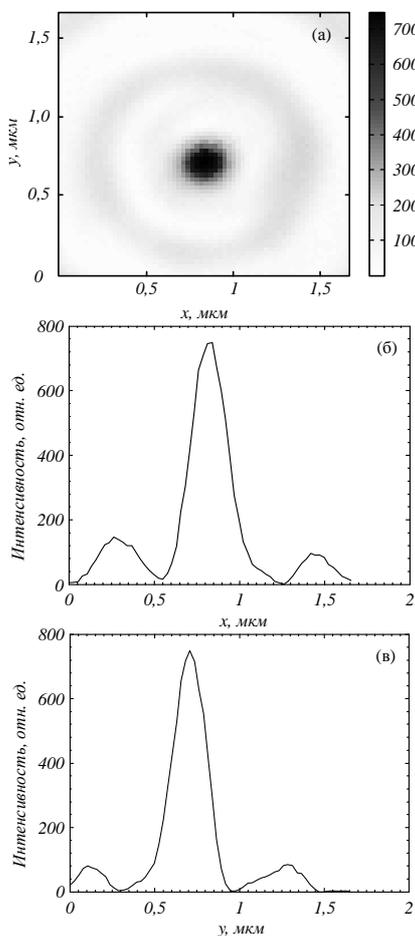


Рис. 10. Пример распределения интенсивности, полученного со СБОМ при фокусировке света, отражённого от микрополяризатора и сфокусированного микролинзой: 2D распределение (а) и сечения по двум перпендикулярным осям (б, в)

Заключение

С помощью бинарной микролинзы, выполненной по технологии электронной литографии в резисте, с диаметром 14 мкм и фокусом 532 нм (числовая апертура – 0,997) лазерный пучок с длиной волны λ = 633 нм со смешанной линейно-радиальной поля-

ризацией, сформированной при отражении линейно-поляризованного Гауссова пучка от четырёхзонного субволнового бинарного дифракционного оптического микроэлемента (микрополяризатора) с золотым покрытием и размером 100×100 мкм (период решётки – 400 нм и глубина рельефа – 110 нм), был сфокусирован вблизи поверхности микролинзы в почти круглое фокусное пятно с размерами по полуспаду интенсивности (0,37±0,02) и (0,39±0,02) от длины волны. В случае фокусировки линейно-поляризованного света (при прочих равных условиях) формировалось эллиптическое фокусное пятно с размерами (0,35±0,02) и (0,41±0,02) от длины волны. При этом площади обоих фокусных пятен равны 0,113λ². Субволновая фокусировка с помощью двух компонент микрооптики (бинарных микролинзы и микрополяризатора) осуществлена впервые. Интересно, что в недавней работе [17] при фокусировке азимутально-поляризованного лазерного пучка с сингулярностью первого порядка с помощью обычного микрообъектива с иммерсией с числовой апертурой NA = 1,4 получено фокусное пятно с диаметром 0,25λ. Если этот диаметр и минимальный диаметр фокуса 0,35λ, полученный в данной работе, привести к одинаковой числовой апертуре, то получим одинаковые результаты:

$$FWHM = 0,25\lambda = 0,25\lambda * 1,4/NA = 0,35\lambda/NA,$$

$$FWHM = 0,35\lambda = 0,35\lambda * 0,997/NA = 0,35\lambda/NA.$$

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9), молодого кандидата наук (МК-4816.2014.2), а также грантов РФФИ 13-07-97008, 14-07-31092 и 14-07-97039, 14-29-07133.

Литература

1. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik.* – 1996. – V. 103(3). – P. 125-130.

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(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(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(7). – P. 510-512.
 5. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – V. 29(15). – P. 1718-1720.
 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. – V. 33(23). – P. 2782-2784.
 7. **Mehta, A.** Spatially polarizing autocloned elements / A. Mehta, J.D. Brown, P. Srinivasan, R.C. Rumpf, E.G. Johnson // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32(13). – P. 1935-1937.
 8. **Налимов, А.Г.** Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т.38, № 2. – С. 229-236. – ISSN 0134-2452.
 9. **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.
 10. **Стафеев, С.С.** Субволновая фокусировка с помощью зонной пластинки Френеля с фокусным расстоянием 532 нм / С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.И. Шанина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 460-461. – ISSN 0134-2452.
 11. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52(3). – P.330-339.
 12. **Yuan, G.H.** Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X.-C. Yuan // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(17). – P.3479-3481.
 13. **Li, X.** Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam / X. Li, Y. Cao, M. Gu // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(13). – P.2510-2512.
 14. **Lin, J.** Achievement of longitudinally polarized focusing with long focal depth by amplitude modulation / J. Lin, K. Yin, Y. Li, J. Tan // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(7). – P. 1185-1187.
 15. **Lin, H.** Generation of an axially super-resolved quasi-spherical focal spot using an amplitude-modulated radially polarized beam / H. Lin, B. Jia, M. Gu // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(13). – P.2471-2473.
 16. **Стафеев, С.С.** Особенности измерения субволнового фокусного пятна ближнепольным микроскопом / С.С. Стафеев, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т.37, № 3. – С. 332-340. – ISSN 0134-2452.
 17. **Li, X.** Super-resolved pure-transverse focal fields with an enhanced energy density through focus of an azimuthally polarized first-order vortex beam / X. Li, P. Venugopalan, H. Ren, M. Hong, M. Gu // *Optics Letters*. – 2014. – V. 39(20). – P.5961-5964.
- References**
1. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1996. – V. 103(3). – P. 125-130.
 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(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(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(7). – P. 510-512.
 5. **Levy, U.** Engineering space-variant inhomogeneous media for polarization control / U. Levy, C.-H. Tsai, L. Pang, Y. Fainman // *Optics Letters*. – 2004. – V. 29(15). – P. 1718-1720.
 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. – V. 33(23). – P. 2782-2784.
 7. **Mehta, A.** Spatially polarizing autocloned elements / A. Mehta, J.D. Brown, P. Srinivasan, R.C. Rumpf, E.G. Johnson // *Optics Letters*. – 2007. – V. 32(13). – P. 1935-1937.
 8. **Nalimov, A.G.** Reflected four-zones subwavelength microoptics element for polarization conversion from linear to radial / A.G. Nalimov, L. O'Faolain, S.S. Stafeev, M.I. Shanina, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2014. – V. 38(2). – P. 229-236. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 9. **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.
 10. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing using fresnel zone plate with focal length of 532nm / S.S. Stafeev, L. O'Faolain, M.I. Shanina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 2011. – V. 35(4). – P. 460-461. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 11. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52(3). – P.330-339.
 12. **Yuan, G.H.** Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X.-C. Yuan // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(17). – P. 3479-3481.
 13. **Li, X.** Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam / X. Li, Y. Cao, M. Gu // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(13). – P. 2510-2512.
 14. **Lin, J.** Achievement of longitudinally polarized focusing with long focal depth by amplitude modulation / J. Lin, K. Yin, Y. Li, J. Tan // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(7). – P. 1185-1187.
 15. **Lin, H.** Generation of an axially super-resolved quasi-spherical focal spot using an amplitude-modulated radially polarized beam / H. Lin, B. Jia, M. Gu // *Optics Letters*. – 2011. – V. 36(13). – P. 2471-2473.
 16. **Stafeev S.S.** Special aspects of subwavelength focal spot measurement using near-field optical microscope / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(3). – P. 332-340. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
 17. **Li, X.** Super-resolved pure-transverse focal fields with an enhanced energy density through focus of an azimuthally polarized first-order vortex beam / X. Li, P. Venugopalan, H. Ren, M. Hong, M. Gu // *Optics Letters*. – 2014. – V. 39(20). – P. 5961-5964.

SHARP FOCUSING OF A MIXTURE OF RADially AND LINEARLY POLARIZED BEAMS USING A BINARY MICROLENS

S.S. Stafeev^{1,2}, L. O'Faolain³, M.I. Shanina¹, A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,

² Samara State Aerospace University,

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

Abstract

Using a binary microlens of diameter 14 μm and focal length 532 nm (numerical aperture NA = 0.997), we focus a 633-nm laser beam composed of a mixture of radially and linearly polarized waves obtained by reflection of a linearly polarized Gaussian beam from a gold-coated subwavelength binary four-zone diffractive optical microelement (micropolarizer) of size $100 \times 100 \mu\text{m}$ to a near-surface, near-circular focal spot of size $(0.37 \pm 0.02)\lambda$ and $(0.39 \pm 0.02)\lambda$, where λ is wavelength. A linearly polarized light beam forms an elliptical focal spot with diameters $(0.35 \pm 0.02)\lambda$ and $(0.41 \pm 0.02)\lambda$. Both focal spots have the area of $0.133\lambda^2$. Subwavelength focusing using two microoptical components (a binary microlens and a micropolarizer) is suggested for the first time.

Key words: radial polarization, reflective subwavelength diffractive grating, binary optics, micro-optics, subwavelength focal spot, near-field microscopy.

Сведения об авторах



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: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

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.



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 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. He is now working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index.



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 НИИ-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.



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.

E-mail: anton@smr.ru.

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", finished it in 2006 with speciality 01.04.05 "Optics". A.G. Nalimov 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.



Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ). В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств.

E-mail: kotlyar@smr.ru.

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences and professor of Computer Science department at Samara State Aerospace University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE and OSA-member. He is co-author of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, optical vortices.

Поступила в редакцию 31 октября 2014 г.