

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСЕВОГО ОТРЕЗКА С ПОМОЩЬЮ ОПТИМИЗИРОВАННОГО БИНАРНОГО ДОЭ

Хонина С.Н.^{1,2}, Скиданов Р.В.^{1,2}, Качалов Д.Г.², Павельев В.С.^{1,2}, Моисеев О.Ю.¹

¹ Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

Аннотация

Проведено численное и экспериментальное исследование действия оптимизированного бинарного ДОЭ, предназначенного для формирования продольного отрезка с равномерной интенсивностью, в условиях изменения параметров освещающего пучка.

Ключевые слова: бинарный аксикон, дифракционный оптический элемент (ДОЭ), продольный световой отрезок, лазерное излучение, фазовый и амплитудный ДОЭ.

Введение

Дифракционные оптические элементы, предназначенные для формирования заданных распределений интенсивности вдоль оптической оси (дифракционные линзы с продольно-протяженным фокусом, многофокусные элементы и др.), находят применение во многих областях техники. Например, при выравнивании и совмещении конструкций на больших расстояниях [1]; при формировании изображений протяжённых или движущихся объектов, что особенно актуально в медицине [2-4], а также для неразрушающего исследования материалов [5] и устройств [6], в метрологии для сканирующих [7] и интерференционных [8, 9] оптических систем.

Классическим оптическим элементом (как рефракционным, так и дифракционным) для генерации осевой световой нити является аксикон [10]. Однако распределение интенсивности вдоль оси, формируемое аксиконом, очень неравномерно – кроме существенных флуктуаций наблюдается линейный рост интенсивности при увеличении расстояния от оптического элемента.

Расчёт фазовой функции ДОЭ, фокусирующего лазерное излучение в продольный отрезок, в рамках геометрооптического подхода рассматривался в работах [11-14].

Также известны итерационные методы расчёта ДОЭ [15], основанные на алгоритме Герчберга-Сакстона [16], которые позволяют учитывать дифракционные эффекты, однако не обладают сходимостью (может быть показана лишь нерасходимость). Кроме того, необходимость применения обратного оператора на каждой итерации метода затрудняет получение квантованной фазы оптического элемента, в то время как значительная часть технологий (главным образом литографических) ориентирована как раз на получение квантованного микрорельефа [17]. Поэтому в работе [18] для синтеза бинарного рельефа был применён метод последовательных приближений с бинаризацией фазовой функции на каждом шаге. Полученный ДОЭ имел вид кольцевой решётки из почти двух сотен колец, причём на периферии период был близок к 10 мкм при радиусе элемента 4 мм.

В работах [19, 20] обсуждался расчёт бинарных ДОЭ, формирующих множество фокусов, а также

фокусирующих в заданные кривые в электромагнитном приближении. Однако при формировании осевых световых распределений, удовлетворяющих параксиальному приближению, применение скалярной теории дифракции является вполне корректным и ресурсосберегающим подходом.

В случае, когда шаг поперечной дискретизации должен быть не меньше определённой величины, и соответственно, количество колец в структуре ДОЭ желательно свести к минимуму, предпочтительнее применение стохастических алгоритмов прямого поиска, так как поиск функции высоты микрорельефа можно организовать на множестве квантованных решений. В работе [21] с помощью стохастического алгоритма прямого поиска был рассчитан оптимизированный бинарный ДОЭ, предназначенный для формирования продольного отрезка с равномерной интенсивностью из освещающего гауссового пучка.

В данной работе проведено численное исследование действия данного оптического элемента в условиях изменения параметров освещающего пучка. Рассмотрено три типа освещающего пучка: ТЕМ₀₀, ТЕМ₁₀ и плоский пучок с равномерным распределением интенсивности, ограниченный круглой апертурой радиуса ДОЭ. Также проведено моделирование изменения характеристик ДОЭ в случае исполнения его в виде фазового или амплитудного оптического элемента в зависимости от длины волны освещающего пучка.

Для предварительной экспериментальной верификации численных исследований по маске, рассчитанной в [21], был изготовлен амплитудный ДОЭ. Анализ полученных экспериментальных результатов при освещении данного оптического элемента излучением от различных лазеров показал хорошее согласование с численными результатами.

1. Моделирование действия бинарного формирователя осевого отрезка в различных условиях

В данном разделе с помощью численного моделирования исследуется действие бинарного формирователя осевого отрезка, рассчитанного в [21] в различных условиях: при освещении гауссовым и равномерным пучками, излучением с различными

длинами волн, при исполнении ДОЭ в виде фазового или амплитудного оптического элемента.

Изначально рассматриваемый ДОЭ радиусом $R = 3,6$ мм и числом отсчётов по радиусу 128 был рассчитан для формирования осевого отрезка протяжённостью $\Delta z = 20$ мм на расстоянии от $z_1 = 200$ мм до $z_2 = 220$ мм от ДОЭ при освещении гауссовым пучком с радиусом в перетяжке $\sigma = 2$ мм и длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

На рис. 1 показано радиальное сечение фазы рассматриваемого ДОЭ и сравнение результатов численного моделирования с помощью преобразования Френеля при освещении его расчётным гауссовым и равномерным пучками.

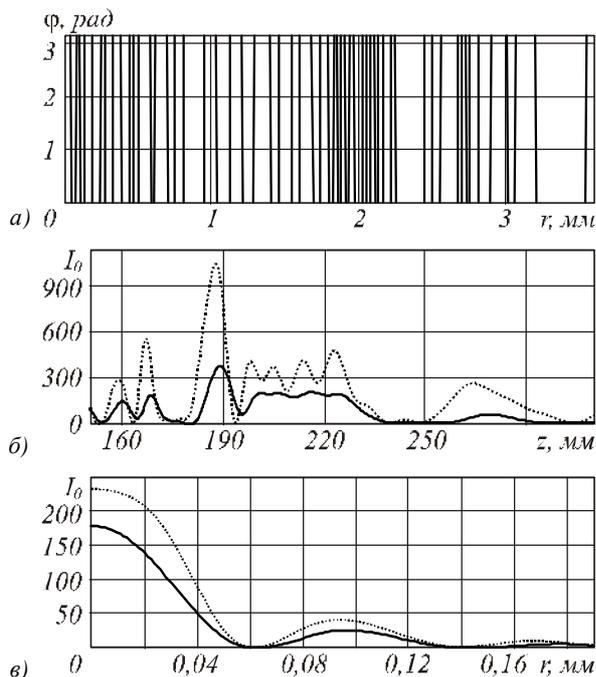


Рис. 1. Радиальное сечение фазы (а), осевое распределение интенсивности (б) и распределение интенсивности в плоскости $z = 210$ мм (в) при освещении рассматриваемого ДОЭ расчётным гауссовым (сплошная линия) и равномерным (точечная линия) пучками

Как видно на рис. 1б, на отрезке от $z_1 = 200$ мм до $z_2 = 220$ мм при использовании для освещения расчётного гауссового пучка формируется равномерное распределение осевой интенсивности (среднеквадратичное отклонение от прямой линии составляет 5%). При освещении ДОЭ плоским пучком с равномерным распределением интенсивности, ограниченным круглой диафрагмой радиуса $R = 3,6$ мм, осевое распределение несколько изменяется, осевое распределение интенсивности на заданном отрезке становится менее равномерным (среднеквадратичное отклонение от прямой линии составляет 19%), но значение интенсивности увеличивается примерно в полтора раза.

В последнем случае для наглядности можно сравнить действие оптимизированного ДОЭ с бинарным аксиконом вида:

$$\tau(r) = \exp[i \arg(J_0(\alpha r))]. \quad (1)$$

При использовании чисто фазовых аксиконов (1) формирование осевой световой нити происходит не сразу, а на некотором, иногда довольно значительном расстоянии от плоскости ДОЭ [22]. Максимальное расстояние, до которого воспроизводится световая нить, пропорционально радиусу ДОЭ и обратно пропорционально параметру бесселевого пучка α :

$$z_{\max}^{\alpha} = \frac{kR}{\alpha}, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения.

Используя выражение (2), можно предположить, что при $\alpha = 85 \text{ мм}^{-1}$ в диапазоне $z \in [200 \text{ мм}, 220 \text{ мм}]$ осевая нить фазовым ДОЭ уже будет сформирована, но ещё не начнёт разрушаться. Как видно по рис. 2, это действительно так, однако, чтобы аккуратно прописать фазовую функцию такого аксикона, нужно хотя бы 1000 отсчётов на радиус. При значительном уменьшении числа отсчётов будут возникать сильные осцилляции осевой интенсивности (рис. 2).

На рис. 3 показано сравнение равномерности осевого распределения интенсивности на более протяжённом отрезке $z \in [190 \text{ мм}, 230 \text{ мм}]$ для рассчитанного ДОЭ и бинарного аксикона с $\alpha = 85 \text{ мм}^{-1}$. Основное преимущество оптимизированного стохастическим методом ДОЭ перед бинарными аксиконами, частота периода которых пропорциональна параметру α , состоит в возможности формирования осевого отрезка близко от плоскости ДОЭ при достаточно крупном шаге дискретизации микрорельефа оптического элемента, что важно, в частности, при реализации фазовых распределений на динамических транспарантах.

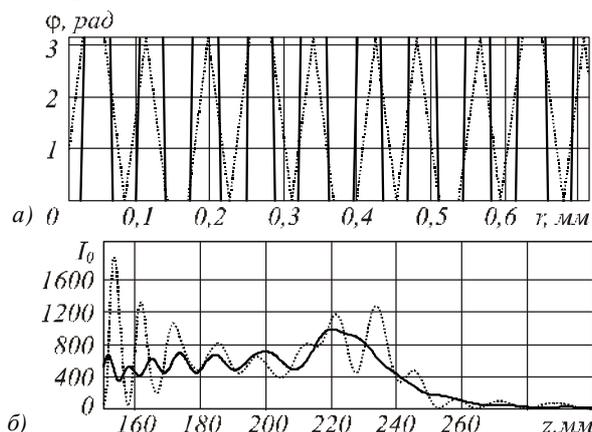


Рис. 2. Результаты моделирования действия бинарного аксикона с $\alpha = 85 \text{ мм}^{-1}$: дискретизация фазы (показан фрагмент) с шагом 3,6 мкм (сплошная линия) и 28 мкм (точечная линия) (а) и соответствующие осевые распределения интенсивности (б)

Аксикон формирует очень неравномерное распределение интенсивности – среднеквадратичное отклонение от прямой линии на отрезке от 200 мм

до 220 мм составляет 44%. По рис. 3 видно, что в отличие от аксикона, рассматриваемый ДОО производит довольно «толстый» световой отрезок. В этом состоит особенность метода расчёта, т.к. отрезок формируется из набора фокусов, расположенных близко друг к другу. В этом случае, варьируя размеры и положение фокальных областей, можно создавать практически произвольные трёхмерные фигуры.

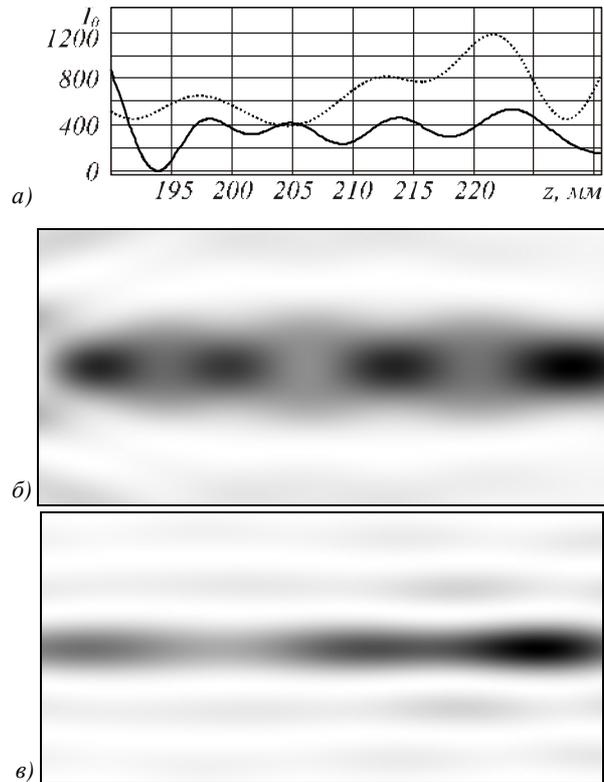


Рис. 3. Сравнение по равномерности осевого распределения интенсивности рассчитанного ДОО (сплошная линия на (а)), (б) и бинарного аксикона с $\alpha = 85 \text{ мм}^{-1}$ (точечная линия на (а)), (в) при дискретизации фазы с шагом 28 мкм. Поперечный размер на рис. (б) и (в) составляет 0,1 мм (негативное изображение)

При изменении длины волны освещающего излучения расстояние (2) изменится. В частности, если вместо $\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}$ использовать $\lambda_2 = 0,633 \text{ мкм}$, то расстояние максимального самовоспроизведения световой нити увеличится в $\lambda_1/\lambda_2 \approx 1,67$ раз. Однако при освещении ДОО излучением с длиной волны отличной от той, для которой был этот элемент изготовлен, высота микрорельефа становится неоптимальной. Оценить изменение высоты рельефа можно по формуле:

$$\varphi_2(r) = \varphi_1(r) \cdot \lambda_1/\lambda_2 \quad (3)$$

Результаты моделирования для бинарного аксикона (1) с $\alpha = 85 \text{ мм}^{-1}$ приведены на рис. 4а, по которому видно удлинение расстояния (2) и существенные изменения (в частности, уменьшение эффективности) в осевом распределении в связи с измене-

нием высоты микрорельефа по отношению к новой длине волны. Аналогичный результат получается для рассматриваемого ДОО (рис. 4б, для удобства восприятия показаны только распределения, соответствующие формируемому отрезку).

При использовании амплитудного оптического элемента негативный эффект, связанный с несогласованностью высоты рельефа и длины волны освещающего излучения, будет отсутствовать, однако общая доля энергии, поступающая в полезную область, уменьшится.

Результаты численного моделирования для оптимизированного ДОО, выполненного в виде амплитудного элемента и освещённого гауссовым пучком с радиусом перетяжки $\sigma = 2 \text{ мм}$, показаны на рис. 5. Видно, что осевая интенсивность уменьшилась почти в 8 раз и несколько изменилась форма отрезка по сравнению тем, что формирует фазовый элемент. Также видно, что в этом случае изменение длины волны освещающего излучения приводит лишь к смещению отрезка и его масштабированию.

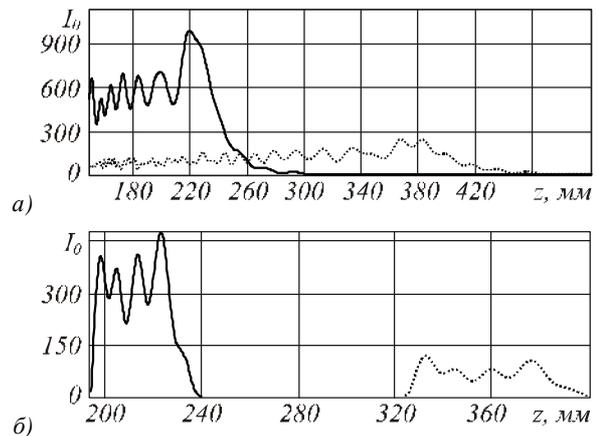


Рис. 4. Влияние уменьшения длины волны по сравнению с расчётной при освещении фазового ДОО: осевое распределение для расчётной длины волны $\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}$ (сплошная линия) и $\lambda_2 = 0,633 \text{ мкм}$ (точечная линия) для бинарного аксикона (а) и оптимизированного ДОО (б) (показаны только распределения, соответствующие формируемому отрезку)

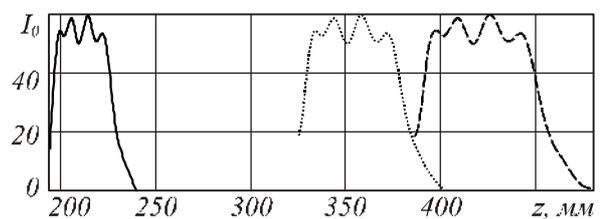


Рис. 5. Влияние уменьшения длины волны по сравнению с расчётной при освещении амплитудного оптимизированного ДОО гауссовым пучком: осевое распределение для расчётной длины волны $\lambda_1 = 1,06 \text{ мкм}$ (сплошная линия), для $\lambda_2 = 0,633 \text{ мкм}$ (точечная линия) и для $\lambda_3 = 0,532 \text{ мкм}$ (пунктирная линия)

2. Экспериментальное формирование осевого отрезка с помощью амплитудного ДОЭ

По радиальным отсчётам, рассчитанным в [21], было синтезировано изображение с шагом дискретизации 20 мкм (рис. 6а) и был изготовлен амплитудный фотошаблон (рис. 6б) на стеклянной подложке с нанесённым слоем хрома толщиной 100 нм.

Запись фотошаблона производилась на станции лазерной записи CLWS-200 путём создания защитной окисной плёнки окиси хрома на засвечиваемых участках с последующим удалением слоя хрома в жидком травителе.

Принцип действия станции основан на формировании в светочувствительном материале скрытого изображения будущих элементов. Система CLWS-200 работает в полярной системе координат. Запись топологии элементов ведётся в режиме непрерывного кругового сканирования под управлением компьютера. Во время записи рабочая заготовка, покрытая пленкой светочувствительного материала (в данном случае хрома), вращается относительно сфокусированного пучка света, который перемещается в радиальном направлении от периферии к центру. Рисунок на поверхности плёнки формируется с помощью компьютера путём программного управления мощностью излучения на каждом элементе поверхности.

Микрофотография центрального участка фотошаблона представлена на рис. 6б. Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 7.

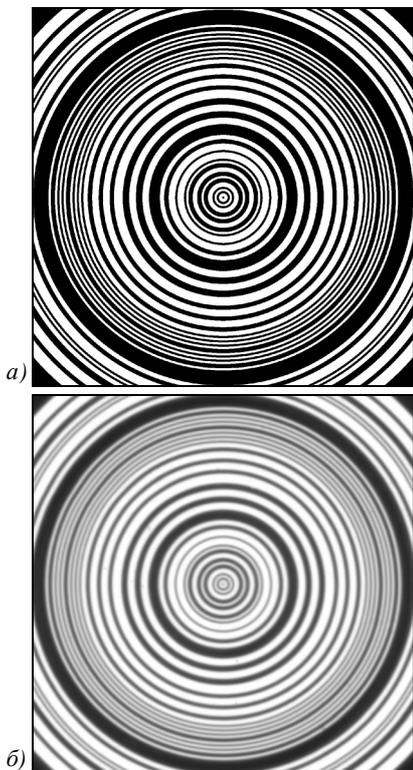


Рис. 6. Центральная часть бинарного элемента: амплитудная маска (а), вид изготовленного амплитудного ДОЭ (б), полученный с помощью высокоразрешающего сканера

Луч лазера L естественным образом расширяется (без коллиматора) до размеров дифракционного оптического элемента DOE, затем полученное распределение фиксируется CCD-камерой. В экспериментах было использовано два лазера с разными длинами волн: твердотельный лазер на неодимовом стекле с длиной волны 1,064 мкм и гелий-неоновый лазер длиной волны 0,633 мкм.

При этом твердотельный лазер на неодимовом стекле генерировал лазерную моду TEM₀₁, а гелий-неоновый лазер – моду TEM₀₀.

2.1. Эксперимент с инфракрасным излучением

Распределения интенсивности, полученные при дифракции лазерного пучка с длиной волны 1064 нм на разных расстояниях, представлены на рис. 8, а изображения (диаметром 2 мм), полученные при моделировании, приведены на рис. 9. Из сравнения экспериментальных и модельных результатов видно общее согласование картины поперечной интенсивности.

Отметим, что элемент обладает оптической силой – освещение элемента пучком TEM₁₀ привело к воспроизводству пучка TEM₁₀ вдоль фокального отрезка несмотря на то, что элемент рассчитывался для фокусировки пучка TEM₀₀.

Падающий на оптический элемент пучок имел расходимость в несколько градусов. В связи с этим в эксперименте протяжённость отрезка получилась несколько больше, чем предполагалось. Также данный факт привёл к некоторому смещению начала формирования отрезка дальше от плоскости оптического элемента.

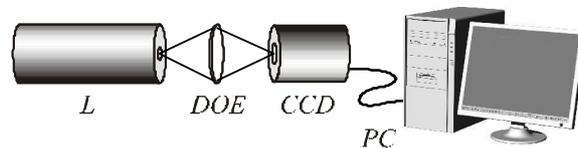


Рис. 7. Оптическая схема

Расходящийся сферический фронт можно описать выражением:

$$\tau_{sph}(r) = \exp(i\beta r^2). \quad (4)$$

Для $\lambda = 1,06$ мкм расчётный центр формируемого отрезка должен находиться на расстоянии $z_c = 210$ мм от оптического элемента, а в эксперименте центр сместился в плоскость $z_e = 235$ мм. Определить параметр расходящегося сферического фронта β в (4) можно по разности $\Delta z = z_e - z_c$:

$$\beta = \frac{k\Delta z}{2z_c(z_c + \Delta z)}. \quad (5)$$

Из выражения (5) получается $\beta = 1,6 \text{ мм}^{-2}$.

На рис. 10 показано сравнение продольных распределений интенсивности при использовании пучка TEM₀₁ излучения твердотельного лазера на неодимовом стекле в расчётном случае и при наличии слаборасходящегося сферического фронта.

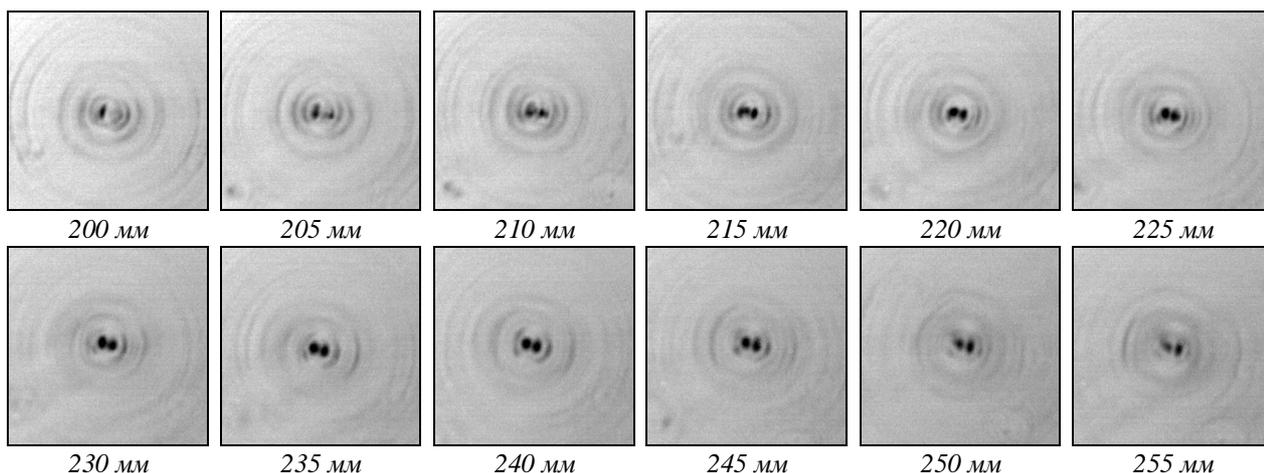


Рис. 8. Экспериментально зафиксированные распределения интенсивности на разных расстояниях от ДОО (негатив)

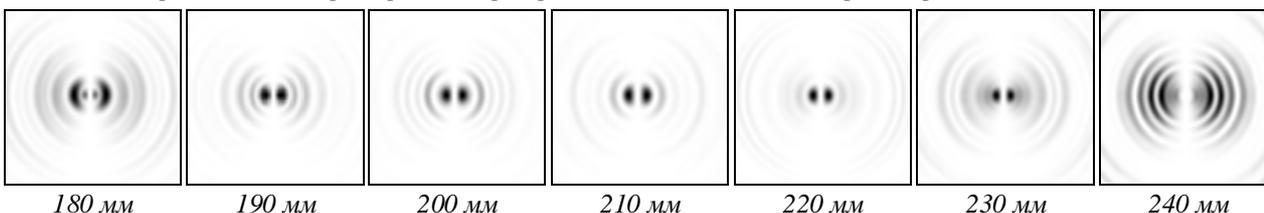


Рис. 9. Поперечные картины интенсивности при моделировании для $\lambda = 1,064$ мкм (негативное изображение)



Рис. 10. Продольные распределения интенсивности (негатив) при освещении амплитудного ДОО лазерным пучком ТЕМ₀₁ с $\lambda = 1,064$ мкм в расчётном случае (а) и при наличии слаборасходящегося сферического фронта $\beta = 1,6 \text{ мм}^{-2}$ (б) на отрезке оптической оси $z \in [180 \text{ мм}, 280 \text{ мм}]$, $x \in [-0,1 \text{ мм}, 0,1 \text{ мм}]$

Для определения интенсивности на оптической оси проводилось измерение средней интенсивности в круге с радиусом, который бы полностью захватывал центральную часть пучка. Такое усреднение необходимо выполнять в связи со сложностью точного определения положения оптической оси в натурных экспериментах. На рис. 11 представлен график зависимости усреднённой интенсивности от расстояния от ДОО.

2.2. Эксперимент с красным излучением видимого диапазона

Для гелий-неонового лазера распределения интенсивности, полученные при дифракции лазерного пучка, представлены на рис. 12, а соответствующие результаты моделирования – на рис. 13.

Для определения интенсивности на оптической оси в эксперименте проводилось измерение интенсивности в центре пучка. На рис. 13 представлен график зависимости этой интенсивности от расстояния от ДОО.

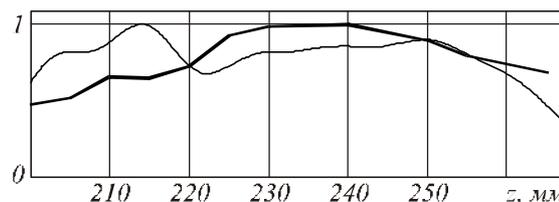


Рис. 11. Зависимость усреднённой интенсивности в центре пучка от расстояния при $\lambda = 1,064$ мкм: экспериментальные результаты (толстая линия) и результаты моделирования при наличии слаборасходящегося сферического фронта $\beta = 1,6 \text{ мм}^{-2}$ (тонкая линия)

Как видно из рис. 13, продольный отрезок для длины волны 0,633 мкм удалился от ДОО и стал существенно длиннее, чем при использовании излучения с большей длиной волны.

Для $\lambda_1 = 1,06$ мкм (расчётная длина волны) середина отрезка приходилась на $z_c = 210$ мм и протяжённость отрезка составляла $\Delta z = 30$ мм, для $\lambda_2 = 0,633$ мкм (длина волны освещающего излучения) z_c увеличится в $\lambda_1/\lambda_2 \approx 1,67$ раз, т.е. будет $z_0 = 351$ мм и $\Delta z = 50$ мм (рис. 5).

Отличие экспериментальных результатов от расчётных (рис. 13) также связано с наличием слаборасходящегося сферического фронта. По формуле (5) параметр расходящегося сферического фронта примерно равен $\beta = 2,5 \text{ мм}^{-2}$.

На рис. 14 показано сравнение продольных распределений интенсивности при формировании осевого отрезка при использовании излучения гелий-неонового лазера в расчётном случае и при наличии слаборасходящегося сферического фронта.

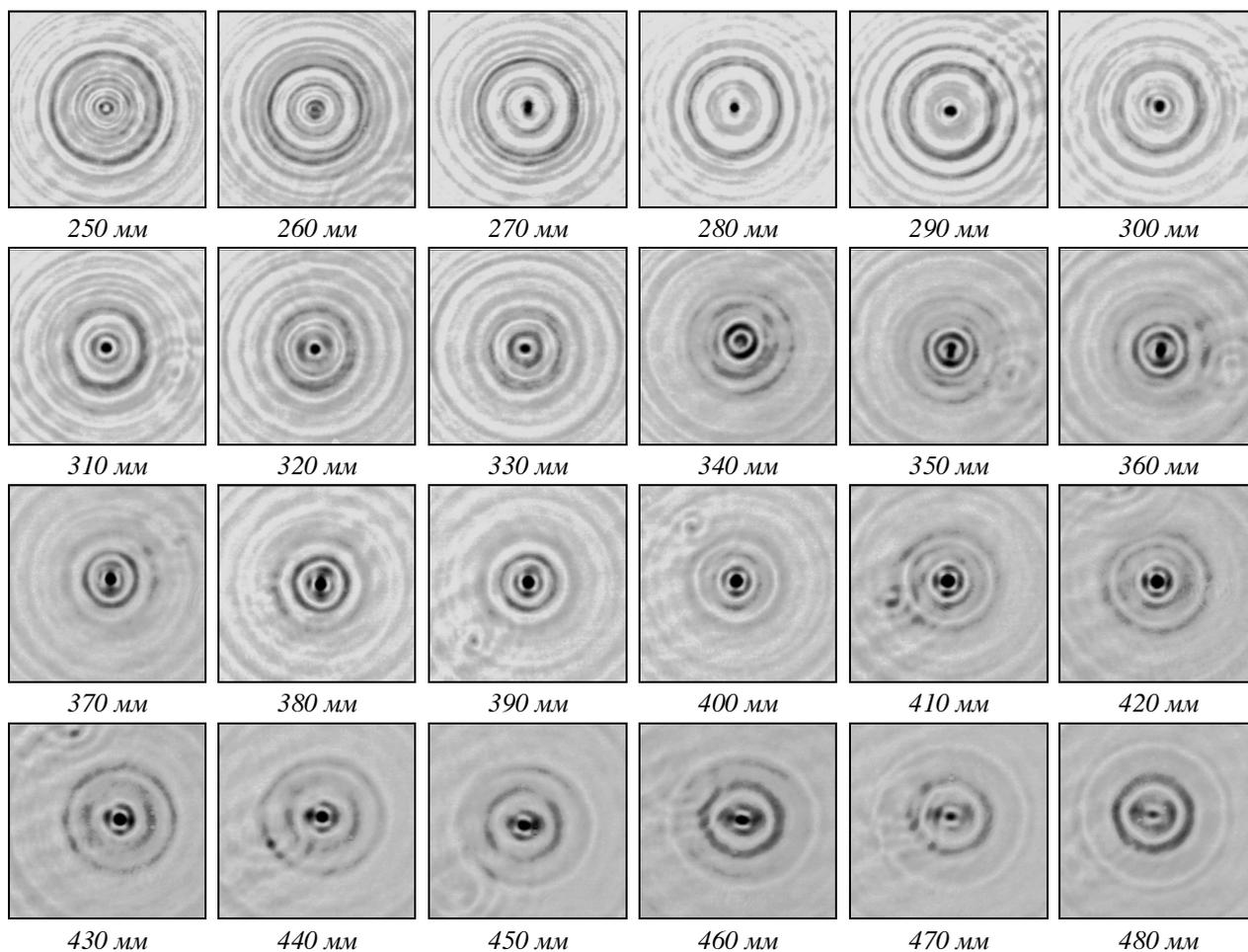


Рис. 12. Экспериментально зафиксированные распределения интенсивности на разных расстояниях от ДОЭ для длины волны $0,633 \text{ мкм}$ (негативное изображение)

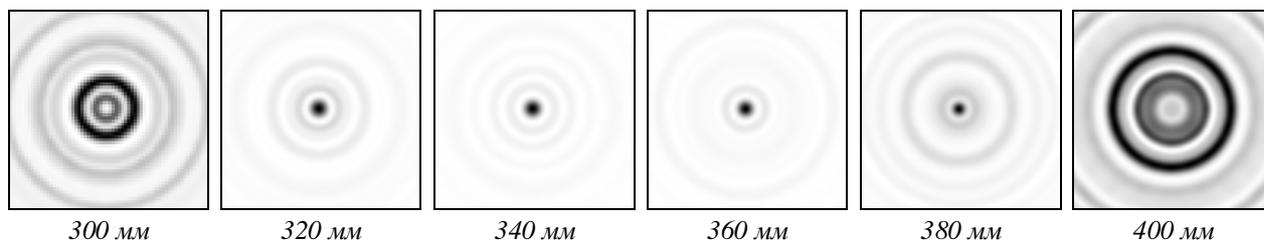


Рис. 13. Поперечные картины интенсивности при моделировании для $\lambda_2 = 0,633 \text{ мкм}$ (негативное изображение)

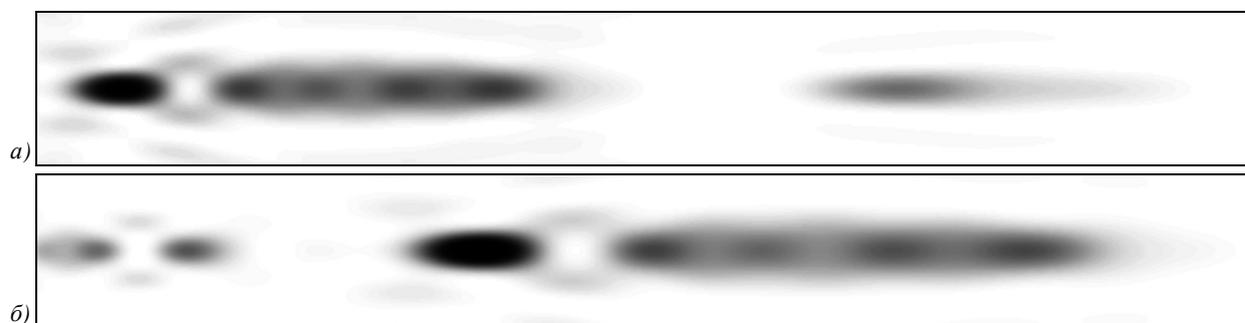


Рис. 14. Продольные распределения интенсивности (негатив) при освещении амплитудного ДОЭ лазерным пучком TEM_{00} с $\lambda = 0,633 \text{ мкм}$ в расчётном случае (а) и при наличии слаборасходящегося сферического фронта $\beta = 2,5 \text{ мм}^2$ (б) на отрезке оптической оси $z \in [300 \text{ мм}, 500 \text{ мм}]$, $x \in [-0,1 \text{ мм}, 0,1 \text{ мм}]$

Для определения в эксперименте интенсивности на оптической оси проводилось измерение средней интенсивности в круге с радиусом, который бы полностью захватывал центральную часть пучка. На рис. 15 представлен график зависимости усреднённой интенсивности от расстояния от ДОЭ.

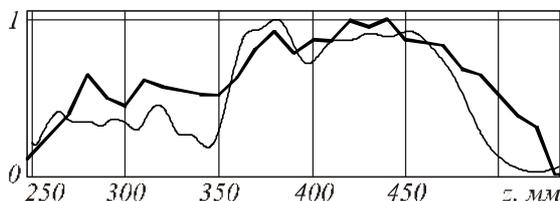


Рис. 15. Зависимость усреднённой интенсивности в центре пучка от расстояния при $\lambda = 0,633$ мкм: экспериментальные результаты (толстая линия) и результаты моделирования при наличии слаборасходящегося сферического фронта $\beta = 2,5$ мм² (тонкая линия)

Заключение

В работе проведено численное и экспериментальное исследование характеристик бинарного ДОЭ, предназначенного для формирования осевого отрезка, в условиях изменения параметров освещающего пучка.

Основное преимущество оптимизированного стохастическим методом ДОЭ для получения равномерного распределения интенсивности на заданном отрезке перед бинарными аксиконами состоит в возможности формирования осевого отрезка близко от плоскости ДОЭ при достаточно крупном шаге дискретизации микрорельефа оптического элемента, что важно, в частности, при реализации фазовых распределений на динамических транспарантах.

При исследовании оптимизированного бинарного ДОЭ рассмотрено три типа освещающего пучка: ТЕМ00, ТЕМ01 и пучок с равномерным распределением интенсивности, ограниченный круглой апертурой радиуса ДОЭ. При замене гауссового (расчётного) пучка равномерным интенсивность на заданном отрезке становится менее равномерной (среднеквадратичное отклонение от прямой линии увеличивается с 5% до 19%), но осевая интенсивность увеличивается (в рассмотренном случае в полтора раза). Отметим, что элемент обладает оптической силой – освещение элемента пучком ТЕМ10 привело к воспроизведению пучка ТЕМ10 вдоль фокального отрезка несмотря на то, что элемент рассчитывался для фокусировки пучка ТЕМ00.

Также проведено моделирование изменения длины волны в случае исполнения ДОЭ в виде фазового или амплитудного оптического элемента. При отличии длины волны освещающего излучения (λ_2) от расчётной (λ_1) протяжённость формируемого светового отрезка изменится λ_1/λ_2 раз, т.е. увеличится при уменьшении длины волны (осевая интенсивность будет пропорционально уменьшаться). Однако при использовании фазового ДОЭ высота микрорельефа становится неоптимальной. При ис-

пользовании амплитудного оптического элемента негативный эффект, связанный с несогласованностью высоты рельефа и длины волны освещающего излучения, будет отсутствовать.

Для предварительной экспериментальной верификации проведённых численных исследований был изготовлен амплитудный ДОЭ. Анализ полученных экспериментальных результатов (при использовании лазерного излучения с различными длинами волн) с учётом небольшой расходимости волнового фронта освещающего пучка показал хорошее согласование с результатами моделирования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010, гранта президента РФ МД-8026.2010.2 и Государственного контракта № 02.740.11.0805

Литература

1. Wang, K. Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement / K. Wang, L. Zeng, and Ch. Yin // Opt. Commun. – 2003. – Vol. 216. – P. 99-103.
2. Lu, J.-Y. Diffraction-limited beams and their applications for ultrasonic imaging and tissue characterization / Jian-yu Lu, J. F. Greenleaf // Proc. SPIE. – 1992. – Vol. 1733. – P. 92-119.
3. Leitgeb, R.A. Extended focus depth for Fourier domain optical coherence microscopy / R.A. Leitgeb, M. Villiger, A.H. Bachmann, L. Steinmann, and T. Lasser // Opt. Lett. – 2006. – Vol. 31, N 16. – P. 2450-2452.
4. Lee, K.-S. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range / Kye-Sung Lee, Jannick P. Rolland // Opt. Lett. – 2008. – Vol. 33, N 15. – P. 1696-1698.
5. Lu, J.-Y. Producing deep depth of field and depth-independent resolution in NDE with limited diffraction beams / Jian-yu Lu, J. F. Greenleaf // Ultrason. Imag. – 1993. – Vol. 15, N 2. – P. 134-149.
6. Lunazzi, J.J. Photographing by means of a diffractive axicon / José J. Lunazzi, Daniel S. F. Magalhães // XXIX ENFMC – Annals of Optics. – 2006. – P. 1-4.
7. Arimoto, R. Imaging properties of axicon in a scanning optical system / R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka, and S. Kawata // Appl. Opt. – 1992. – Vol. 31, N 31. – P. 6653-6657.
8. Fortin, M. Optical tests with Bessel beam interferometry / Mathieu Fortin, Michel Piché and Ermanno F. Borra // Optics Express. – 2004. – Vol. 12, N 24. – P. 5887-5895.
9. Reichelt, S. Self-calibration of wavefront testing interferometers by use of diffractive elements / Stephan Reichelt, Hans Tiziani, Hans Zappe // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6292. – P. 629205.1-629205.10.
10. McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element // J. Opt. Soc. Am. – 1954. – Vol. 44. – P. 592-597.
11. Голуб, М.А. Фокусировка излучения в заданную область пространства / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.

12. **Голуб, М.А.** Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
13. **Kazanskii, N.L.** Correction of focuser phase function by computer-experimental methods // *Computer Optics*. Pergamon Press. – 1989. – Vol. 1, N 1. – P. 69-73.
14. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol. 101, N 2. – P. 37-41.
15. **Котляр, В.В.** Дифракционный расчёт фокусаторов в продольный отрезок / В.В. Котляр, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // *Письма в ЖТФ*. – 1991. – Т. 17, № 24. – С. 63-66.
16. **Gerchberg, R.W.** A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures / R.W. Gerchberg, W.O. Saxton // *Optik*. – 1972. – Vol. 35. – P. 237.
17. *Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Сойфера*. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
18. **Волков, А.В.** Бинарный дифракционный оптический элемент для фокусировки гауссового пучка в продольный отрезок / А.В. Волков, В.В. Котляр, О.Ю. Моисеев, О.Е. Рыбаков, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // *Оптика и спектроскопия*. – 2000. – Т. 89, № 2. – С. 347-352.
19. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, № 11. – P. 3610-3615.
20. **Сойфер, В.А.** Синтез бинарного фокусатора в произвольную кривую в электромагнитном приближении / В.А. Сойфер, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 1996. – № 16. – С. 22-27.
21. **Качалов, Д.Г.** Оптимизация бинарных ДОЭ для формирования продольных распределений интенсивности / Д.Г. Качалов, В.С. Павельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 441-445.
22. **Хонина, С.Н.** Сравнительный анализ распределений интенсивности, формируемых дифракционным аксиконом и дифракционным логарифмическим аксиконом / С.Н. Хонина, С.А. Балалаев // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 162-174.
6. **Lunazzi, J.J.** Photographing by means of a diffractive axicon / José J. Lunazzi, Daniel S. F. Magalhães // *XXIX ENFMC – Annals of Optics*. – 2006. – P. 1-4.
7. **Arimoto, R.** Imaging properties of axicon in a scanning optical system / R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka, and S. Kawata // *Appl. Opt.* – 1992. – Vol. 31, N 31. – P. 6653-6657.
8. **Fortin, M.** Optical tests with Bessel beam interferometry / Mathieu Fortin, Michel Piché and Ermanno F. Borra // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12, N 24. – P. 5887-5895.
9. **Reichelt, S.** Self-calibration of wavefront testing interferometers by use of diffractive elements / Stephan Reichelt, Hans Tiziani, Hans Zappe // *Proc. of SPIE*. – 2006. – Vol. 6292. – P. 629205.1-629205.10.
10. **McLeod, J.H.** The axicon: a new type of optical element // *J. Opt. Soc. Am.* – 1954. – Vol. 44. – P. 592-597.
11. **Golub, M.A.** Radiation focusing in the set area of space / M.A. Golub, S.V. Karpeev, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *JETP Letters*. – 1981. – Vol. 7, No. 10. – P.618-623. – (in Russian).
12. **Golub, M.A.** Computing experiment with elements of plain optics / M.A. Golub, N.L. Kazanskii, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // *Avtometria*. – 1988. – N 1. – P. 70-82. – (in Russian).
13. **Kazanskii, N.L.** Correction of focuser phase function by computer-experimental methods // *Computer Optics*. Pergamon Press. – 1989. – Vol. 1, N 1. – P. 69-73.
14. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol. 101, N 2. – P. 37-41.
15. **Kotlyar V.V.** Calculation of the focusators into a longitudinal line segment / V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, S.N. Khonina, *JETP Letters*. – 1991. – Vol. 17, No. 24. – P. 63-66. – (in Russian).
16. **Gerchberg, R.W.** A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures / R.W. Gerchberg, W.O. Saxton // *Optik*. – 1972. – Vol. 35. – P. 237.
17. *Methods of Computer Optics (Secondary Edition) / edited by V.A. Soifer – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2003. – 688 p. – (in Russian).*
18. **Volkov, A.V.** Binary Diffraction Optical Element Focusing a Gaussian Beam to a Longitudinal Segment / A.V. Volkov, V.V. Kotlyar, O.V. Moiseev, O.E. Rybakov, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, and S.N. Khonina // *Optics and Spectroscopy*. – 2000. – Vol. 89. – No.2. – P.347-352. – (In Russian).
19. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 33, № 11. – P. 3610-3615.
20. **Soifer, V.A.** Synthesis of a binary focusator in any curve in electromagnetic approach / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // *Computer optics*. – 1996. – N 16. – P. 22-27. – (In Russian).
21. **Kachalov, D.G.** Optimization of binary DOE forming intensity distribution along an axial focal zone / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina // *Computer optics*. – 2009. – V. 33, N 4. – P. 441-445. – (In Russian).
22. **Khonina, S.N.** The comparative analysis of the intensity distributions formed by diffractive axicon and diffractive logarithmic axicon / S.N. Khonina, S.A. Balalaev // *Computer optics*. – 2009. – V. 33, N 2. – P. 162-174. – (In Russian).

References

1. **Wang, K.** Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement / K. Wang, L. Zeng, and Ch. Yin // *Opt. Commun.* – 2003. – Vol. 216. – P. 99-103.
2. **Lu, J.-Y.** Diffraction-limited beams and their applications for ultrasonic imaging and tissue characterization / Jian-yu Lu, J. F. Greenleaf // *Proc. SPIE*. – 1992. – Vol. 1733. – P. 92-119.
3. **Leitgeb, R.A.** Extended focus depth for Fourier domain optical coherence microscopy / R.A. Leitgeb, M. Villiger, A.H. Bachmann, L. Steinmann, and T. Lasser // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31, N 16. – P. 2450-2452.
4. **Lee, K.-S.** Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range / Kye-Sung Lee, Jan-nick P. Rolland // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33, N 15. – P. 1696-1698.
5. **Lu, J.-Y.** Producing deep depth of field and depth-independent resolution in NDE with limited diffraction beams / Jian-yu Lu, J. F. Greenleaf // *Ultrason. Imag.* 1993. Vol. 15, № 2. P. 134-149.

INVESTIGATION OF THE AXIAL LINE FORMATION BY OPTIMIZED BINARY DOE

S.N. Khonina^{1,2}, *R.V. Skidanov*^{1,2}, *D.G. Kachalov*², *V.S. Pavelyev*^{1,2}, *O.Y. Moiseev*¹
¹ *Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute RAS,*
² *Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev*

Abstract

Numerical and experimental investigation of the optimized binary DOE intended to form an axial line with uniform intensity is realized for various parameters of an illuminating beam.

Key words: binary axicon, diffractive optical element (DOE), axial light line, laser beam, phase and amplitude DOE.

Сведения об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. **E-mail:** khonina@smr.ru .

Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. **E-mail:** khonina@smr.ru.

Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 60 статей, 3 монографии. **E-mail:** romans@smr.ru .

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 60 scientific papers, 3 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. **E-mail:** romans@smr.ru.



Качалов Денис Георгиевич, инженер кафедры нанотехнологий, м.н.с. научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. **E-mail:** kachalov@ssau.ru. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы стохастической оптимизации.

Denis Georgievich Kachalov, engineer of Nanoengineering Department and researcher of Research and Educational Center "Nanotechnology" of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev. **E-mail:** kachalov@ssau.ru. Research interests: diffractive optics, methods of stochastic optimization.



Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН.

E-mail: pavelyev@smr.ru.

Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.



Моисеев Олег Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН.

E-mail: moiseev@smr.ru.

Область научных интересов: технологические процессы создания микроструктур дифракционной оптики.

Oleg Yurevich Moiseev, Candidate of Technical Sciences; senior staff scientist of the Image Processing Systems Institute of the RAS. E-mail: moiseev@smr.ru.

Research interests: technological process of diffractive optics.

Поступила в редакцию 31 августа 2010 г.