

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДОВЫХ АСТИГМАТИЧЕСКИХ КОНВЕРТЕРОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2009 С.Н. Хонина, С.В.Карпеев, А.В. Устинов

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Поступила в редакцию 15.09.2009

Рассмотрены различные типы астигматических модовых конвертеров и реализованы численные алгоритмы моделирования их действия при поступлении на вход произвольно заданных комплексных распределений. Предложено расширение функциональных возможностей классических астигматических модовых конвертеров на основе дополнения их ДОЭ, позволяющих эффективно преобразовывать фундаментальную моду лазерного излучения в любое заданное распределение. Сочетание ДОЭ с астигматическим конвертером наиболее оправдано для легко изготавливаемых простых типов бинарных элементов. Экспериментально реализованы расширенные трехлинзовый и однолинзовый астигматические конвертеры. Представлены экспериментальные результаты одновременной конвертации набора из нескольких мод Эрмита-Гаусса в обычные и эллиптические моды Лагерра-Гаусса, а также впервые выполнено преобразование набора оптических чистых вихрей.

Ключевые слова: астигматический модовый конвертер, фаза Гоу, моды Эрмита-Гаусса, моды Лагерра-Гаусса, оптические вихри, эллиптические моды, многопорядковые дифракционные оптические элементы

ВВЕДЕНИЕ

Генерация световых пучков с вихревыми фазовыми особенностями, нашедшими успешное применение во многих областях от космических до нано-масштабов [1-5], является актуальной задачей, объясняющей большое количество работ и разнообразие подходов для ее решения.

Сингулярные особенности в световых полях могут появляться при их прохождении через случайно-неоднородные и нелинейные среды. Также возможно возбуждение вихревых полей в лазерных резонаторах и многомодовых волоконных световодах. Наиболее простым и управляемым способом формирования вихревых полей является использование спиральных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), а также динамических жидкокристаллических транспарантов (энергетическая эффективность последних пока еще довольно низка). Простейшими примерами таких ДОЭ являются спиральная фазовая пластинка и спиральный аксикон [6, 7]. Однако изготовление многоуровневого рельефа, характерного для упомянутых ДОЭ, все еще является довольно сложной проблемой. А применение квантованного (особенно бинарного) кодирования приводит к неизбежной потере эффективности.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: khonina@smr.ru.

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: karp@smr.ru.

Устинов Андрей Владимирович, ведущий программист.

E-mail: andr@smr.ru.

С другой стороны существуют модовые распределения, которые можно формировать с помощью простых в реализации бинарных ДОЭ с высокой (около 80%) эффективностью [8]. Примером таких распределений являются моды Эрмита-Гаусса (ЭГ), которые без потери энергии можно преобразовать в вихревые моды Лагерра-Гаусса (ЛГ) с помощью астигматических оптических элементов [9, 10].

Отличие от классического подхода, когда на входе конвертеров используется излучение из лазера (в основном моды низкого порядка), применение ДОЭ позволяет подавать на вход конвертера любое заданное распределение, эффективно преобразованное из фундаментальной моды лазерного излучения. Это существенно расширяет возможности классических модовых конвертеров без существенной потери эффективности и позволяет построить новые модификации оптических преобразователей.

1. СВЯЗЬ МОД ЭРМИТА-ГАУССА И ЛАГЕРРА-ГАУССА

ЭГ и ЛГ моды являются решением параксиального волнового уравнения соответственно в декартовых и цилиндрических координатах. Астигматические конвертеры, преобразующие эти типы мод друг в друга, построены на их связи между собой:

$$u_{nm}^{LG}(x, y, z) = \sum_{k=0}^N i^k b(n, m, k) u_{N-k, k}^{HG}(x, y, z), \quad (1)$$

Таблица 1. Получение мод ЛГ через сумму мод ЭГ

Суперпозиция	Интенсивность	Фаза
$u_{01}^{LG}(x, y, z) = u_{01}^{HG}(x, y, z) + i u_{10}^{HG}(x, y, z)$		
$u_{10}^{LG}(x, y, z) = u_{01}^{HG}(x, y, z) - i u_{10}^{HG}(x, y, z)$		
$u_{02}^{LG}(x, y, z) = u_{02}^{HG}(x, y, z) - i\sqrt{2}u_{11}^{HG}(x, y, z) - u_{20}^{HG}(x, y, z)$		
$u_{12}^{LG}(x, y, z) = u_{12}^{HG}(x, y, z) + u_{21}^{-G}(x, y, z)$		
$u_{13}^{LG}(x, y, z) = \sqrt{3}u_{13}^{HG}(x, y, z) + i u_{13}^{HG}(x, y, z) + u_{21}^{HG}(x, y, z) + i\sqrt{3}u_{30}^{HG}(x, y, z)$		
$u_{14}^{LG}(x, y, z) = \sqrt{15}u_{14}^{HG}(x, y, z) - i\sqrt{10}u_{13}^{HG}(x, y, z) + u_{21}^{HG}(x, y, z) - 2i\sqrt{3}u_{22}^{HG}(x, y, z) - u_{21}^{HG}(x, y, z) - i\sqrt{10}u_{31}^{HG}(x, y, z) - \sqrt{15}u_{40}^{HG}(x, y, z)$		

где $b(n, m, k)$ – вещественные коэффициенты, вычисляемые по формуле:

$$b(n, m, k) = \left(\frac{(N-k)!k!}{2^N n!m!} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{k!} \frac{d^k}{dt^k} \left[(1-t)^n (1+t)^m \right]_{t=0}. \quad (2)$$

В ур. (1) $u_{nm}^{HG}(x, y, z)$ – мода ЭГ, $u_{nm}^{LG}(x, y, z)$ – мода ЛГ, $N = n + m$.

Заметим, что индексы, использованные в формуле (1) несколько отличаются от привычных индексов, используемых для обозначения ЛГ-мод. Радиальный индекс p обычно используется как $\min(n, m)$, азимутальный индекс l – как разность $n - m$.

В табл. 1 приведены несколько примеров преобразования мод ЭГ в моды ЛГ.

Легко заметить, что в сумме (1) участвуют моды ЭГ с индексами $n + m = const$, что обеспечивает модовые свойства всей суперпозиции в целом [11].

Известно также [9, 10], что диагональные ЭГ-моды можно разложить в ряд по обычным модам ЭГ по формуле, аналогичной (1):

$$u_{nm}^{HG} \left(\frac{x+y}{\sqrt{2}}, \frac{x-y}{\sqrt{2}}, z \right) = \sum_{k=0}^N b(n, m, k) u_{N-k, k}^{HG}(x, y, z), \quad (3)$$

где $b(n, m, k)$ – те же вещественные коэффициенты, вычисляемые по формуле (2). Отличие состоит только в множителе i^k , который соответствует набегу фазы $(\pi/2)^k$. Это значит, что из диагональных ЭГ-мод можно получить ЛГ-моды выполнив соответствующее домножение каждого члена суперпозиции.

Изотропный набег фазы (фаза Гоу) происходит при распространении гауссового лазерного пучка в свободном пространстве и прохождении через сферические линзы, в астигматических же модовых конвертерах выполняется анизотропный набег фазы [10].

2. АСТИГМАТИЧЕСКИЕ МОДОВЫЕ КОНВЕРТЕРЫ

Одними из первых в этом направлении начали работать Е. Абрамочкин и В. Волостников, показавшие, что ЛГ-моды можно получать из ЭГ-мод. В работе [9] ими рассматривается преобразование лазерных пучков под влиянием астигматизма и параксиальное распространение лазерных пучков в свободном пространстве, а также найдено интегральное преобразование ЭГ-мод в ЛГ моды и представлены результаты натурных экспериментов.

Тема получила активное развитие, и стали появляться другие способы решения проблемы.

В 1993 году была опубликована работа [10] нидерландских ученых. В ней рассматривается разложение ЛГ-моды в линейную комбинацию ЭГ-мод и приведены схемы конвертеров с цилиндрическими линзами, действие которых построено на использовании анизотропной фазы Гоу. Также дано экспериментальное сравнение астигматических $\pi/2$ - и π -конвертеров.

Также экспериментальные результаты энергетически эффективного преобразования ЭГ-пучка в ЛГ-пучок, и наоборот были опубликованы в [12]. В работе описано действие модового конвертера, состоящего из двух цилиндрических линз с перпендикулярными главными плоскостями, помещёнными между двумя сферическими линзами. Показано, что данное устройство обладает меньшей чувствительностью к согласованию астигматических элементов.

В статье [13] проанализировано использование двухлинзового астигматического конвертера. Моделируя параксиальное распространение пучков, авторы исследуют влияние погрешностей входного модового распределения и отклонений в расположении линз и других вариаций в реализации конвертера на результирующий пучок.

В 2007 вышла статья [14] китайских ученых, в которой вихревой ЛГ-пучок был получен с помощью оптической системы, состоящей из трёх повёрнутых цилиндрических линз. Распределение интенсивности и фазовая структура пучка были теоретически исследованы с использованием дифракционного интеграла Коллинза и метода декомпозиции мод. Также был проведён эксперимент, где микрочастицы были захвачены и вращались в сформированном вихревом пучке.

Как следует из обзора, конвертеры рассматриваемого вида могут состоять из различного числа линз и иметь различные оптические характеристики. При этом, как было отмечено выше, на результат действия конвертера влияет соотношение параметров лазерного пучка и оптических параметров установки. Рассмотрим конвер-

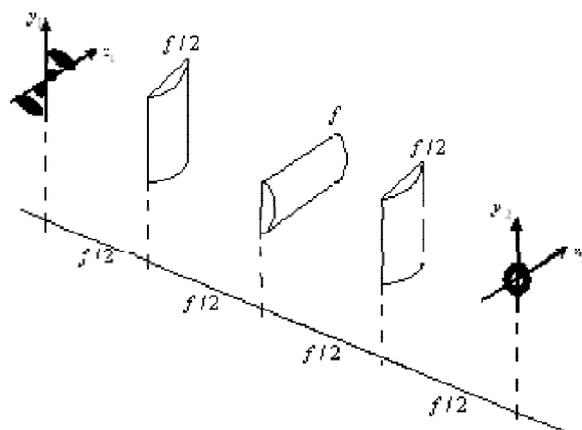


Рис. 1. Трёхлинзовый $\pi/2$ конвертер

тер, состоящий из трёх цилиндрических линз, изображенный на рис. 1.

Возникает вопрос, какими способами производить моделирование и прогнозировать результаты прохождения через такую оптическую систему.

В работе [15] американскими учеными были изучены точность и эффективность применения интегральных методов скалярной теории дифракции для моделирования действия дифракционных цилиндрических линз, а также приводится информация о практическом их применении. Аналогичные рассуждения приводятся в [16], в которой рассматривается применение метода граничных элементов для построения параллельного пучка из дифракционных цилиндрических линз с различным числом уровней квантования, проводится сравнение с результатами скалярной аппроксимации.

С другой стороны, в работах А.А. Малютина [17, 18] показана возможность использования дробного преобразования Фурье (ДПФ) для реализации различных оптических схем астигматических конвертеров ЭГ-мод в ЛГ-моды. В работах проводится систематический анализ принципов построения конвертеров на основе ДПФ полуцелого и иррационального порядков и приведено сравнение результатов, полученных на основе дробного и обыкновенного преобразований Фурье. Также рассмотрены схемы перестраиваемого астигматического $\pi/2$ -конвертера, обеспечивающего использование входных пучков с изменяемой в два раза рэлеевской длиной, причем вариации длины самого оптического конвертера не превышают шестой части. Для перестройки фокусного расстояния цилиндрических компонентов конвертера требуется только вращение одного из них вокруг своей оптической оси.

Одномерное ДПФ порядка t можно записать в следующем виде [17]:

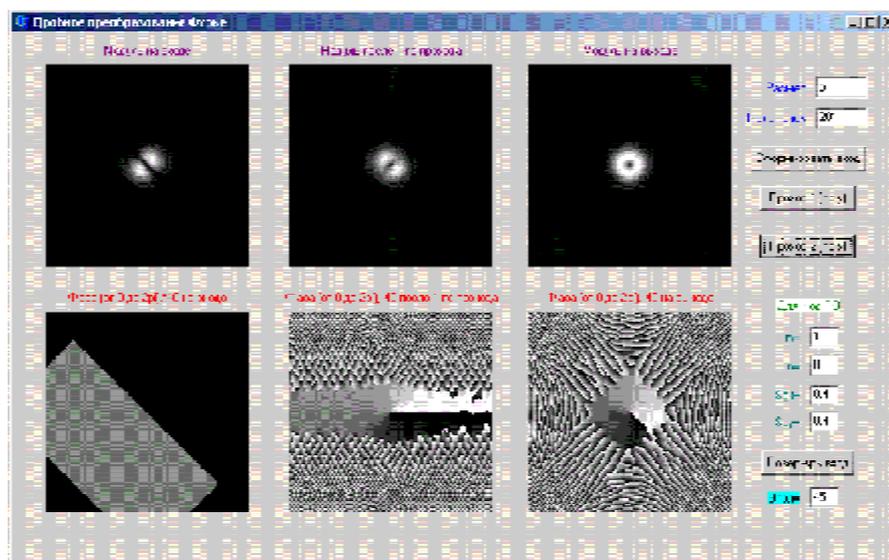


Рис. 2. Моделирование действия трехлинзового конвертора на основе использования ДПФ.

$$F(\xi) = \frac{\exp(i\pi t/4)}{\sqrt{i \sin(\pi t/2)}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp\left\{i\pi \left[\frac{x^2 + \xi^2}{\operatorname{tg}(\pi t/2)} - \frac{2x\xi}{\sin(\pi t/2)} \right]\right\} dx. \quad (4)$$

При $t=1$ выражение (4) сводится к обычному преобразованию Фурье. Также его можно получить последовательным выполнением ДПФ порядков t и $1-t$, при $t < 1$.

Формально связать обычное преобразование Фурье и ДПФ можно оператором вращения на угол $\alpha = \pi t/2$.

Двумерные моды ЭГ легко факторизуются к одномерному случаю и являются инвариантными к ДПФ с точностью до комплексного множителя $\exp(-i\pi n t/2)$, где n – порядок моды. Используя эти свойства в [17] строятся различные оптические схемы с использованием цилиндрических линз.

На рис. 2 показаны результаты моделирования действия трехлинзового конвертора (см. рис. 1) на основе использования ДПФ.

Такое моделирование позволяет оценить влияние характеристик входного пучка (масштаба пучка, его вытянутости и отклонения от идеального распределения) на выходной результат. Ниже в табл. 2 приводятся некоторые примеры влияния несогласованности характеристик входного пучка с параметрами оптической схемы.

Из табл. 2 видно, что при несогласовании масштаба, внесении эллиптичности или дополнительном вращении входного пучка происходит формирование распределений, отличных от мод ЛГ и близких к модам Инса-Гаусса [19, 20] и эллиптическим пучкам ЛГ [21]. Интересно, что такие распределения можно получить простым наклоном относительно оптической оси (т.е. внесением астигматизма) ДОЭ, формирующего модовый пучок [22].

3. ПРОХОЖДЕНИЕ МОДОВЫХ ПУЧКОВ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ЛИНЗУ

Далее более подробно рассматривается прохождение модовых пучков через цилиндрическую линзу (рис. 3) в рамках непараксиальной скалярной теории дифракции.

Прохождение светового пучка с комплексным распределением $U_0(u, v)$ через цилиндрическую линзу, расположенную на расстоянии a от входной плоскости и расстоянии b от выходной плоскости, можно моделировать следующим образом.

Непараксиальное распространение до линзы на расстояние $z=a$ описывается выражением:

$$U_a(x, y) = \frac{ika}{2\pi} \iint U_0(u, v) \frac{\exp\left[ik\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + a^2}\right]}{(x-u)^2 + (y-v)^2 + a^2} dudv. \quad (5)$$

Затем выполняется умножение на комплексную функцию непараксиальной цилиндрической линзы с фокусным расстоянием f , повернутую на угол b :

$$U_l(x, y) = U_a(x, y) \cdot \exp\left[-ik\left(\sqrt{f^2 + (x \cos \beta + y \sin \beta)^2} - f\right)\right] \quad (6)$$

и производится распространение после линзы на расстояние $z=b$:

$$F(x, y) = \frac{ikb}{2\pi} \iint U_l(u, v) \frac{\exp\left[ik\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + b^2}\right]}{(x-u)^2 + (y-v)^2 + b^2} dudv. \quad (7)$$

При вычислении выражений (5) и (6) был применен быстрый алгоритм, описанный в работе [23]. Численное моделирование по формулам (5)-(7) позволяет найти оптимальное соотношение радиуса перетяжки моды ЭГ и фокусного расстояния линзы, а также проследить динамику

Таблица 2. Влияния несогласованности характеристик входного пучка ($\sigma_x/R, \sigma_y/R$ – отношение радиусов перетяжки к радиусу входной области, ψ – угол поворота входной моды с индексами (m, n)) с параметрами оптической схемы

Входной пучок		Выходной пучок	
Характеристики	Амплитуда	Амплитуда	Фаза
$m=1, n=0,$ $\sigma_x/R = 0,24,$ $\sigma_y/R = 0,24,$ $\psi=45^\circ$			
$m=1, n=0,$ $\sigma_x/R = 0,12,$ $\sigma_y/R = 0,12,$ $\psi=45^\circ$			
$m=5, n=0,$ $\sigma_x/R = 0,08,$ $\sigma_y/R = 0,32,$ $\psi=45^\circ$			
$m=5, n=0,$ $\sigma_x/R = 0,32,$ $\sigma_y/R = 0,08,$ $\psi=45^\circ$			
$m=5, n=0,$ $\sigma_x/R = 0,32,$ $\sigma_y/R = 0,08,$ $\psi=60^\circ$			

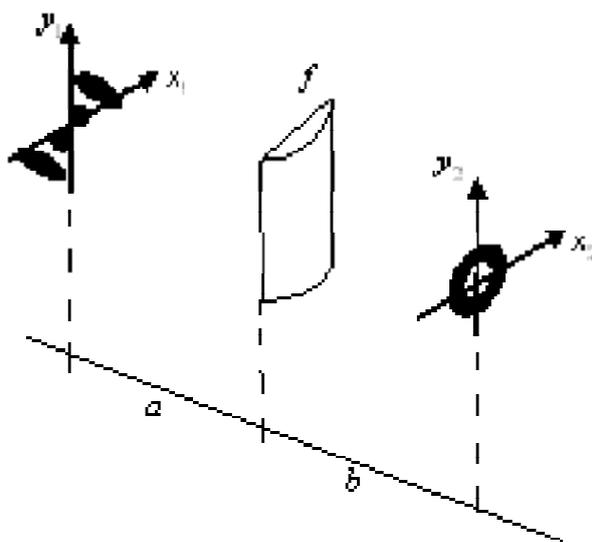


Рис. 3. Прохождение модового пучка через цилиндрическую линзу

ку изменения распределения поля на различных расстояниях после астигматической линзы. На рис. 4 показаны результаты непараксиального моделирования прохождения моды ЭГ u_{70}^{HG} , при следующих параметрах: фокусное расстояние цилиндрической линзы $f = 300$ мм, радиус входного поля $R = 3$ мм, радиус перетяжки $\sigma_x = \sigma_y = 0,26$ мм, расстояние до линзы было выбрано $a=0$, а расстояние после линзы b варьировалось от 100 мм до 1200 мм.

Из рис. 4 видно, что поле после одного астигматического преобразования пучок теряет свои модовые свойства (для их восстановления нужна еще одна цилиндрическая линза), но приобретает вихревую составляющую и становится близок к эллиптическим пучкам ЛГ [21]. Стоит отметить, что на расстоянии $b=2f$ распределение является симметричным, а затем приобретает наклон в противоположную сторону.

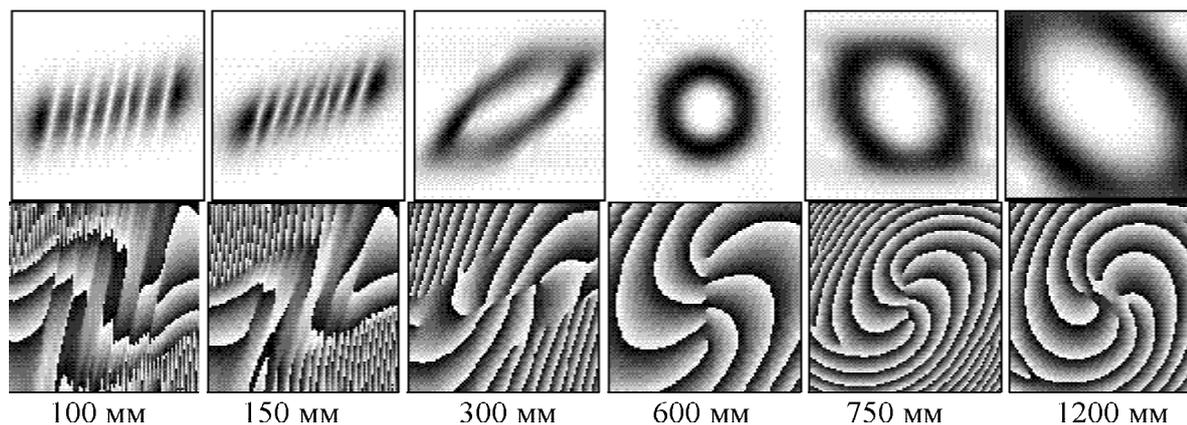


Рис. 4. Комплексное распределение поля (верхняя строка – инертированная интенсивность, нижняя строка – фаза) моды ЭГ u_{70}^{HG} на различных расстояниях после цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $f = 300$ мм

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО АСТИГМАТИЧЕСКОМУ ПРЕОБРАЗОВАНИЮ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Расширение возможностей известных астигматических модовых конвертеров предлагается на основе использования ДОЭ в качестве формирователей входного распределения практически любого типа. Причем это может быть не отдельный лазерный пучок, а целый набор заданных распределений [24, 25]. Так, в работе [21] были экспериментально сформированы эллиптические ЛГ-пучки с помощью наклона к оптической оси многопорядкового ДОЭ, производящего 42 обычные моды ЛГ.

В данном разделе рассматривается астигматическое преобразование набора мод ЭГ и оптических чистых вихрей [26], сформированных с помощью многопорядковых ДОЭ.

На рис. 5 показано действие 16-уровневого фазового многопорядкового ДОЭ, формирующего 28 мод ЭГ.

Фазовый ДОЭ, представленный на рис. 5 был использован в оптической схеме, показанной на рис. 6 и представляющей собой расширенный трехлинзовый астигматический конвертер.

Для осуществления конверсии мод в системе с цилиндрическими линзами должно соблюдаться определенное соотношение [9] между масштабом формируемых мод и фокусным расстоянием f . Поскольку не всегда такое соотношение выполняется, в схеме рис. 6 предусмотрена телескопическая система, изменяющая масштаб мод в F_1/F_2 раз. Также для осуществления конверсии необходимо ориентировать формируемые моды под углом в 45 градусов к одной из осей цилиндрических линз. В оптической системе, собранной в соответствие с рис. 6, такая возможность была предусмотрена за счет поворота ДОЭ.

В эксперименте были использованы следующие параметры расширителя лазерного пучка в системе: микрообъектив 8х, диафрагма 50 мкм, фокусное расстояние коллимирующего объектива 50 мм., $F_1=300$ мм, $F_2=150$ мм. $f=608$ мм. Результаты одновременной конверсии набора мод ГЭ представлены на рис. 7.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение для формирования мод многоканальных ДОЭ в оптическом конвертере с цилиндрическими линзами позволяет достичь новых результатов, а именно параллельной конверсии нескольких мод ГЭ. Однако высокие несущие частоты, применяемые для разделения мод в многоканальных ДОЭ, не позволяют осуществлять параллельную конверсию большого числа мод из-за ограниченности апертур цилиндрических линз. При этом ограничения наступают при прохождении мод через вторую (C_2) и особенно третью (C_3) линзы. Поэтому в случае, когда необходимо лишь внести вихревую составляющую в пучок, более удобным оказывается применение однолинзового конвертера (рис.8).

Отличие от трехлинзового (рис. 2) здесь состоит и в том, что вместо телескопической системы с фиксированным увеличением применяется также система двух софокусных линз, но позволяющая плавно изменять масштаб за счет перемещения ДОЭ вдоль оптической оси (параметр d). ДОЭ при этом расположен между первой линзой с фокусом F_1 и ее фокальной плоскостью. Если $F_1 > F_2$, то система позволяет как увеличивать масштаб, так и уменьшать его. Такая система более универсальна и позволяет работать не только с каким-либо одним ДОЭ определенного масштаба, но и с другими, что и будет использовано в дальнейшем.

В эксперименте были использованы следующие параметры линз: $F_1=650$ мм, $F_2=150$ мм. Фокусное расстояние коллимирующего объек-

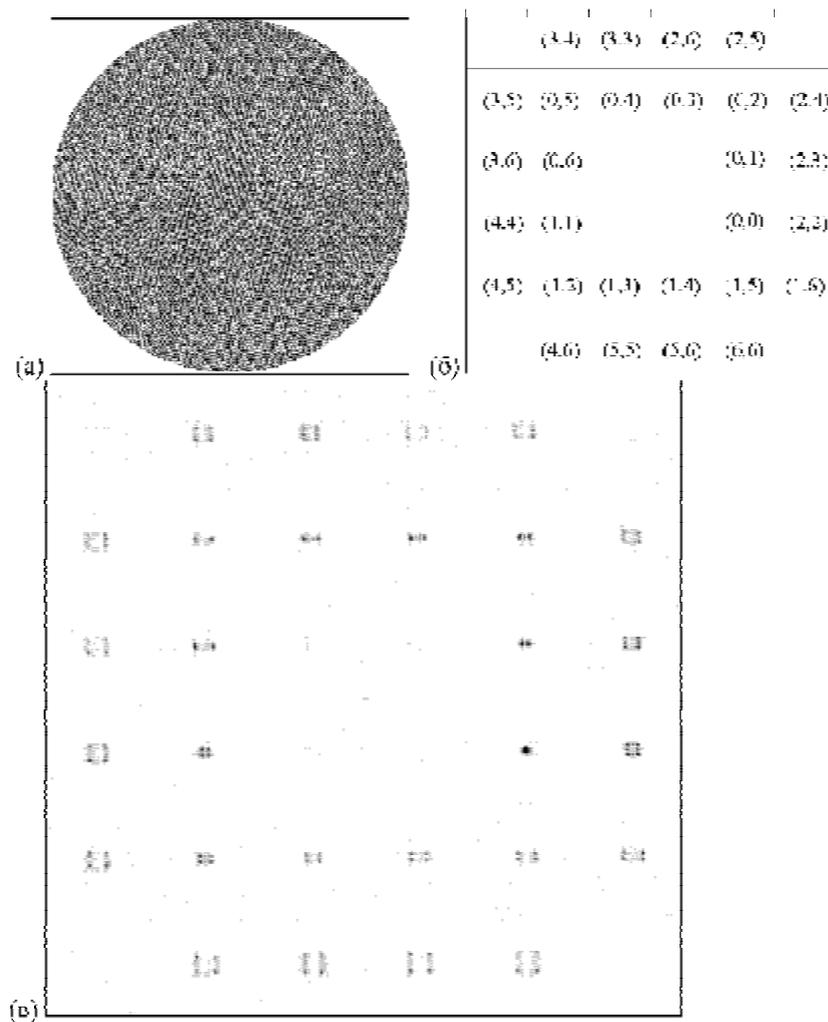


Рис. 5. Одновременное формирование 28 мод ЭГ с помощью фазового многопорядкового ДОЭ: а – 16-уровневая фаза ДОЭ, б – схема соответствия дифракционных порядков номерам мод, в – экспериментально зафиксированное распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы

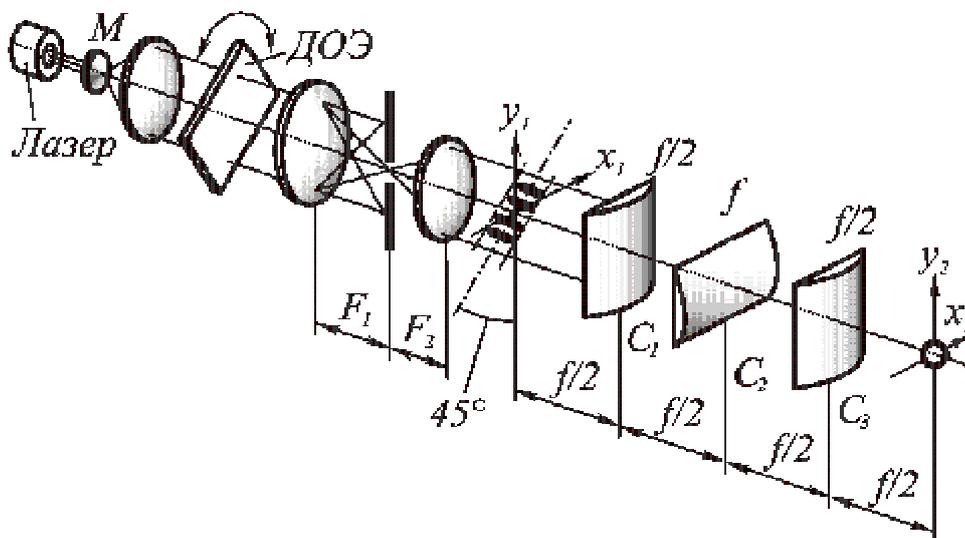


Рис. 6. Оптическая схема трехлинзового астигматического конвертера, расширенного за счет ДОЭ, формирующего на входе произвольно-заданные комплексные распределения

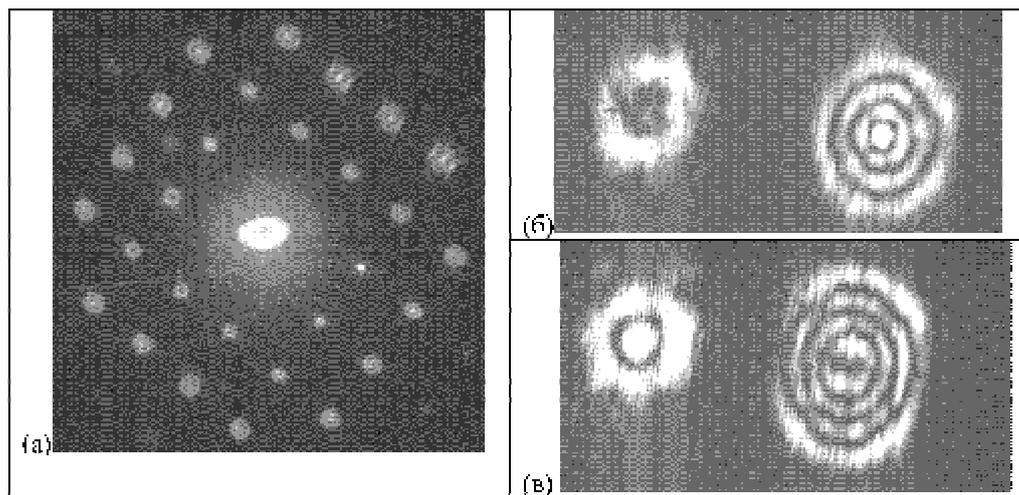


Рис. 7. Экспериментальные результаты одновременной конверсии набора из 28 мод ГЭ трехлинзовым конвертером:

- а – общий вид картины и некоторые из дифракционных порядков крупным планом;
 б – моды ЭГ (n,m) $(0,3)$ и $(3,3)$, преобразованные в моды ЛГ (p,l) $(0,-3)$ и $(3,0)$;
 в – моды ЭГ (n,m) $(1,1)$ и $(3,6)$, преобразованные в моды ЛГ (p,l) $(1,0)$ и $(3,-3)$

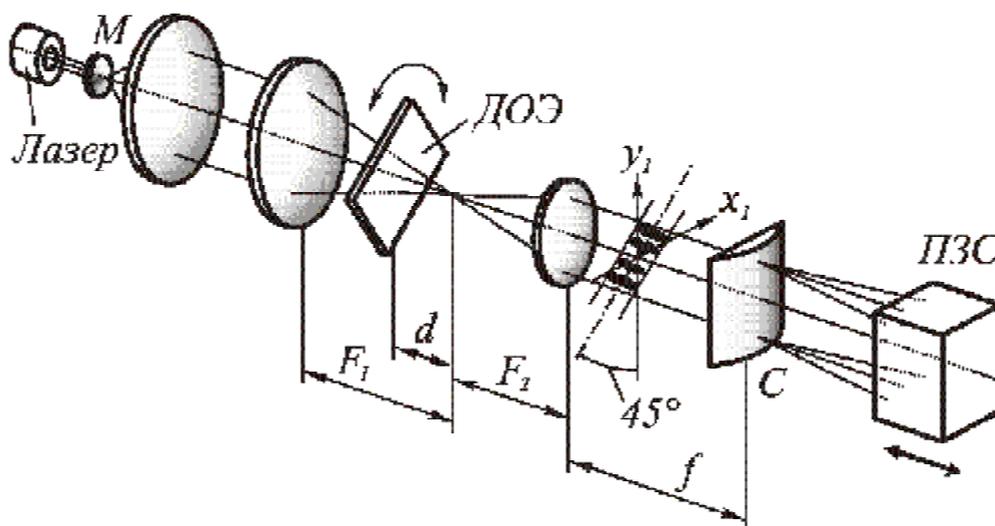


Рис. 8. Оптическая схема однолинзового астигматического преобразователя, расширенного за счет ДОЭ, формирующего на входе

тива 300 мм. Это увеличение фокусного расстояния необходимо для работы системы при изменении масштаба, близком и меньшем 1, когда размер освещающего пучка становится малым. Результаты, полученные в такой системе для мод ГЭ при их двукратном уменьшении, представлены на рис 9.

Видно, что при выборе подходящего расстояния картина полностью совпадает с результатами, полученными в трехлинзовом конвертере. Хотя в этом случае пучки приобретают вихревую составляющую при распространении они будут изменяться аналогично результатам моделирования (см. рис.4). Общий вывод, который можно сделать по этим результатам, что гауссо-

вы моды низших порядков более устойчивы к различного рода отклонениям и погрешностям системы преобразования, чем моды более высоких порядков.

Также с оптической схемой, представленной на рис. 8 был проведен эксперимент по преобразованию оптических чистых вихрей. На рис. 10 показано действие бинарного фазового 4-х порядкового ДОЭ, формирующего оптические чистые вихри $m = \pm 3, \pm 7$ порядков.

На рис. 11 показаны результаты моделирования прохождения поля, сформированного с помощью ДОЭ, представленного на рис. 10 через цилиндрическую линзу. Параметры моделирования: радиус входного поля $R=1$ мм, фокус-

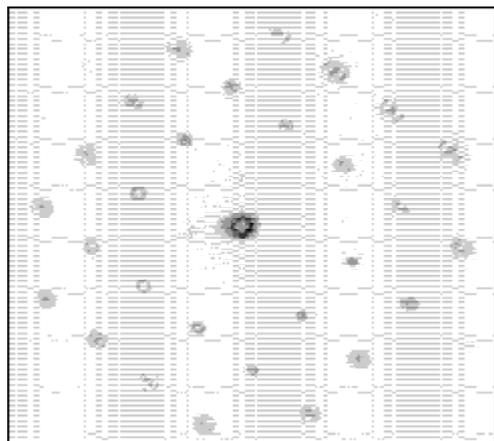


Рис. 9. Экспериментальные результаты одновременной конверсии набора из 28 мод ГЭ с помощью одной цилиндрической линзы: распределение интенсивности на двойном фокусном расстоянии от линзы

ное расстояние линзы $f=300$ мм, длина волны излучения $\lambda=633$ нм, поворот выполнен на 45° , предполагается, что ДОЭ расположен вплотную к линзе, а расстояние после линзы варьировалось от 300 мм до 1200 мм.

Из рис. 11 хорошо видно, что преобразование становится симметричным на двойном фокусном расстоянии. А также видно, что порядок вихря преобразуется в соответствующее число линий ($m+1$), ориентированных в зависимости от знака вертикально или горизонтально. Результаты аналогичного эксперимента показаны на рис. 12. Такой тип преобразований выполнен впервые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализованы численные алгоритмы моделирования прохождения произвольно за-

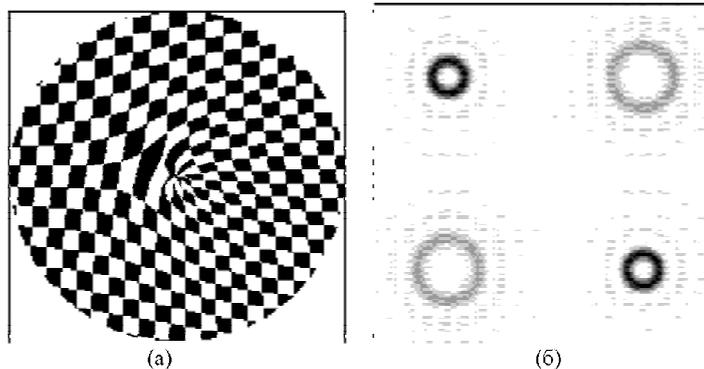


Рис. 10. Одновременное формирование четырех оптических чистых вихрей с помощью фазового многопорядкового ДОЭ: а – бинарная фаза ДОЭ; б – распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы

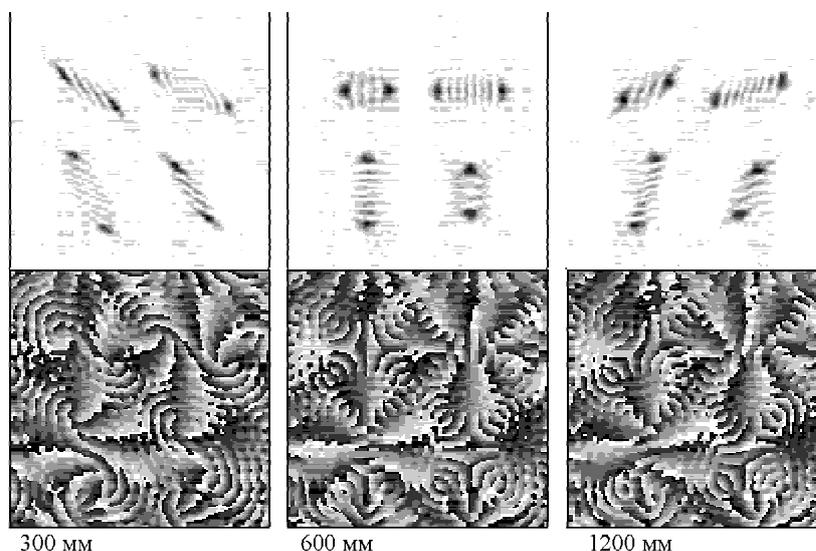


Рис. 11. Комплексное распределение поля (верхняя строка – инертированная интенсивность, нижняя строка – фаза) набора оптических чистых вихрей на различных расстояниях после цилиндрической линзы с фокусным расстоянием $f = 300$ мм.

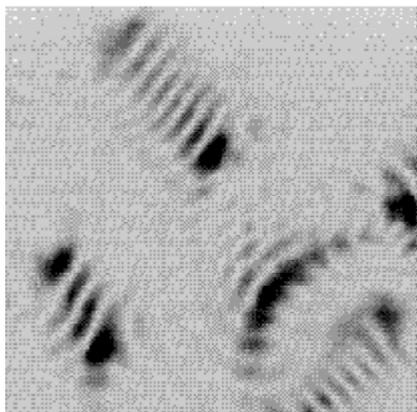


Рис. 12. Экспериментальные результаты одновременной конверсии набора из 4-х оптических чистых вихрей с помощью одной цилиндрической линзы: распределение интенсивности на расстоянии $z=1,25f$ от линзы с фокусом $f=200$ мм

данных комплексных распределений через оптические системы, содержащие набор цилиндрических линз. При помощи данных алгоритмов промоделировано одновременное астигматическое преобразование набора из нескольких мод Эрмита-Гаусса, а также набора оптических чистых вихрей.

Предложены и экспериментально реализованы астигматические модовые конверторы с расширенными функциональными возможностями за счет применения в них ДОЭ, позволяющие эффективно преобразовывать фундаментальную моду лазерного излучения в любое заданное распределение. Синтезировано несколько типов бинарных элементов с высокой эффективностью, рассчитанных на применение в таких конверторах. Проведены эксперименты по одновременной конвертации набора из нескольких мод Эрмита-Гаусса в обычные и эллиптические моды Лагерра-Гаусса, а также преобразованию набора оптических чистых вихрей. Результаты экспериментов согласуются с результатами численного моделирования и получены впервые.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы “Фундаментальные исследования и высшее образование” (грант CRDF PG08-014-1), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9) и гранта РФФИ 08-07-99007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grover A. Swartzlander, Jr., Erin L. Ford, 1 Rukiah S. Abdul-Malik, Laird M. Close, Mary Anne Peters, David M. Palacios, and Daniel W. Wilson, *Astronomical*

- demonstration of an optical vortex coronagraph, *Opt. Express* 16(14) 10200-10207 (2008)
2. Wang W., Ishii N., Hanson S.G., Miyamoto Y. and Takeda M. “Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement,” *Opt. Commun.* 248, 59-68 (2005)
3. Со́йфер В.А., Котля́р В.В., Хони́на С.Н. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2004. №35(6). С. 1368-1432.
4. Levenson M., Tan S.M., Dai G., Morikawa Y., Hayashi N., Ebihara T., The vortex via process: analysis and mask fabrication for contact CDs < 80nm, *SPIE* 5040, pp 344-370, 2003
5. Maria Dienerowitz, Michael Mazilu, Peter J. Reece, Thomas F. Krauss and Kishan Dholakia, Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles, *Opt. Express* 16(7) 4991-4999 (2008)
6. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Shinkaryev M.V., Soifer V.A., Uspleniev G.V., The phase rotor filter, *J. Modern Optics*, 39 (5), 1147-1154 (1992).
7. Kotlyar V.V., Khonina S.N., Soifer V.A., Lautanen J., Honkaken M., Turunen J. Diffractive optical elements for generation of Bessel and Gaussian laser modes, *Optics and Optoelectronics*, ed. O.P.Nijhawan. Narosa Publishing House, 1, 216-227 (1998).
8. Хони́на С.Н. Формирование мод Гаусса-Эрмита с помощью бинарных ДОЭ. II. Оптимизация апертурной функции // *Компьютерная оптика.* 1998. №18. С. 28-36.
9. Abramochkin E., Volostnikov V. Beams transformations and nontransformed beams – *Optics Communications.* – 1991. – № 83. – p. 123-135.
10. Beijersbergen M.W., Allen L., van der Veen H.E.L.O., Woerdman J.P. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum – *Optics Communications.* – 1993. – № 96. – p. 123-132.
11. Хони́на С.Н., Котля́р В.В., Со́йфер В.А. Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита // *Письма в ЖТФ.* 1999. №25 (12) С. 62-69.
12. Алексеев А. Н., Алексеев К. Н., Бородавка О. С., Воля́р О. В., Фри́дман Ю. А., Конверсия пучков ЭГ и ЛГ в астигматичной оптической системе: 1 эксперимент // *Письма в ЖТФ.* 1998. № 17. С. 68-73.
13. Courtial J., Padgett M.J. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes – *Optics Communications.* – 1999. – № 159. – p. 13-18.
14. Gao M., Gao C., Lin Z. Generation and application of the twisted beam with orbital angular momentum – *Chinese Optics Letters.* – 2007. – №2. – p. 89-92.
15. Bendickson J.M., Glytsis E.N., Gaylord T.K. Scalar integral diffraction methods: unification, accuracy, and comparison with a rigorous boundary element method with application to diffractive cylindrical lenses – *JOSA A* – 1998. – № 7. – p. 1822-1837.
16. Glytsis E.N., Harrigan M.E., Hirayama K., Gaylord T.K. Collimating cylindrical diffractive lenses: rigorous electromagnetic analysis and scalar approximation – *Applied Optics.* – 1998. – № 1. – p. 34-43.
17. Малю́тин А.А. Использование дробного Фурье-преобразования в $\pi/2$ -конвертерах лазерных мод // *Квантовая электроника.* 2004. №2. С. 165-171.
18. Малю́тин, А. А., Перестраиваемый астигматический $\pi/2$ -конвертер лазерных мод – *Квантовая электроника.* – 2004. – №2. – С. 172-174.
19. Miguel A. Bandres and Julio C. Gutiérrez-Vega. Ince-

- Gaussian beams, *Opt. Lett.* 29(2) 144-146 (2004).
20. Ohtomo T., Chu S. C., Otsuka K Generation of vortex beams from lasers with controlled Hermite- and Ince-Gaussian modes – *JOSA A* – 2008. – № 7. – p. 5082-5094.
 21. *Котляр В.В., Алмазов А.А., Хонина С.Н.*, Эллиптический световой пучок Гаусса-Лагерра, *Компьютерная оптика*, 27, 56-71 (2005).
 22. *Khonina S.N., Kotlyar V.V., Almazov A.A.*, The influence of phase DOE tilt on feature of formed laser beams matched with angular harmonics basis, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, Allerton Press, 14(4), 191-201 (2005).
 23. *Устинов А.В.* Быстрый способ вычисления интеграла Релея-Зоммерфельда первого типа // *Компьютерная оптика*. 2009. №33(4) (принято к публикации).
 24. *Khonina S.N., Almazov A.A.* Design of multi-channel phase spatial filter for selection of Gauss-Laguerre laser modes, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 4705, 30-39 (2002).
 25. *Kotlyar V.V., Khonina S.N.* Multi-order diffractive optical elements to process data, in Book "Perspectives in Engineering Optics", Ed. by *K. Singh, V.K. Rastogi*, Publ. Anita Publications, Delhi, 47-56 (2003).
 26. *Котляр В.В., Хонина С.Н., Алмазов А.А., Сойфер В.А.* Оптические чистые вихри и гипергеометрические моды // *Компьютерная оптика*. 2005. №27. С. 21-28.

FUNCTIONAL ENHANCEMENT OF MODE ASTIGMATIC CONVERTERS ON THE BASIS OF APPLICATION OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

© 2009 S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.V. Ustinov

Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

Various types of astigmatic mode converters are considered and numerical algorithms of modeling of their action are realized at receipt on an input of arbitrary complex distributions. Functional enhancement of standard astigmatic mode converters is offered on the basis of addition of optical schemes by DOEs, allowing effectively to transform a fundamental mode of laser radiation to arbitrary defined distribution. Combination DOEs with astigmatic converters is most justified for easily made types of binary elements. Expanded three-lens and one-lens astigmatic converters are experimentally realized. Experimental results of simultaneous converting of a set of Hermite-Gaussian modes into usual and elliptic Laguerre-Gaussian modes are presented, and also for the first time transformation of a set of optical pure vortices is executed.

Keywords: astigmatic mode converters, Gouy phase, Hermite-Gaussian modes, Laguerre-Gaussian modes, optical vortices, elliptic modes, multi-order diffractive optical elements.

Svetlana Khonina, Doctor of Physics and Mathematics, Leading Research Fellow. E-mail: khonina@smr.ru.

Sergei Karpeev, Doctor of Physics and Mathematics, Leading Research Fellow. E-mail: karp@smr.ru.

Andrey Ustinov, leading programmer. E-mail: andr@smr.ru.