

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И ФОКУСИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОТРАЖАЮЩЕЙ БИНАРНОЙ ЛИНЗЫ ФРЕНЕЛЯ

Стафеев С.С., Котляр В.В.

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

### Аннотация

Экспериментально исследовано влияние на фокусирующие свойства серебряной бинарной микролинзы Френеля (БЛФ) распределения поляризации отражённого пучка при падении на БЛФ линейно-поляризованного лазерного света. Данная линза диаметром 200 мкм изготовлена по современной мембранной технологии, предназначена для рентгеновского излучения и имеет крайнюю зону размером 287 нм. Исследование фокусирующих свойств рентгеновской линзы в видимом диапазоне проводится впервые. Показано, что в отражённом свете появляется составляющая поляризации, перпендикулярная направлению поляризации падающего света. Это приводит к перераспределению интенсивности между фокусами на оптической оси. Причём для разных длин волн поляризационная структура отражённого света разная, и поэтому появляются фокусы разных порядков на разном расстоянии от линзы: для длины волны 405 нм фокусы нулевого и пятого порядков ( $f=330$  мкм,  $f_5=30$  мкм), для длины волны 445 нм фокусы нулевого и третьего порядков ( $f=250$  мкм,  $f_3=40$  мкм), для длины волны 663 нм только фокус нулевого порядка ( $f=105$  мкм).

**Ключевые слова:** отражающая бинарная линза Френеля, фокусы разных порядков, поворот плоскости поляризации.

### Введение

Бинарные зонные пластинки хорошо известны [1], но изготавливать и исследовать проще и удобнее пропускающие зонные пластинки, чем отражающие. Отражающие зонные пластинки исследованы недостаточно полно. Например, микролинзы Френеля со структурой блестящей решётки (blazed structure) исследованы в [2, 3]. В этих работах по технологии электронной литографии в резисте была изготовлена полупрозрачная линза Френеля (ЛФ), которая затем была покрыта тонким слоем серебра. Диаметр линзы – 1 мм, числовая апертура  $NA=0,1$ , глубина рельефа – 200 нм, линза оптимизирована для получения максимальной эффективности на длине волны  $\lambda=633$  нм и имеет фокусное расстояние для этой длины волны 5 мм. Данная ЛФ фокусировала свет в дифракционно-ограниченное фокусное пятно с диаметром по полуспаду интенсивности  $FWHM=3,3$  мкм  $=5,2\lambda$  с эффективностью 71 % [3]. В статье [4] отражающая зонная пластинка Френеля с фокусным расстоянием  $f=40$  см и дифракционной эффективностью 23,7 % была создана на основе жидких кристаллов. Она не имела дифракционного рельефа, но состояла из чередующихся концентрических колец, обладающих различными оптическими свойствами. Преимуществом использования жидких кристаллов стала возможность «стирания» зонной пластинки и её повторная перезапись. Существуют также работы, в которых для фокусировки используются структуры, подобные отражающей зонной пластинке. Например, в [5] предложена отражающая планарная линза на основе субволновой решетки, изготовленной из материала с высоким показателем преломления  $n=3,48$ . Освещая такую линзу ( $NA=0,8$ ) плоской волной длиной 1,55 мкм, удаётся сформировать фокусное пятно с диаметром по полуспаду  $FWHM=0,86$  мкм  $=0,55\lambda$ . Фокусное расстояние такой линзы – 10 мкм, и поэтому отражённое излучение интер-

ферирует с падающим на линзу излучением. Непонятно, как можно выделить только отражённое излучение. Следует отметить, что в работах [4, 5] линзы работают как амплитудные решётки – от половины зон свет отражается, формируя фокус перед линзой, через вторую половину зон свет проходит, формируя фокус за линзой. Зонная пластинка Френеля, рассматриваемая в данной работе, напротив, действует подобно фазовой зонной пластинке – свет отражается от всех зон, но создаётся разность фаз между светом, отражённым от соседних зон. Отражательные бинарные линзы Френеля (БЛФ) можно встретить в рентгеновской оптике [6, 7]. Но для рентгеновского излучения такие металлические линзы являются пропускающими. Металлические бинарные зонные пластинки для рентгеновского излучения не исследовались до сих пор как отражающие линзы для видимого диапазона света. В данной работе впервые экспериментально исследовано влияние поляризационных свойств серебряной БЛФ, специально изготовленной для рентгеновского излучения [8, 9], на фокусировку лазерного света в видимом диапазоне частот. Наличие субволновых периферийных зон и относительно большой глубины рельефа приводит к тому, что при отражении нормально падающий линейно-поляризованный пучок света преобразуется в пучок с неоднородной поляризацией: в разных местах поверхности БЛФ возникает разной величины составляющая поляризации, перпендикулярная направлению поляризации падающего света. В периферийных областях БЛФ плоскость поляризации падающего линейно-поляризованного лазерного света поворачивается на удвоенный угол между направлением поляризации и направлением линий локального микрорельефа линзы. Для разных длин волн глубина рельефа обеспечивает разную задержку по фазе, и отражённый свет имеет разное распределение поляризации. Понятно, что местоположение фокусов на оптической оси не зависит от поляризации

отражённого излучения, но распределение интенсивности между всеми фокусами бинарной линзы зависит от поляризации отражённого света. Из-за того, что лучи от разных точек БЛФ, приходящие в фокус на оптической оси, имеют разную поляризацию, предсказать, какие из фокусов на оптической оси будут иметь максимумы интенсивности, заранее нельзя. Связь между поляризационными и фокусирующими свойствами микроструктурированного оптического элемента рассматривалась и ранее, но только численно. Например, в [10] численно исследовались бинарные субволновые отражательные дифракционные оптические элементы (ДОЭ), которые локально (в каждой точке) поворачивают вектор поляризации падающего света на определённый угол таким образом, чтобы в фокусе сформировалось заданное распределение интенсивности.

### 1. Описание бинарной микролинзы и схема эксперимента

Экспериментально исследовалась бинарная линза Френеля, изготовленная для фокусировки рентгеновского излучения [8]. БЛФ была изготовлена из серебра на мембране из нитрида кремния, имела диаметр 200 мкм, размер крайней зоны 287 нм, глубину рельефа 460 нм, фокусное расстояние 250 мм. Радиусы БЛФ рассчитывались для длины волны 2,29 Å (Рис. 1а). Для жёсткого рентгеновского излучения данная БЛФ является почти прозрачной пропускающей линзой, а для видимого диапазона – отражающей линзой. На рис. 1б показано изображение исследуемой пластинки в оптическом микроскопе с 10-кратным увеличением.

На рис. 2 показана схема эксперимента. Использовались три лазера: синий полупроводниковый лазер с длиной волны 445 нм, фиолетовый полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм и красный гелий-неоновый лазер с длиной волны 633 нм. Свет от лазера проходил через фильтр нейтральной плотности ND, после чего фокусировался с помощью длиннофокусной линзы L (фокусное расстояние  $f=25$  см) и светоделительного кубика BS на подложку, на которой располагались исследуемые отражательные БЛФ. Свет, отражённый от БЛФ, проходил обратно через светоделительный кубик BS и попадал через 10-кратный объектив O2 (NA=0,25) на ПЗС-камеру. Выбор объектива O2 обусловлен его рабочим расстоянием (около 9 мм), которое должно быть больше размеров делительного кубика BS (сторона кубика – 6 мм). При использовании синего лазера пучок дополнительно «чистился» с помощью пространственного фильтра, выделенного на рис. 2 пунктиром. Пространственный фильтр представлял собой четырёхкратный объектив O1 и диафрагму с круглым отверстием с диаметром 50 мкм. При исследовании поляризационных свойств БЛФ схема дополнялась поляризаторами P1 и P2. Первый располагался после фильтра нейтральной плотности ND, второй располагался между объективом O2 и ПЗС-камерой и позволял «заглушить» излучение входного пучка, отражённое от зеркальной поверхности, окружающей БЛФ.

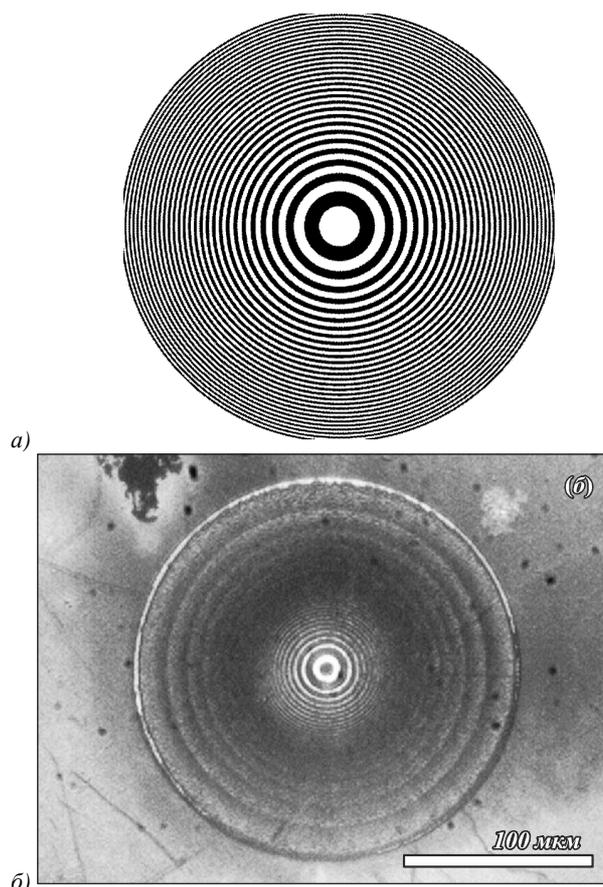


Рис. 1. Центральная часть амплитудного шаблона бинарной микролинзы Френеля (а) и изображение в оптическом микроскопе отражательной исследуемой БЛФ (б)

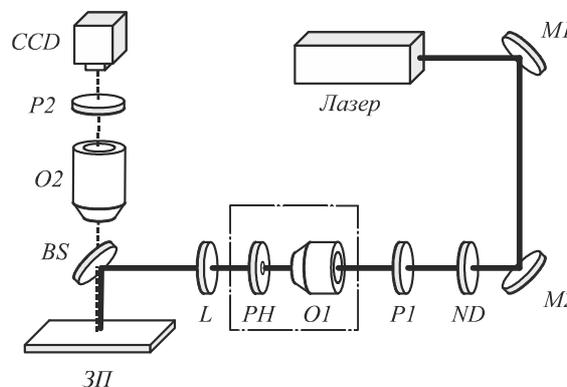


Рис. 2. Оптическая схема эксперимента. M1, M2 – зеркала, ND – фильтр нейтральной интенсивности, P1, P2 – поляризаторы, L – линза с фокусным расстоянием  $f=25$  см, BS – светоделительный кубик, O2 – объектив с десятикратным увеличением, CCD – ПЗС-камера, O1 – объектив с четырёхкратным увеличением, PH – диафрагма с диаметром 50 мкм. Сплошной линией показан путь луча, падающего на элемент, пунктирной линией – путь регистрируемого луча. Штрихпунктирной линией выделен пространственный фильтр, используемый совместно с синим лазером

Линза (рис. 1) рассчитывалась по известной формуле:

$$r_n = \sqrt{\lambda n f}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны света,  $r_n$  – радиус  $n$ -го кольца БЛФ,  $n=1,2,3,\dots,N$ ,  $f$  – фокусное расстояние линзы. Для линзы на рис. 1 выполнялось равенство  $\lambda f = 57,4 \text{ мкм}^2$ . Из этого равенства видно, что если линзу на рис. 1 освещать светом с другой длиной волны, то фокусное расстояние будет изменяться обратно пропорционально величине длины волны. Произведение длины волны на фокусное расстояние для БЛФ можно найти из формулы:

$$\lambda f = 2R\Delta r, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус БЛФ и  $\Delta r$  – размер крайней зоны. В нашем случае (рис. 1):  $R=100 \text{ мкм}$ ,  $\Delta r=287 \text{ нм}$ . В БЛФ на рис. 1б 88 колец:  $N=88$ . БЛФ как зонная пластинка формирует несколько фокусов вдоль оптической оси, фокусные расстояния которых меньше главного фокуса линзы:

$$f_m = \frac{f}{2m+1}, \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Числовая апертура БЛФ определяется радиусом  $R$  и фокусным расстоянием  $f$  по формуле:

$$NA = \sin \theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + f^2}}, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол наклона крайнего луча, проходящего в фокус. Но фокусное расстояние бинарной линзы зависит от длины волны света (2), поэтому формулу (4) можно переписать только через длину волны света и минимальный период (две крайних зоны линзы)  $T_{\min} = 2\Delta r$ :

$$NA = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + T_{\min}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_{\min} / \lambda)^2}}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что чем больше длина волны света, тем больше числовая апертура линзы. Например, числовая апертура данной линзы ( $T_{\min} = 574 \text{ нм}$ ) для длины волны  $\lambda = 633 \text{ нм}$  равна  $NA = 0,74$ . Показатель преломления для серебра для длины волны  $\lambda = 633 \text{ нм}$  равен  $n = 0,065 + i \times 4,0$ . Отражательная способность серебра для  $\lambda = 633 \text{ нм}$  больше, чем для золота и алюминия. В [2, 3] для серебряной микролинзы Френеля (не бинарной, а полутонковой с  $NA = 0,1$ ) была достигнута экспериментальная эффективность 71 %. Поэтому выбор в качестве металла для БЛФ серебра обоснован с точки зрения эффективного отражения света в видимом диапазоне.

## 2. Фокусировка отражённого света с длиной волны 405 нм

Исследуемая отражательная БЛФ освещалась линейно-поляризованным фиолетовым лазерным светом с длиной волны  $\lambda = 405 \text{ нм}$  ( $NA = 0,58$ ). Отражённое от БЛФ излучение проходило через поляризатор, который пропускал только ту компоненту напряжённости электрического поля, которая была перпендикулярна направлению поляризации падающего на БЛФ излучения. На рис. 3 показаны результаты распределения интенсивности, полученные на разных расстояниях от поверхности БЛФ.

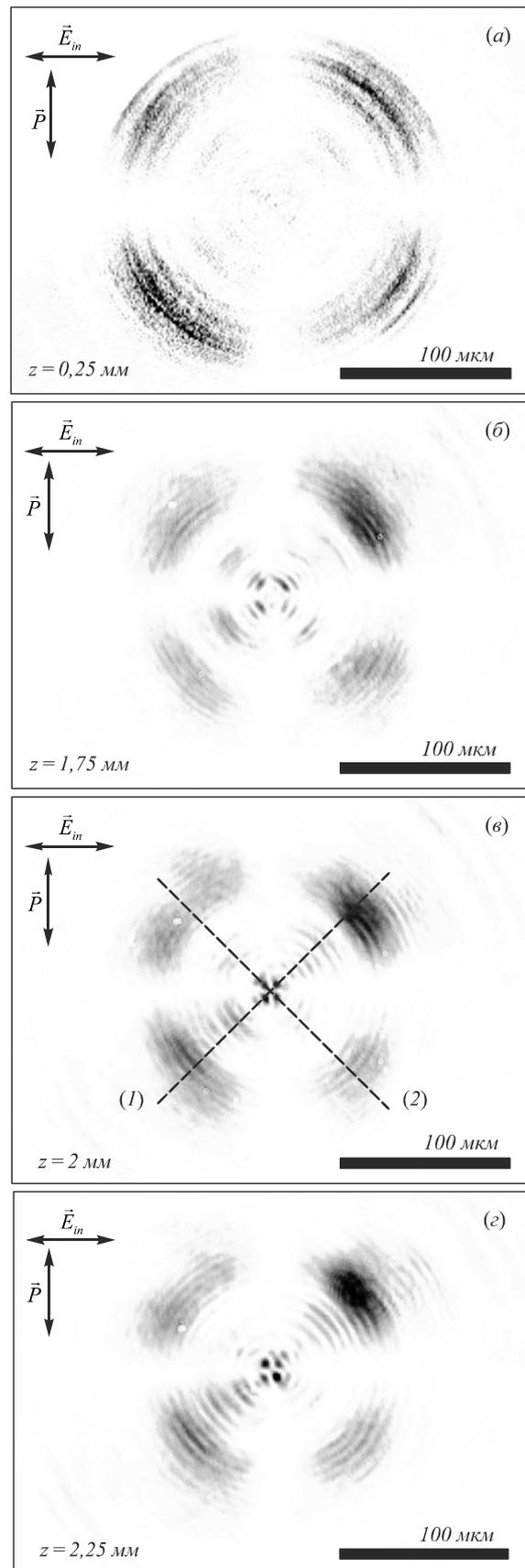


Рис. 3. Распределение интенсивности (негатив) отражённого от БЛФ света на разных расстояниях: 0,25 мм (а), 1,75 мм (б), 2 мм (е) и 2,25 мм (z)

Горизонтальная стрелка показывает направление поляризации нормально падающего на БЛФ света, а вертикальная стрелка показывает направление оси поляризатора на выходе (перед ПЗС-камерой).

Из рис. 3а видно, что после отражения примерно от 30 крайних зон БЛФ наблюдается поворот поляризации отражённого света относительно направления поляризации падающего излучения. При этом поворота не наблюдается в тех областях, в которых направление канавок микрорельефа образует углы близкие к 0 и 90 градусам с направлением поляризации падающего излучения. Последнее согласуется с результатами, полученными ранее с помощью моделирования в статье [11]. Из рис. 3а видно, что отражённое от периферийной части БЛФ излучение в угловых секторах, примыкающих к биссектрисам прямых углов декартовой сетки (пунктирные линии на рис. 3в), имеет плоскость поляризации, перпендикулярную к плоскости поляризации падающего излучения. Поворот плоскости поляризации при отражении от субволновой дифракционной решётки хорошо известен [12, 13]. Глубина бинарного рельефа БЛФ даёт задержку по фазе примерно  $\lambda/3$  для  $\lambda=405$  нм. Полный поворот поляризации на 90 градусов происходит при задержке в  $\lambda/2$ . Поэтому в данном случае (рис. 3а) поворот произошёл неполный. Кроме того, поворот поляризации на 90 градусов происходит при отражении от решётки с периодом меньше длины волны. Для данной БЛФ (рис. 1) минимальный локальный период (сумма двух последних зон) равен 574 нм и больше длины волны освещающего света  $\lambda=405$  нм. Поэтому следует заключить (рис. 3а), что поворот плоскости поляризации при отражении от поверхности с рельефом происходит и при периоде структуры не только меньше длины волны, но и больше длины волны. На рис. 3а светлые области (чёрные в негативе) соответствуют изменению периода структуры от 574 нм на краю линзы до 710 нм =  $1,75\lambda$  на расстоянии 80 мкм от центра БЛФ. По мере удаления от линзы увеличивается интенсивность вблизи оптической оси (рис. 3в,г). То есть в фокусировке линейно-поляризованного света с помощью отражательной БЛФ участвуют компоненты электрического поля с поляризацией, перпендикулярной поляризации падающего света. На рис. 4 показано сечение интенсивности вдоль пунктирной линии (обозначена как (2) на рис. 3в) на расстоянии  $z=2$  мм от БЛФ. Из рис. 4 видно, что на оптической оси имеет место локальный минимум интенсивности. Минимум интенсивности на оптической оси получается из-за того, что свет с перпендикулярной поляризацией по отношению к падающему приходит в фокус по пунктирным линиям (1) и (2) (рис. 3в) с разницей фаз  $\pi$ .

Из рис. 3 видно, что отражённый от БЛФ (рис. 1) свет с длиной волны 405 нм и с поляризацией, перпендикулярной падающей поляризации, формируется в периферийных областях линзы и не даёт вклад в фокусировку вблизи поверхности (рис. 3а), хотя существенно влияет на формирование фокуса вдали от

БЛФ (рис. 3г). Однако этот «фокус» имеет локальный минимум интенсивности на оптической оси (рис. 4).

*Интенсивность, отн. ед.*

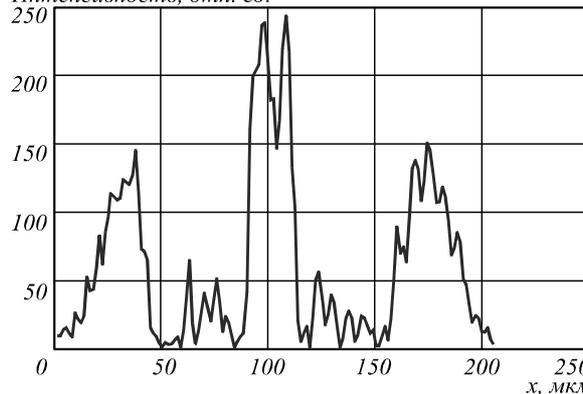


Рис. 4. Сечение поперечного распределения интенсивности под углом  $135^\circ$  к оси  $x$  на рис. 3в (показана пунктиром (2))

В отсутствие поляризатора P2 при отражении от БЛФ (рис. 1) линейно-поляризованного света с длиной волны 405 нм было найдено два коротких фокуса, расположенных на расстояниях 30 мкм и 330 мкм (рис. 5), которых не было на рис. 3. На рис. 5 показан только один из двух фокусов.

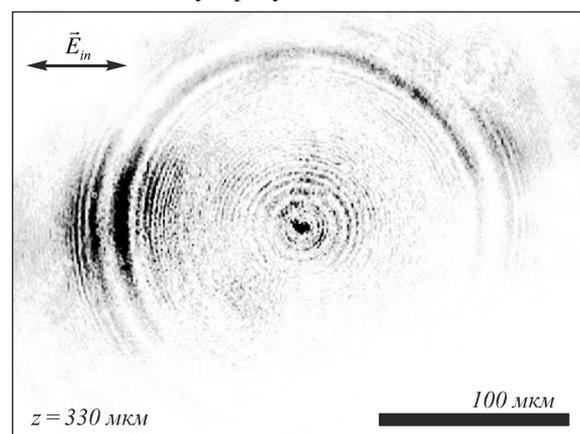


Рис. 5. Распределение интенсивности (негатив) в фокусе БЛФ ( $\lambda=405$  нм) на расстоянии 330 мкм

Из рис. 3 и 5 следует, что поляризационная структура отражённого от БЛФ пучка влияет на распределение интенсивности между осевыми фокусами: если поляризация перпендикулярна поляризации падающего света (есть поляризатор P2), то фокусов на оси нет, если регистрируется всё отражённое излучение (поляризатора P2 нет), то на оптической оси появляются только два фокуса нулевого и пятого порядков на расстояниях, удовлетворяющих уравнению (3):  $f=330$  мкм и  $f_5=f/11=30$  мкм.

### 3. Фокусировка отражённого света с длиной волны 445 нм

На рис. 6 показано распределение интенсивности света, отражённого от БЛФ, при освещении линейно-поляризованным синим лазерным излучением с длиной волны 445 нм.

Для длины волны синего цвета  $\lambda=445$  нм задержка по фазе, вносимой рельефом БЛФ, составляет ма-

люю часть длины волны ( $\lambda/10$ ). Поэтому поворота поляризации на 90 градусов в этом случае почти не происходит (рис. 6). Однако в отличие от картины дифракции на рис. 3а, снятой на том же расстоянии от БЛФ (250 мкм), для длины волны 445 нм в отражённом свете с поляризацией, перпендикулярной поляризации падающего света, в центре картины дифракции формируется фокус (рис. 6).

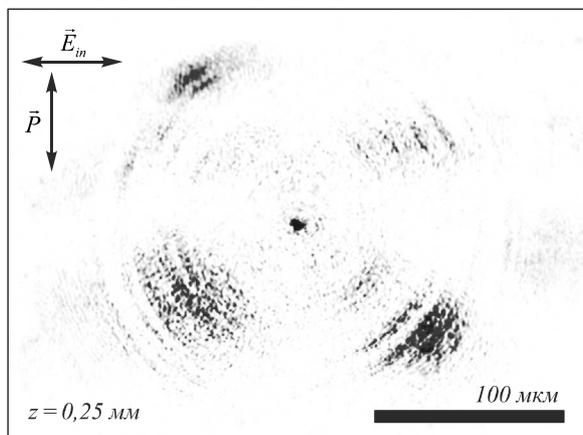


Рис. 6. Распределение интенсивности (негатив) вблизи поверхности БЛФ при освещении светом с длиной волны 445 нм

В отсутствие поляризатора P2 в отражённом свете с длиной волны 455 нм было найдено три фокуса. Один из найденных фокусов находился непосредственно вблизи поверхности – на расстоянии 40 мкм, два других на отдалении – 1,6 мм и 2,2 мм. На рис. 7 приведено распределение интенсивности в первом непараксиальном фокусе на расстоянии 40 мкм и его вертикальное сечение. Интенсивность в этом фокусе всего в 5 раз больше интенсивности падающего на линзу света, и меньший диаметр эллиптического фокусного пятна по полуспаду интенсивности немного больше предела разрешения объектива O2 и равен  $FWHM = 2,2\lambda$ .

Из сравнения рис. 6 и 7 следует, что для длины волны 445 нм при отражении только поляризации, перпендикулярной поляризации падающего света (присутствует поляризатор P2), возникает один фокус на расстоянии 250 мкм от БЛФ, а при регистрации всего отражённого излучения (поляризатора P2 нет) возникает три фокуса, ближайший из которых находится на расстоянии  $f_3 = 40$  мкм. Из формулы (3) следует, что это фокус третьего порядка:  $f = 250$  мкм,  $f_3 = f/7 = 36$  мкм. Фокусы на расстояниях 1,6 мм и 2,2 мм возникают из-за дифракции на краю апертуры БЛФ и на периферийных субволновых зонах.

#### 4. Фокусировка отражённого света с длиной волны 633 нм

В схеме на рис. 2 без поляризатора на выходе были найдены три фокуса для БЛФ (рис. 1) при освещении её линейно-поляризованным красным светом с длиной волны 633 нм. Один из найденных фокусов находился непосредственно вблизи поверхности – на расстоянии 105 мкм, два других на отдалении – 2,05 мм и 2,82 мм. Первый фокус на расстоянии  $f = 105$  мкм является главным фокусом БЛФ. Формула

(2) даёт немного меньшее значение для этого фокусного расстояния – 91 мкм.

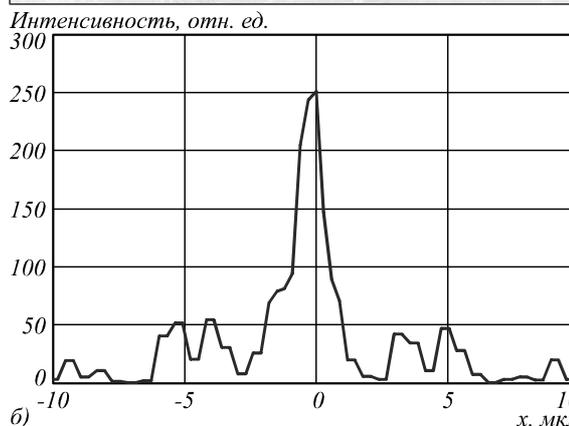
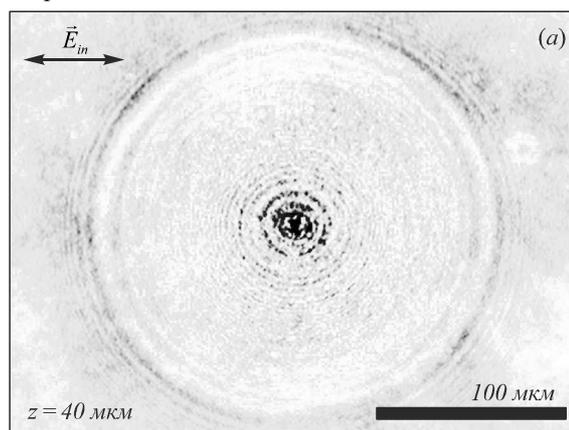


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокусе БЛФ ( $\lambda = 445$  нм) на расстоянии  $f = 40$  мкм (а) и его вертикальное сечение через максимум интенсивности (б)

На рис. 8 приведено распределение интенсивности в этом фокусе, а также вертикальное сечение. Микрообъектив O2( $\times 10$ ), строящий изображения фокусных пятен БЛФ, имеет числовую апертуру  $NA = 0,25$  и поэтому может разрешать фокусные пятна с размером не меньше  $FWHM = 0,51\lambda / (0,25) = 2\lambda$ .

Интенсивность в фокусе (рис. 8) превышает в 9 раз падающую на линзу интенсивность. Фокусное пятно – эллиптическое, вытянутое вдоль направления преимущественной поляризации (горизонтально). Наименьший диаметр пятна по полуспаду интенсивности равен пределу разрешения микрообъектива O2 ( $FWHM = 2\lambda$ ).

#### Заключение

При освещении отражающей (серебряной) бинарной микролинзы Френеля линейно-поляризованным лазерным светом в отражённом свете появляется составляющая поляризации, перпендикулярная направлению поляризации падающего света. Поэтому поляризационная структура отражённого света влияет на распределение интенсивности между фокусами на оптической оси линзы Френеля. Причём для разных длин волн поляризационная структура отражённого света разная из-за того, что бинарный рельеф линзы Френеля вносит разную фазовую задержку для разных длин волн. Поэтому фокусы для разных длин волн не только

будут появляться на разном расстоянии от линзы, но будут иметь разные порядки. Так было обнаружено: для длины волны 405 нм два фокуса нулевого и пятого порядков ( $f=330$  мкм,  $f_5=30$  мкм), для длины волны 445 нм, два фокуса нулевого и третьего порядков ( $f=250$  мкм,  $f_3=40$  мкм), для длины волны 663 нм только фокус нулевого порядка ( $f=105$  мкм).

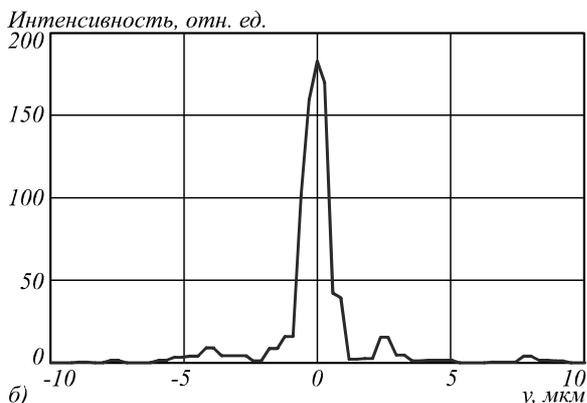
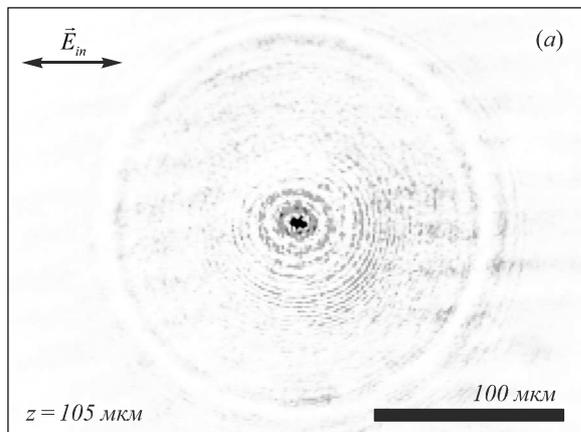


Рис. 8. Распределение интенсивности в фокусе БЛФ ( $\lambda=633$  нм) на расстоянии  $f=105$  мкм (а) и его вертикальное сечение через максимум интенсивности (б). По вертикальной оси – произвольные единицы

Понятно, что использовать данную линзу нужно в той области спектра, для которой она рассчитывалась: для рентгеновского излучения [8]. Но само влияние распределения поляризации на фокусировку света оптическим элементом широко используют для острой фокусировки света и преодоления дифракционного предела [14].

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и грантов РФФИ 13-07-97008, 14-07-31218 и 14-07-97039 и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук МК-4816.2014.2.

### Литература

1. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – Изд. 2-е, испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.

2. **Shiono, T.** Reflection micro-Fresnel lenses and their use in an integrated focus sensor / T. Shiono, M. Kitagawa, K. Setsune, T. Mitsuyu // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28(15). – P. 3434-3442.
3. **Shiono, T.** Blazed reflection micro-Fresnel lenses fabricated by electron-beam writing and dry development / T. Shiono, K. Setsune // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15(1). – P. 84-86.
4. **Cheng, K.-T.** Electrically switchable and optically rewritable reflective Fresnel zone plate in dye-doped cholesteric liquid crystals / K.-T. Cheng, C.-K. Liu, C.-L. Ting, A.Y.G. Fuh // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(21). – P. 14078-14085.
5. **Lu, F.** Planar high-numerical-aperture low-loss focusing reflectors and lenses using subwavelength high contrast gratings / F. Lu, F.G. Sedgwick, V. Karagodsky, C. Chase, C.J. Chang-Hasnain // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12606-12614.
6. **Feng, Y.** Nanofabrication of high aspect ratio 24 nm x-ray zone plates for x-ray imaging applications / Y. Feng, M. Feser, A. Lyon, S. Rishton, X. Zeng, S. Chen, S. Sassolini, W. Yun // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. – 2007. – Vol. 25(6). – P. 2004-2007.
7. **Hofsten, O.** Sub-25-nm laboratory x-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate / O. von Hofsten, M. Bertilsson, J. Reinspach, A. Holmberg, H.M. Hertz, U. Vogt // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34(17). – P. 2631-2633.
8. **Котляр, В.В.** Зонная пластинка на мембране для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Сойфер, Л. О'Фаолейн // *Компьютерная Оптика*. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 36-41.
9. **Котляр, В.В.** Исследование фокусирующих свойств зонной пластинки для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Сойфер, Л. О'Фаолейн, Е.В. Минеев, И.В. Якимчук, В.Е. Асадчиков // *Компьютерная Оптика*. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 65-71.
10. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // *Optik*. – 1992. – Vol. 103(3). – P. 125-130.
11. **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.
12. **Bomzon, Z.** Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26(18). – P. 1424-1426.
13. **Ghadyani, Z.** Concentric ring metal grating for generating radially polarized light / Z. Ghadyani, I. Vartiainen, I. Harder, W. Iff, A. Berger, N. Lindlein, M. Kuittinen // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50(16). – P. 2451-2457.
14. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // *Physical Review Letters*. – 2003. – Vol. 91(23). – P. 233901.

### References

1. Methods for Computer design of diffractive optical elements / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, A.V. Volkov, D.L. Golovashkin, V.S. Solov'yev, G.V. Usplenyev. – ed. by V.A. Soifer. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 765 p.
2. **Shiono, T.** Reflection micro-Fresnel lenses and their use in an integrated focus sensor / T. Shiono, M. Kitagawa, K. Setsune, T. Mitsuyu // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28(15). – P. 3434-3442.
3. **Shiono, T.** Blazed reflection micro-Fresnel lenses fabricated by electron-beam writing and dry development / T. Shiono, K. Setsune // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15(1). – P. 84-86.
4. **Cheng, K.-T.** Electrically switchable and optically rewritable reflective Fresnel zone plate in dye-doped cholesteric liquid

- crystals / K.-T. Cheng, C.-K. Liu, C.-L. Ting, A.Y.G. Fuh // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(21). – P. 14078-14085.
5. **Lu, F.** Planar high-numerical-aperture low-loss focusing reflectors and lenses using subwavelength high contrast gratings / F. Lu, F.G. Sedgwick, V. Karagodsky, C. Chase, C.J. Chang-Hasnain // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12606-12614.
  6. **Feng, Y.** Nanofabrication of high aspect ratio 24 nm x-ray zone plates for x-ray imaging applications / Y. Feng, M. Feser, A. Lyon, S. Rishton, X. Zeng, S. Chen, S. Sassolini, W. Yun // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2007. – Vol. 25(6). – P. 2004-2007.
  7. **Hofsten, O.** Sub-25-nm laboratory x-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate / O. von Hofsten, M. Bertilson, J. Reinspach, A. Holmberg, H.M. Hertz, U. Vogt // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34(17). – P. 2631-2633.
  8. **Kotlyar, V.V.** Zone plate on a film for hard x-ray radiation / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, M.I. Shanina, V.A. Soifer, L. O'Faolain // Computer Optics. – 2011. – Vol. 35(1). – P. 36-41. – (In Russian).
  9. **Kotlyar, V.V.** Focusing properties of a zone plate investigation for a hard x-ray / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, M.I. Shanina, V.A. Soifer, L. O'Faolain, E.V. Mineev, I.V. Yakimchuk, V.E. Asadchikov // Computer Optics. – 2012. – Vol. 36(1). – P. 65-71.
  10. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // Optik. – 1992. – Vol. 103(3). – P. 125-130.
  11. **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. – Vol. 38(2). – P. 229-236.
  12. **Bomzon, Z.** Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings / Z. Bomzon, V. Kleiner, E. Hasman // Optics Letters. – 2001. – Vol. 26(18). – P. 1424-1426.
  13. **Ghadyani, Z.** Concentric ring metal grating for generating radially polarized light / Z. Ghadyani, I. Vartiainen, I. Harder, W. Iff, A. Berger, N. Lindlein, M. Kuittinen // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50(16). – P. 2451-2457.
  14. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // Physical Review Letters. – 2003. – Vol. 91(23). – P. 233901.

## POLARIZING AND FOCUSING PROPERTIES OF REFLECTIVE FRESNEL ZONE PLATE

S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar

*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,  
Samara State Aerospace University*

### Abstract

Polarizing and focusing properties of binary Fresnel zone plate (FZP) designed for x-ray was investigated experimentally in visible range for wavelengths 405 nm, 445 nm, and 633 nm. It was shown that peripheral FZP zones rotate the direction of polarization of linearly-polarized incident light on angle equal to doubled angle between incident polarization and relief direction. Illuminated by red and blue linearly polarized light FZP forms 3 focal spots, located on distances that decrease with wavelength decreasing. Minimal focal spot on distance of 105  $\mu\text{m}$  above the surface was elliptical and has maximal intensity 9 times larger than the intensity of incident light, and half maximum diameter of diffractive limit of our optical system (2 of wavelength). Peripheral part of FZP forms diffractive limited focal point on distance of 2.8  $\mu\text{m}$  that has diameter 9 of wavelength.

*Key words:* reflective Fresnel zone plate, polarization rotation, multifocal lens.

### 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](mailto:sergey.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.

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр. 385 этого номера.

Поступила в редакцию 6 июня 2014 г.