

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ НЕОДНОРОДНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ПОМОЩИ СЕКТОРНЫХ ПЛАСТИНОК

Алфёров С.В., Карпеев С.В., Хонина С.Н., Моисеев О.Ю.

Институт систем обработки изображений РАН,

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)*

Аннотация

Экспериментально исследована фокусировка неоднородно поляризованных лазерных пучков, сформированных секторными пластинками. Проведён анализ шумовых искажений пучков, сформированных различными типами пластинок. Фокусировка производилась микрообъективом с высокой числовой апертурой и дифракционным аксиконом с умеренной числовой апертурой. Экспериментально показано, что при фокусировке таких пучков шумы в силу своей высокочастотной природы мало влияют на распределение интенсивности в центре области фокусировки, которое согласуется с приведёнными результатами численного моделирования.

Ключевые слова: неоднородная поляризация, секторные поляризационные пластинки, высокочастотные шумы, фокусировка аксиконом.

Введение

Неоднородно поляризованные лазерные пучки находят своё применение в таких приложениях, как острая фокусировка, ускорение электронов, микроэллипсометрия, сверхразрешение. Известны различные схемы генерации цилиндрически поляризованных пучков, использующие специальные устройства как внутри, так и вне резонаторов. Главным преимуществом внerezонаторных методов является универсальность.

Среди внerezонаторных методов формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков отдельно стоят методы, основанные на применении секторных пластинок, в которых сектора представляют собой соответствующим образом ориентированные либо полуволновые пластинки [1, 2], либо плёночные поляризаторы [3]. В первом варианте используется линейно поляризованный освещающий пучок, а во втором случае – пучок с круговой поляризацией.

Преобразователь линейной поляризации, состоящий из секторных полуволновых пластинок, можно использовать для формирования как радиальной, так и азимутальной поляризации. Плёночный преобразователь рассчитан на трансформацию круговой поляризации только в какую-либо одну из цилиндрических поляризаций.

Эффективное преобразование (практически без энергетических потерь) обеспечивает лишь вариант с полуволновыми пластинками. Однако такой элемент гораздо сложнее реализуется в технологическом плане.

Отличительной особенностью секторных поляризационных преобразователей является простота использования готовых устройств при относительной сложности их качественного изготовления. Основными факторами, ухудшающими качество сформированных пучков и, соответственно, усложняющими технологию реализации, являются дифракция на границах секторов и отклонения от параллельности секторов у пластинок первого типа. Данные факторы приводят к появлению высокочастотных шумов в виде дифракци-

онных полос (особенно в ближней зоне) и к дополнительным нарушениям аксиальной симметрии сформированных пучков. Изначальное нарушение осевой симметрии определяется ограниченностью числа секторов (обычно не более 8).

В работах [1–3] для борьбы с указанными явлениями применяют низкочастотную пространственную фильтрацию полученного пучка при помощи телескопической системы с точечной диафрагмой в фокусе. Это приводит к значительным потерям энергии, хотя дискретность из-за ограниченности числа секторов всё равно частично сохраняется.

По нашему мнению, негативные последствия указанных недостатков в меньшей мере сказываются при применении секторных пластин для формирования нужного распределения в области острой фокусировки. Зачастую при этом не накладывается каких-то строгих ограничений на распределение интенсивности за пределами фокального пятна, а ведь именно там сосредотачивается основная энергия паразитных высокочастотных шумов.

В настоящей работе рассматривается применение секторных поляризационных пластин для создания радиально и азимутально поляризованных пучков, фокусируемых как высокоапертурным объективом, так и дифракционным аксиконом с умеренной числовой апертурой.

1. Численное моделирование фокусировки с помощью объектива и дифракционного аксикона

В данном разделе выполнено численное моделирование фокусировки с помощью высокоапертурного объектива и дифракционного бинарного аксикона со средней числовой апертурой. На основе моделирования исследуется возможность анализа поляризационных свойств световых пучков в упомянутых фокусирующих системах. Для моделирования в первом случае использовано приближение Дебая [4, 5], во втором случае – метод разложения по плоским волнам [6, 7].

1.1. Фокусировка с помощью микрообъектива

Для моделирования апланатической фокусирующей системы, основанной на использовании микрообъектива, мы использовали интегральное выражение в приближении Дебая [4]:

$$\mathbf{E}(\rho, \varphi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\Theta \int_0^{2\pi} B(\theta, \phi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \phi) \times \exp[ik(\rho \sin \theta \cos(\phi - \varphi) + z \cos \theta)] \sin \theta d\theta d\phi, \tag{1}$$

где (ρ, φ, z) – цилиндрические координаты в фокальной области; (θ, ϕ) – сферические угловые координаты выходного зрачка фокусирующей системы; $B(\theta, \phi)$ – функция пропускания зрачка; $T(\theta)$ – функция аподизации (для апланатического микрообъектива $T(\theta) = \sqrt{\cos \theta}$); $\sin \Theta = NA/n$, NA – числовая апертура системы; n – показатель преломления среды; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны падающего излучения; f – фокусное расстояние; $\mathbf{P}(\theta, \phi)$ – поляризационный вектор, вид которого зависит от поляризации падающего излучения.

В нашем случае для цилиндрически поляризованного излучения можно воспользоваться более простым, чем (1), выражением [5]:

$$\mathbf{E}(\rho, \varphi, z) = -ikf \times \int_0^\Theta \mathbf{Q}(\rho, \varphi, \theta) R(\theta) T(\theta) \sin \theta \exp(ikz \cos \theta) d\theta, \tag{2}$$

где $R(\theta)$ – осесимметричная функция пропускания зрачка, а вектор $\mathbf{Q}(\rho, \varphi, \theta)$ имеет следующий вид для радиальной поляризации:

$$\mathbf{Q}(\rho, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} iJ_1(k\rho \sin \theta) \cos \varphi \cos \theta \\ iJ_1(k\rho \sin \theta) \sin \varphi \cos \theta \\ -J_0(\theta) \sin \theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

и для азимутальной поляризации:

$$\mathbf{Q}(\rho, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} -iJ_1(k\rho \sin \theta) \sin \varphi \\ iJ_1(k\rho \sin \theta) \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

В табл. 1 приведены результаты расчёта распределения в фокальной области объектива с числовой апертурой $NA=0,65$ для радиально и азимутально поляризованного излучения. Размер картин – $10\lambda \times 10\lambda$.

Как видно из приведённых результатов расчёта, при радиальной поляризации в центре фокуса присутствует ненулевая интенсивность, соответствующая продольной компоненте электрического поля. Эта компонента возникает только в ситуации, когда излучение распространяется под большими углами θ (3) к оптической оси, в частности, при фокусировке с высокой числовой апертурой. При азимутальной поляризации значение интенсивности в центре фокуса равно нулю (4).

Таблица 1. Моделирование распределения в фокальной области объектива с числовой апертурой $NA=0,65$

	Радиальная поляризация	Азимутальная поляризация
Полностью открытый объектив		
Кольцевая диафрагма, закрывающая 75% центральной части		

Наложение на объектив кольцевой диафрагмы делает фокусировку объектива более острой [8, 9], поэтому различия между радиальной и азимутальной поляризациями становятся более очевидными.

1.2. Фокусировка с помощью дифракционного бинарного аксикона

Для описания фокусировки с помощью аксикона мы использовали метод разложения по плоским волнам [6] с учётом [7] осевой симметрии рассматриваемой задачи и коэффициентов Френеля. В этом случае декартовы компоненты электрического вектора вычисляются с помощью интеграла в цилиндрических координатах:

$$\mathbf{E}(\rho, \theta, z) = k^2 \times \int_0^1 \mathbf{P}(\rho, \theta, \sigma) \begin{pmatrix} S_x(\sigma) \\ S_y(\sigma) \end{pmatrix} \exp[ikz\sqrt{1-\sigma^2}] \sigma d\sigma, \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} S_x(\sigma) \\ S_y(\sigma) \end{pmatrix} = \int_0^R \begin{pmatrix} E_{0x}(r) \\ E_{0y}(r) \end{pmatrix} J_0(kr\sigma) r dr, \tag{6}$$

где $E_{0x}(r)$ и $E_{0y}(r)$ – тангенциальные компоненты входного электрического поля, ограниченные радиусом R ; $S_x(\sigma)$ и $S_y(\sigma)$ – соответствующие пространственные спектры, которые учитываются в ограниченной области пространственных частот, соответствующих однородным волнам.

Поляризационный вектор вычисляется из следующего выражения [7]:

$$S(\rho, \theta, \sigma) = \begin{bmatrix} t_s(\sigma)B_{SS}(k\sigma\rho, \theta) + t_p(\sigma)\sqrt{1-\sigma^2}B_{CC}(k\sigma\rho, \theta) & B_{SC}(k\sigma\rho, \theta)(t_p(\sigma)\sqrt{1-\sigma^2} - t_s(\sigma)) \\ B_{SC}(k\sigma\rho, \theta)(t_p(\sigma)\sqrt{1-\sigma^2} - t_s(\sigma)) & t_s(\sigma)B_{CC}(k\sigma\rho, \theta) + t_p(\sigma)\sqrt{1-\sigma^2}B_{SS}(k\sigma\rho, \theta) \\ -t_p(\sigma)\sigma B_C(k\sigma\rho, \theta) & -t_p(\sigma)\sigma B_S(k\sigma\rho, \theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $B_{SS}(x, \theta) = (1/2)[J_0(x) + J_2(x)\cos(2\theta)]$, $B_{CC}(x, \theta) = (1/2)[J_0(x) - J_2(x)\cos(2\theta)]$,

$B_{SC}(x, \theta) = -(1/2)J_2(x)\sin(2\theta)$, $B_C(x, \theta) = iJ_1(x)\cos\theta$, $B_S(x, \theta) = iJ_1(x)\sin\theta$.

В (7) учитываются коэффициенты пропускания Френеля для ТЕ- и ТМ-поляризованных компонент поля соответственно:

$$t_s(\sigma) = \frac{2(\gamma n_2 n_1 - n_1^2)}{2\gamma n_2 n_1 - (n_1^2 + n_2^2)}, \quad (8)$$

$$t_p(\sigma) = \frac{2(\gamma n_2 n_1 - n_1^2)}{\gamma(n_1^2 + n_2^2) - 2n_2 n_1},$$

где n_1 – показатель преломления оптического элемента, n_2 – показатель преломления среды.

Для излучения, имеющего радиальную поляризацию, $p_x = \cos\theta$, $p_y = \sin\theta$, а азимутальную – $p_x = -\sin\theta$, $p_y = \cos\theta$.

В табл. 2 приведены результаты расчёта фокусировки лазерного излучения с различной поляризацией бинарным аксиконом с периодом 2 мкм, что для длины волны $\lambda = 0,532$ мкм соответствует числовой апертуре $NA \approx 0,25$.

Таблица 2. Расчёт фокусировки лазерного Гауссова излучения с различной поляризацией бинарным аксиконом

Тип поляризации	Распределение интенсивности в плоскости (10×10 мкм)	Сечение интенсивности
Линейная x-поляризация		
Линейная x-поляризация с фазовым скачком		
Радиальная поляризация		
Азимутальная поляризация		

Как следует из приведённых результатов, энергия продольной компоненты незначительна даже при радиальной поляризации, так как фокусирующий акси-кон имеет довольно умеренную числовую апертуру. Хотя на численных примерах видно наличие ненулевой интенсивности при использовании фазового скачка в сочетании с линейной поляризацией – около 5% от максимума (вторая строка табл. 2) и при радиальной поляризации – около 20% от максимума (третья строка в табл. 2), обнаружить этот эффект экспериментально маловероятно в связи с наличием шумов, сравнимых по интенсивности с указанными значениями.

2. Экспериментальное исследование секторных пластинок

Восьмисекторные пластинки на основе полуволновых пластинок мультипорядка были изготовлены для длины волны 633 нм научно-производственной фирмой ЭЛАН (г. Санкт-Петербург) по технологии фиксации секторов между двумя плоскопараллельными пластинами (рис. 1а). В процессе отработки технологии нарезки секторов выяснилось, что обычная технология лазерной резки (термораскалывание) для произвольной ориентации реза относительно оси кристалла не обеспечивает высокого качества реза (поверхности реза могут отклоняться от строгой перпендикулярности по отношению к поверхности пластинок). Данное обстоятельство, как показали дальнейшие исследования, имело негативные последствия для результатов экспериментов. Также для исследования и сравнения была самостоятельно (рис. 1б) изготовлена четырёхсекционная пластинка на основе плёночных поляризаторов.

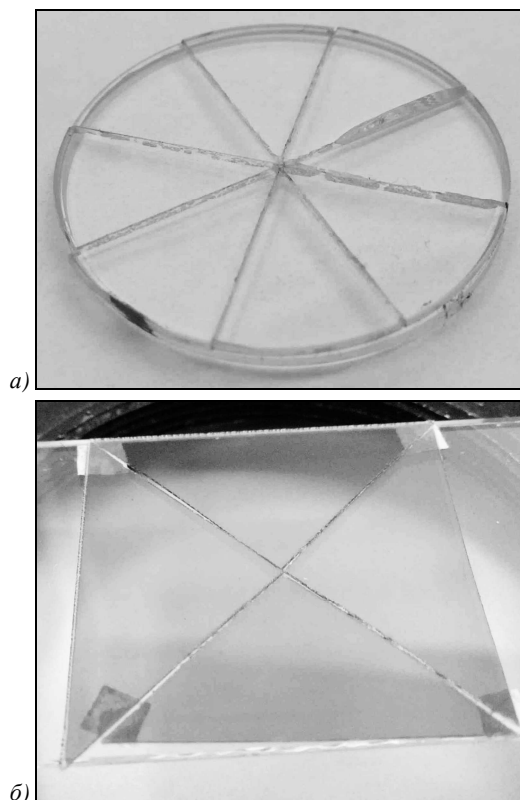


Рис. 1. Поляризационные преобразователи: 8-секционный поляризатор из полуволновых пластинок (а), 4-секционная пластинка на основе плёночных поляризаторов (б)

Вначале были получены распределения интенсивности, формируемые в ближней зоне упомянутыми пластинками для расчётной длины волны 633 нм (рис. 2).

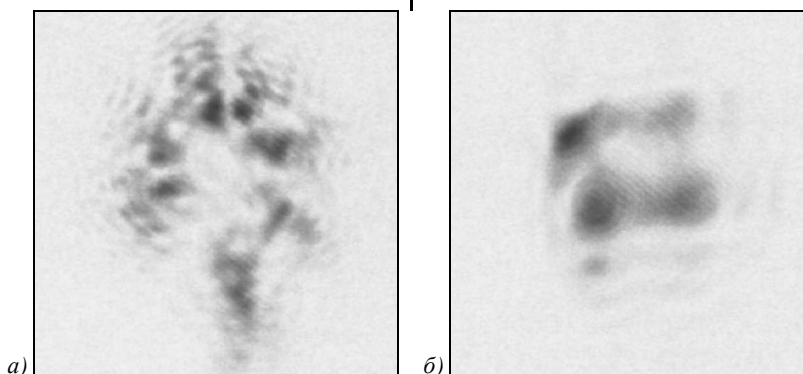


Рис. 2. Распределения интенсивности (размер 4×4 мм), формируемые в ближней зоне секторными пластинками: 8-секционный поляризатор из полуволновых пластинок (а), 4-секционная пластинка из плёночных поляризаторов (б)

На рисунке хорошо видно, что в ближней зоне пятна от разных секторов расположены отдельно, но, кроме того, у первой пластинки центры некоторых пятен имеют значительные отклонения от окружности, что связано, по-видимому, с отсутствием взаимной параллельности поверхностей секторов. Первая пластинка характеризуется также значительно большим уровнем высокочастотных шумов в виде дифракционных картин, возникающих на фазовых скачках. Как говорилось выше, это связано с отсутствием оптического контакта между секторами из-за некачественных поверхностей. Проверка пра-

вильности ориентации осей у различных секторов также проводилась и подтвердила их правильное расположение.

Далее были поставлены эксперименты по фокусировке полученных пучков с неоднородной поляризацией. На рис. 3 показаны результаты фокусировки пучка, сформированного восьмисекционной пластинкой. Фокусировка проводилась 40× микрообъективом (числовая апертура 0,65) при закрытом на 2/3 апертуры входного зрачка микрообъектива центре пучка. Измерения интенсивности выполнялись при помощи ближнепольного микроскопа с металлизированным

волоконным зондом, который чувствителен ко всем компонентам электрического поля [10].

Важным преимуществом секторной пластинки такого типа является простой переход от радиальной поляризации к азимутальной путём поворота пластинки на 90° . На рисунке хорошо видно, что распределения интенсивности в центре области фокусировки соответствуют результатам моделирования [11], показанным также в табл. 1, а именно: для радиальной

поляризации наблюдается максимум, для азимутальной – минимум. Вокруг центрального пятна, разумеется, присутствуют шумы в виде искажений дифракционных колец, однако в силу того, что произошёл переход в дальнюю зону дифракции, эти высокочастотные шумы пространственно отделяются от центральной части и не оказывают заметного влияния на интересующий нас результат (в соответствии с целью, сформулированной во введении).

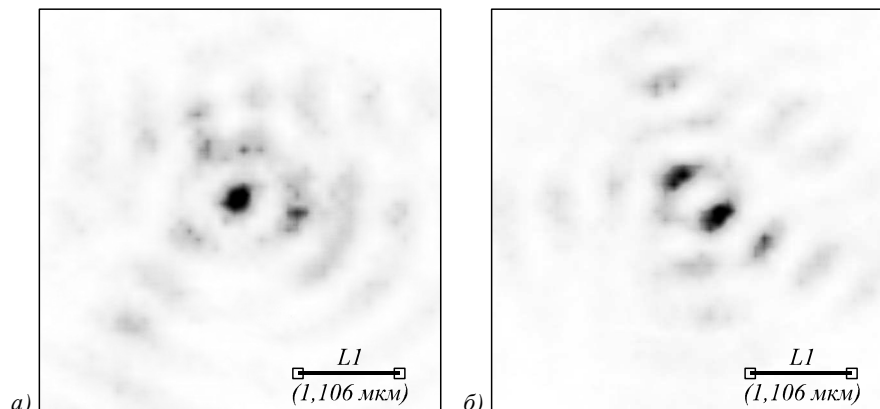


Рис. 3. Результаты фокусировки пучка, сформированного 8-секционной пластинкой (размер 4×4 мкм) при: радиальной поляризации (а), азимутальной поляризации (б)

Интересным является также развитие такой постановки задачи для фокусирующих элементов, имеющих растянутый по оптической оси фокус. Причём определённой новизной обладает применение данного подхода по фокусировке неоднородно поляризованных пучков элементами дифракционной оптики. Поэтому в качестве продолжения данной серии экспериментов была выбрана фокусировка полученных пучков дифракционным аксиконом.

Бинарный амплитудный аксикон был изготовлен на хrome при помощи лазерного фотостроителя CLVS-200S. Период составляет 2 мкм, а диаметр – 40 мм. Диаметр освещающего пучка был несколько меньше аксикона и составлял около 20 мм.

Заметим, что аксикон по сравнению с объективом позволяет формировать довольно протяжённый вдоль оптической оси световой фокус. Причём длина светового отрезка пропорциональна радиусу оптического элемента и обратно пропорциональна числовой апертуре [12, 13]. В рассматриваемом нами случае световой отрезок будет заканчиваться примерно на расстоянии 80 мм. В связи с освещением аксикона Гауссовым пучком это расстояние будет меньше. Также световой отрезок формируется не сразу [14], а на значительном расстоянии от оптического элемента. Таким образом, длина светового отрезка будет составлять пару десятков миллиметров.

Первые эксперименты проводились с фазовой пластинкой, имеющей фазовую ступеньку, обеспечивающую задержку на π . Фазовая ступенька выставляется на оптическую ось. На рис. 4 приведены распределения интенсивности в рабочей зоне аксикона при отсутствии пластинки (рис. 4а) и при её наличии со скачком на π , ориентированной горизонтально

(рис. 4б) либо вертикально (рис. 4в). На ПЗС-камере формировалось изображение, увеличенное при помощи $20\times$ микрообъектива. Расстояние до ПЗС-камеры составляло около 300 мм.

Видно хорошее соответствие с результатами моделирования (центральное пятно, формируемое аксиконом, раздвоилось). Также появились небольшие шумы, приводящие к модуляции интенсивности колец по угловой координате.

Дальнейшие эксперименты проводились уже при радиальной поляризации (рис. 5), формируемой восьмисекционной (рис. 5а) и четырёхсекционной пластинками (рис. 5б).

Полученные распределения имеют провал в центре, что соответствует моделированию (табл. 2). Однако распределение, полученное при использовании 8-секционного поляризатора (рис. 5а), ближе к кольцевому, чем при использовании 4-секционного поляризатора (рис. 5б), что и должно наблюдаться в соответствии с количеством секторов на пластинах. Шумы в периферийных зонах (на кольцах) присутствуют на обоих распределениях, но имеют некоторые отличия в соответствии с конструкцией пластин.

И, наконец, заключительная серия экспериментов была проведена с целью определить участок вдоль оптической оси, на котором сохраняются соответствующие распределения. Для определённости была выбрана четырёхсекционная пластинка. Полученные на разных расстояниях распределения приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что при перемещении вдоль оптической оси в сторону от оптического элемента на несколько миллиметров изменений распределений интенсивности в центре почти нет. Небольшие изменения происходят лишь в периферийной части, при-

чем по мере удаления от аксикона шумы уменьшаются. Это легко объяснимо, если вспомнить про высокочастотную природу некоторой части шумов, кото-

рые быстро расходятся в стороны и в центральной части на значительных расстояниях от оптического элемента практически не сказываются.

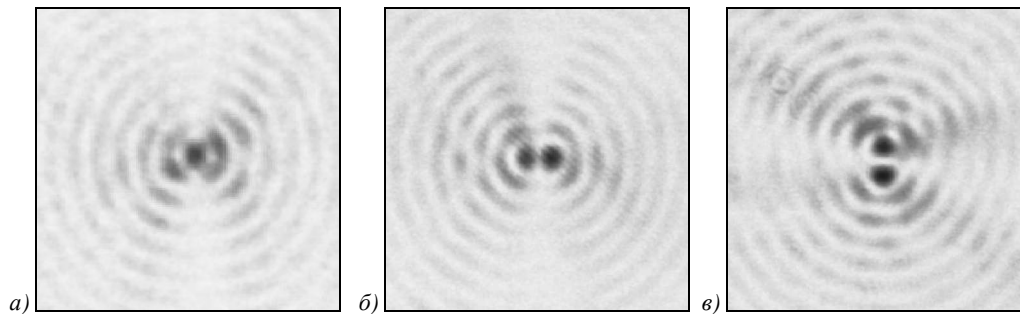


Рис. 4. Распределения интенсивности (размер с учётом увеличения объективом 50×50 мкм) в рабочей зоне аксикона: при отсутствии каких-либо пластин (а), при наличии пластинки со скачком на π , ориентированной горизонтально (б), при наличии пластинки со скачком на π , ориентированной вертикально (в)

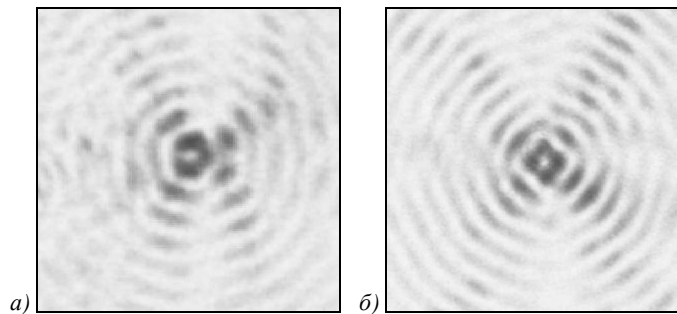


Рис. 5. Распределения интенсивности (размер с учётом увеличения объективом 50×50 мкм) в рабочей зоне аксикона при радиальной поляризации, формируемой: восьмисекционной (а) и четырёхсекционной (б) пластинками

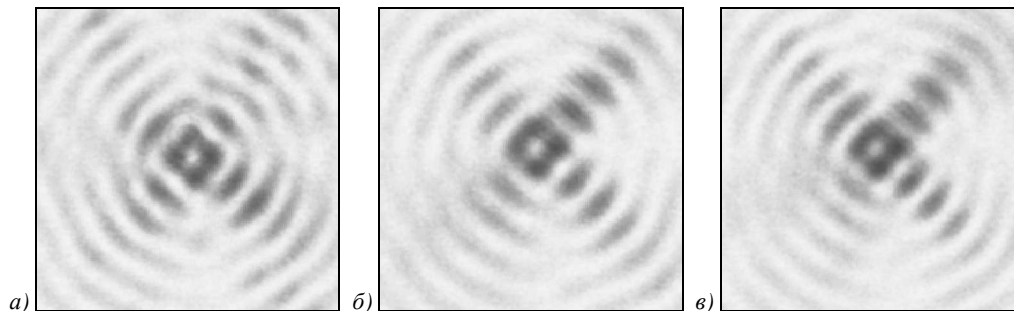


Рис. 6. Распределения интенсивности (размер с учётом увеличения объективом 65×65 мкм) в рабочей зоне аксикона при радиальной поляризации, формируемой четырёхсекционным поляризатором на различных расстояниях: 3 мм (а), 5 мм (б), 7 мм (в)

Заключение

В работе проведено исследование фокусировки неоднородно поляризованных лазерных пучков, сформированных различными типами секторных пластинок. Исходные пучки, сформированные пластинками, имеют достаточно высокую степень зашумления, обусловленную как технологическими погрешностями, так и ограничениями описанных методов.

Экспериментально показано, что при фокусировке таких пучков шумы в силу своей высокочастотной природы мало влияют на распределение интенсивности в центре области фокусировки. Таким образом, результаты, приведённые в работе, свидетельствуют о нецелесообразности применения пространственной фильтрации шумов для формирования распределений интенсивности вблизи оптической оси.

В работе также экспериментально показаны возможность работы таких поляризационных пластин совместно с ДОО и сохранение распределения, формируемого дифракционным аксиконом, на всей длине рабочего отрезка при некотором снижении интенсивности шумов по мере удаления от аксикона.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-00266, 14-02-97033.

Литература

1. **Machavariani, G.** Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir and S. Jackel // Optics Letters. – 2007. – V. 32(11). – P.1468-1470.
2. **Machavariani, G.** Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams /

- G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // Optics Communications. – 2008. – V. 281. – P. 732-738.
3. **Man, Zh.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Zhongsheng Man, Changjun Min, Yuquan Zhang, Zhe Shen and X.-C. Yuan // Laser Phys. – 2013. – V. 23. – P. 105001 (5p).
 4. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // Proc. Royal Soc. A. – 1959. – V. 253. – P. 358-379.
 5. **Khonina, S.N.** Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy and S.G. Volotovskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – V. 20(1). – P. 23-42.
 6. **Виноградова, М.Б.** Теория волн / М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979.
 7. **Хонина, С.Н.** Распространение радиально-ограниченных вихревых пучков в ближней зоне: I. Алгоритмы расчёта / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, А.А. Ковалёв, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 317-332.
 8. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl and G. Leuchs // Opt. Commun. – 2000. – V. 179. – P. 1-7.
 9. **Хонина, С.Н.** Уменьшение размера фокального пятна при радиальной поляризации с помощью бинарного кольцевого элемента / С.Н. Хонина, А.В. Устинов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 219-226.
 10. **Хонина, С.Н.** Исследование поляризационной чувствительности ближнепольного микроскопа с использованием бинарной фазовой пластины пучка / С.Н. Хонина, С.В. Алфёров, О.Ю. Моисеев, С.В. Карпеев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 326-331.
 11. **Khonina, S.N.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // Optics Letters. – 2013. – V. 38, No. 17. – P. 3223-3226.
 12. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli and J.H. Eberly // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58(15). – P. 1499-1501.
 13. **Хонина, С.Н.** Формирование осевого отрезка с уменьшенным поперечным размером для линейной поляризации освещающего пучка с помощью высокоапертурных бинарных аксиконов, не обладающих осевой симметрией / С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 461-468.
 14. **Turunen, J.** Holographic generation of diffraction-free beams / J. Turunen, A. Vasara and A.T. Friberg // J. Appl. Opt. – 1988. – V. 27(19). – P. 3959-3962.
- Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir and S. Jackel // Optics Letters. – 2007. – V. 32(11). – P. 1468-1470.
2. **Machavariani, G.** Spatially-variable retardation plate for efficient generation of radially- and azimuthally-polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // Optics Communications. – 2008. – V. 281. – P. 732-738.
 3. **Man, Zh.** Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Zhongsheng Man, Changjun Min, Yuquan Zhang, Zhe Shen and X.-C. Yuan // Laser Phys. – 2013. – V. 23. – P. 105001 (5p).
 4. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // Proc. Royal Soc. A. – 1959. – V. 253. – P. 358-379.
 5. **Khonina, S.N.** Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy and S.G. Volotovskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – V. 20(1). – P. 23-42.
 6. **Vinogradova, M.B.** Wave Theory / M.B. Vinogradova, O.V. Rudenko and A.P. Sukhorukov. – 2nd ed. – М.: “Nauka” Publisher, 1979. – (In Russian).
 7. **Khonina, S.N.** Propagation of the radially-limited vortical beam in a near zone: I. Calculation algorithms / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.A. Kovalev, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2010. – V. 34(3). – P. 317-332.
 8. **Quabis, S.** Focusing light to a tighter spot / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler, O. Glockl and G. Leuchs // Opt. Commun. – 2000. – V. 179. – P. 1-7.
 9. **Khonina, S.N.** Reducing of the focal spot size at radial polarization by means of the binary annular element / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // Computer Optics. – 2012. – V. 36(2). – P. 219-226.
 10. **Khonina, S.N.** Study of polarization sensitivity OF near-field microscope using a binary phase plate / S.N. Khonina, S.V. Alferov, O.Yu. Moiseev, S.V. Karpeev // Computer Optics. – 2013. – V. 37(3). – P. 326-331.
 11. **Khonina, S.N.** Strengthening the longitudinal component of the sharply focused electric field by means of higher-order laser beams / S.N. Khonina, S.V. Alferov, S.V. Karpeev // Optics Letters. – 2013. – V. 38, No. 17. – P. 3223-3226.
 12. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli and J.H. Eberly // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58, N. 15. – P. 1499-1501.
 13. **Khonina, S.N.** Formation of an axial line with the reduced cross-section size for linear polarization of an illuminating beam by means of high-aperture binary axicons without axial symmetry / S.N. Khonina // Computer Optics. – 2010. – V. 34(4). – P. 461-468. – (In Russian).
 14. **Turunen, J.** Holographic generation of diffraction-free beams / J. Turunen, A. Vasara and A.T. Friberg // J. Appl. Opt. – 1988. – V. 27(19). – P. 3959-3962.

References

1. **Machavariani, G.** Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams / G. Machavariani,

EXPERIMENTAL STUDY OF FOCUSING OF INHOMOGENEOUSLY POLARIZED BEAMS GENERATED USING SECTOR POLARIZING PLATES

S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, O.Yu. Moiseev
 Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,
 S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Experimentally investigated a focusing of inhomogeneously polarized laser beams formed by the sector polarizing plates. The analysis of noise distortion beams formed different types of plates is performed. Focusing is implemented by a micro-objective with high numerical aperture and by a diffraction axicon with moderate numerical aperture. It's experimentally shown that beam distort-

tion by noise have a little effect on the intensity distribution in the center of the focus area due to its high frequency nature. It is in agreement with the simulation results.

Key words: inhomogeneous polarization, sector polarizing plate, high-frequency noise, focusing axicon.

Сведения об авторах



Алфёров Сергей Владимирович, стажёр-исследователь ЛМНТ ИСОИ РАН, аспирант, программист лаборатории НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, ближнепольная микроскопия.

Sergei Vladimirovich Alferov, trainee researcher of Micro- and Nanotechnology laboratory at Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Post graduated student, programmer of SRL-35 laboratory of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, near-field microscopy.

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.



Сведения об авторе Хонина Светлана Николаевна – см. стр. 50 этого номера.



Моисеев Олег Юрьевич, 1959 года рождения, в 1982 г. окончил 5-й факультет Куйбышевского авиационного института. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию. На данный момент занимает должность старшего научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: технологические процессы создания микроструктур дифракционной оптики.

E-mail: moiseev@smr.ru.

Oleg Yurevich Moiseev, Candidate of Technical Sciences; senior staff scientist of Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: technological process of diffractive optics.

Поступила в редакцию 2 декабря 2013 г.