

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАУССОВЫХ МОД ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ

В.С. Павельев, В.А. Сойфер, М. Дюпарре*, Р. Коваршик*, Б. Людге*, Б. Клей**, С.В. Карнеев***

Институт систем обработки изображений РАН

*Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (г.Йена, Германия)

**Институт прикладной физики Фридрих-Шиллер Университета (г.Йена, Германия)

***Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

В [1] было показано, что использование фундаментальных свойств мод лазерного излучения позволяет увеличить число каналов в оптоволоконных системах связи и системах связи в свободном пространстве, а также создавать высокочувствительные оптические датчики. Таким образом, разработка дифракционных оптических элементов (ДОЭ), позволяющих формировать и селективировать моды лазерного излучения (моданов), является важной задачей совершенствования элементной базы для построения высокоэффективных оптоэлектронных систем. В [2,3] нами были представлены результаты теоретического и натурного исследования модана, преобразующего освещающий Гауссов TEM_{00} пучок в одномодовый пучок Гаусса-Эрмита ($1,0$). В данной работе авторы представляют новые результаты, полученные с использованием различных элементов в единой оптической схеме: целью исследования является преобразование входного TEM_{00} пучка лазера в несколько пучков, описываемых одномодовыми распределениями Гаусса-Эрмита (n,m). После раздельной модуляции полученных одномодовых пучков и объединения их в один пучок обычным оптическим делителем пучка, исследовалось распространение этого объединенного многомодового пучка в пространстве. Далее, полученный многомодовый пучок исследовался с помощью "анализирующего" модана [1]. При проведенных исследованиях элемент, описанный в [2,3], использовался для преобразования освещающего пучка TEM_{00} в моду Гаусса-Эрмита ($1,0$) и Гаусса-Эрмита ($0,1$). Анализирующий модан был рассчитан методом скрещенных решеток с последующим кодированием его функции пропускания в чисто фазовую методом синтетических коэффициентов [1]. Анализирующий модан был изготовлен по той же технологии, что и элемент [2,3]. Теоретические и экспериментальные результаты находятся в хорошем взаимном согласовании.

1. Введение

Повышение пропускной способности современных коммуникационных систем является важнейшей научно-технической задачей, требующей дальнейшего исследования физических эффектов (в том числе оптических) (Рис. 1). В случае, если в качестве носителя информации рассматривается когерентный световой пучок, а в качестве канала передачи данных используется линейная волноводная среда (например, многомодовый оптический световод),

весьма перспективным представляется использование мод лазерного света. Будем разделять понятия *поперечных* и *продольных* мод лазерного излучения.

Поперечные моды лазерного излучения представляют собой пучки света, распределение комплексной амплитуды в сечении которых описывается *собственными функциями* оператора распространения света в соответствующей среде [1]. Фундаментальным свойством мод является сохранение структуры и взаимной ортогональности при распространении в среде [1].

Широко известны телекоммуникационные системы, использующие для передачи различных каналов различные **продольные моды** то есть различные длины волн излучения, распространяющегося в волноводе. В терминологии Рис. 1, оптические фильтры, разделяющие различные длины волн, используются в качестве демультимплекторов (*WDM-уплотнение*). Последние достижения в разработке диэлектрических полосовых фильтров с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda \leq 1$ нм, пригодных к массовому производству, позволили уже сегодня достичь значительного уплотнения каналов связи в таких системах. Однако, авторам представляется весьма привлекательным рассмотреть именно поперечные моды в качестве носителей информационных каналов вместо используемых продольных мод (а может быть - позже - и в дополнение к ним). Это связано, во-первых, с постоянным повышением качества производимых многомодовых волокон, во-вторых, с разработкой методов синтеза дифракционных оптических элементов, названных *моданами* [1-6], способных эффективно формировать и селективировать поперечные моды лазерного излучения. Общая теория построения телекоммуникационных систем с уплотнением каналов, основанном на использовании поперечных мод, подробно изложена в [1]. Результаты, описанные в [2, 3], по расчету, изготовлению и экспериментальному исследованию моданов, обладающих высокой энергетической эффективностью, подтолкнули авторов к построению небольшой действующей модели двухканальной связи, использующей в качестве носителей каналов информации различные моды Гаусса-Эрмита, являющиеся собственными функциями оператора распространения в линзоподобных средах (в частности, в градиентных волокнах с параболическим профилем), а также в свободном пространстве в специально выбранной системе координат [1]. В терминологии Рис. 1 модан, формирующий необходимую моду Гаусса-

Эрмита, является генератором канала, а модан, селектирующий моды, - демультимплексором.

2. Формирование мод Гаусса-Эрмита (1,0) и (0,1)

В данной работе для реализации независимых каналов были использованы моды Гаусса-Эрмита (1,0) и (0,1). Интересно отметить особенность мод Гаусса-Эрмита, заключающуюся в том, что поворот модана на 90° приводит к взаимной смене значений первого и второго номеров формируемой моды. Таким образом, синтезировав два модана Гаусса-Эрмита (1,0) с помощью одного комплекта технологических бинарных масок, можно получить возможность формирования двух мод - Гаусса-Эрмита (1,0) и Гаусса-Эрмита (0,1) с одинаковыми значениями фундаментального модового радиуса. Для расчета этих элементов была использована итерационная процедура [2]. В результате была получена фазовая маска 2048×2048 пикселей с размером пиксела $3,0 \text{ мкм} \times 3,0 \text{ мкм}$, которая затем трансформировалась в набор технологических масок для микролитографической реализации микрорельефа [2, 3]. Элемент рассчитывался как добавка к линзе. Оптическая схема экспериментальной установки для исследования способности элемента формировать модовое распределение интенсивности представлена на Рис. 10 работы [3]. Однако, для того, чтобы убедиться в том, что полученный пучок обладает свойствами моды, недостаточно исследовать распределение интенсивности в сечении, необходимо также убедиться в сохранении пучком модовой структуры при распространении в линзовой среде или свободном пространстве или исследовать поперечное амплитудно-

фазовое распределение. Экспериментальная установка, предназначенная для измерения распределения интенсивности после прохождения пучка через Фурье-каскад, и соответствующие экспериментальные результаты представлены на Рис. 12 и Рис. 13, соответственно, работы [3]. Оптическая схема установки для интерферометрического исследования фазы пучка в фокальной плоскости первой Фурье-линзы представлена на Рис. 14 работы [3], соответствующие экспериментальные результаты, представлены Рис. 15 [3]. По сдвигу полос между двумя половинками моды (0,1) была найдена величина фазового сдвига - $0,83 \pi$, что согласуется с теоретической оценкой - π . В дополнение к результатам исследования фазовой структуры, представленным в [3], в данной работе применялся численный метод восстановления фазы [7] пучка в фокальной плоскости первой Фурье-линзы: распределение фазы восстанавливалось по результатам измерения распределения интенсивности во входной и выходной плоскостях, соответственно, Фурье-линзы в ходе 30 итераций процедуры [7]. Схема экспериментальной установки для получения двух распределений приведена на Рис. 2. После 30 итераций, среднеквадратичное отклонение экспериментально полученного амплитудного распределения от его оценки на последней итерации составляло менее 17%. Восстановленное фазовое распределение во входной плоскости Фурье-линзы представлено на Рис. 3. Фазовый сдвиг между половинками моды составляет около $0,85 \pi$, что согласуется с результатами интерферометрии [3] и теоретической оценкой [1].

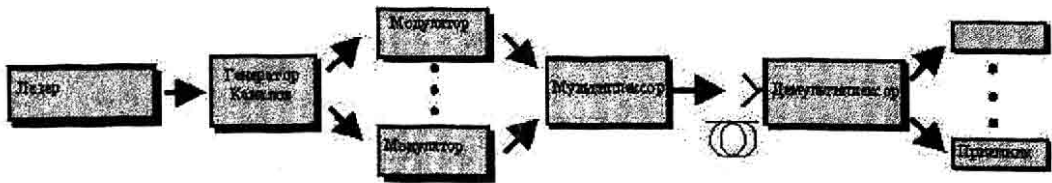


Рис. 1. Принципиальная схема многоканальной оптической связи

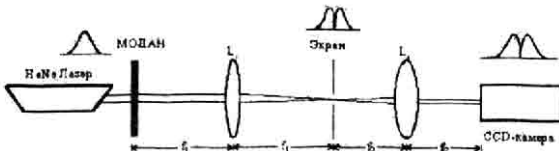


Рис. 2. Схема оптической установки для измерения распределения интенсивности, формируемого моданом во входной и выходной плоскостях Фурье-каскада.

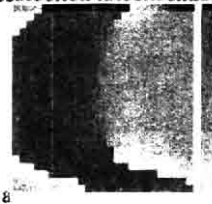


Рис. 3а. Итерационно восстановленное фазовое распределение во входной плоскости Фурье-каскада с линзой L_2 (100% соответствует значению фазовой функции 2π)

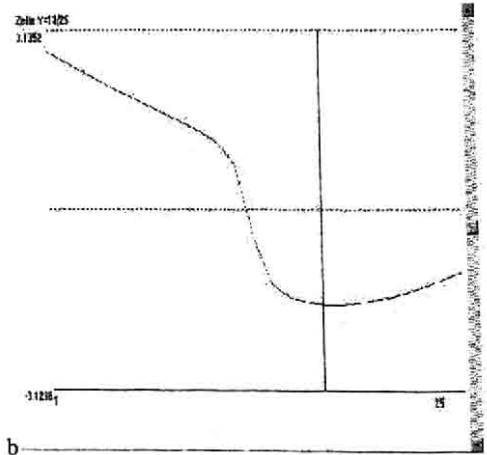


Рис. 3б. Горизонтальное центральное сечение распределения фазы

3. Расчет и изготовление анализирующего модана

В терминах общей схемы оптической телекоммуникационной системы, представленной на Рис. 1, задача создания модана, анализирующего модовый состав излучения на ее выходе, соответствует построению демультимплексора.

Предположим, что $\{\psi_p(\mathbf{x})\}$ - комплексные амплитуды мод в сечении пучка, освещающего анализирующий модан, которые подчиняются условию ортогональности

$$\int_G \psi_p(\mathbf{x})\psi_{p'}^*(\mathbf{x})d^2\mathbf{x} = \delta_{pp'}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = (x, y)$ - двумерные декартовы координаты в сечении пучка, G - световая апертура, * - символ комплексного сопряжения, и

$$\delta_{pp'} = \delta_{pp'} \delta_{ll'} = \begin{cases} 1, p = p' \\ 0, p \neq p' \end{cases} \quad (2)$$

Если мы разложим комплексную амплитуду пучка в ряд по модовым функциям

$$w(\mathbf{x}) = \sum_p w_p \psi_p(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in G \quad (3)$$

наша задача сведется к нахождению коэффициентов w_p . Умножая комплексную амплитуду пучка $w(\mathbf{x})$ на функцию комплексного пропускания элемента $T(\mathbf{x})$, где $T(\mathbf{x}) = \psi_p^*(\mathbf{x})$ - комплексно сопряженная функция к функции $\psi_p(\mathbf{x})$ анализируемой моды, получаем

$$w(\mathbf{x})\psi_p^*(\mathbf{x}) = \sum_{p'} w_{p'} \psi_{p'}(\mathbf{x})\psi_p^*(\mathbf{x}). \quad (4)$$

В результате, двумерное интегрирование по апертуре G дает нам

$$w_p = \int_G w(\mathbf{x})\psi_p^*(\mathbf{x})d^2\mathbf{x}. \quad (5)$$

Оптический эквивалент этих математических операций может быть легко представлен в виде устройства, представленного на Рис. 4 [1]. В рамках этой схемы устройства измерение интенсивности в соответствующей точке в Фурье-плоскости с помощью малоапертурного детектора или пикселей CCD-камеры позволяет измерять требуемые значения $|w_p|^2$. На следующем этапе, апертура G может быть интерпретирована как сумма двух (или более) связанных субапертур, каждая из которых описывается различной функцией комплексного пропускания $T(\mathbf{x}) = \psi_p^*(\mathbf{x})$, согласованной с соответствующей модой $\psi_p(\mathbf{x})$. Пространственное разделение корреляционных пиков для различных мод в Фурье-плоскости (Рис. 4) достигается добавлением индивидуальной наклонной добавки к каждой субапертуре [1]. Для кодирования полученной суммарной функ-

ции комплексного пропускания $T(\mathbf{x})$ в чисто фазовую использовался известный метод синтетических коэффициентов [1]. В данной работе был использован модан, согласованный с модами Гаусса-Эрмита (1,0) и (0,1). Из конкретных условий эксперимента были выбраны следующие физические параметры: модовый радиус в плоскости модана $\sigma_{10} = \sigma_{01} = 0,58$ мм. Элемент был рассчитан на рабочую длину волны $\lambda = 632,8$ нм как добавка к линзе с фокусом $f = 300$ мм. Соответствующие корреляционные пики для мод (1,0) и (0,1) в выходной плоскости линзы разносились на горизонтальное расстояние 30 мм (Рис. 5). Вертикальное расстояние между нулевым порядком и ± 1 паразитными порядками, возникающими вследствие внесения несущих в фазу элемента при использовании метода синтетических коэффициентов, выбиралось как 8 мм. Для кодирования элемента использовалась прямоугольно-импульсная несущая 41,7 линий/мм. Маска имела 2048 x 2048 пикселей, с физическим размером пикселя 2,0 мкм x 2,0 мкм.

Значение фазовой функции в каждом из пикселей выбиралось в промежутке $[-\pi, +\pi]$. Значение фазовой функции впоследствии трансформировалось в соответствующее значение толщины микрорельефа пропускающего элемента с учетом показателя преломления резиста. На следующем этапе по двумерной матрице отсчетов фазовой функции формировался комплект бинарных технологических масок, определяющий процесс литографического травления резиста. Однако, разоргов резиста, возникающий из-за попиксельной процедуры травления, привел к определенным негативным отклонениям от заданного рельефа.

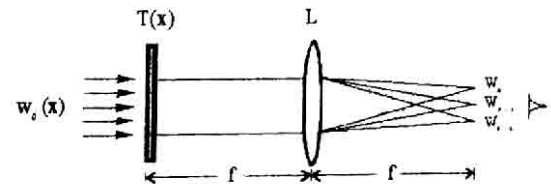


Рис. 4. Схема работы анализирующего модана с функцией комплексного пропускания $T(\mathbf{x})$. Корреляционные пики в выходной плоскости соответствуют различным номерам мод p .

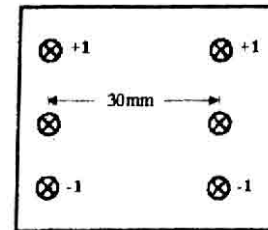


Рис. 5. Схема распределения интенсивности в выходной плоскости линзы L_3 , содержащая точки появления в нулевом порядке корреляционных пиков, соответствующих наличию в освещающем пучке мод Гаусса-Эрмита (1,0) и (0,1). Помимо этого отмечены паразитные ± 1 первые порядки

Для осуществления равномерного травления резиста по рассчитанной полутоновой фазовой маске элемента был рассчитан комплект 15 технологических бинарных файлов. Преобразование файла, содержащего отсчеты фазовой функции модана, в комплект бинарных файлов произошло с помощью утилиты MONOTON, входящей в состав ПО "DOEtools" [8]. Схематичное изображение процесса изготовления модана представлено на Рис. 6. В качестве исходной заготовки использовалась пластина кварцевого стекла, покрытая тонким слоем полиметилметакрилата (толщина около 2,5 мкм). 16-уровневый микрорельеф ДОЭ формировался с помощью 15-кратного электронного травления, на электронном микролитографе ZBA 23H производства фирмы Jenoptik GmbH (Германия). После завершения процесса травления резиста расчетная глубина профиля должна была составлять около 1200 нм. Описанная технология электронного микролитографического травления является сложным процессом. Для того, чтобы достичь реализации расчетного профиля рекомендуется сначала осуществлять травление лишь до 80 % расчетной глубины, измерить реально полученную максимальную глубину травления оптическим микропрофилометром и завершить процедуру травления одним или более дополнительными циклами "травление-<-->профилометрия". Для увеличения эффективности этой процедуры, для замера глубины протравы полезно использовать регулярную ступенчатую тестовую структуру вместо нерегулярного сложного дифракционного профиля, рассчитанного, например, итерационной процедурой. Обычно, такая тестовая структура размещается на подложке вне апертуры ДОЭ для того, чтобы не нарушать функцию комплексного пропускания ДОЭ.

Используя такую внешнюю тестовую структуру, мы обнаружили значительное отклонение значения глубины рельефа на тестовой структуре от такого же значения на дифракционном рельефе (130%) [2], что может быть объяснено наличием эффектом, известном в электронной микролитографии как „proximity effect“ [9], что означает зависимость величины необходимой дозы мощности электронного пучка от доз в соседних пикселах. Эти результаты были получены с помощью оптического профилометра MICROMAP-512. Как следствие, в [3] мы предложили включать в набор изготавливаемых элементов один дополнительный тестовый элемент с включенной тестовой структурой на апертуре. Такой подход дал удовлетворительный результат, как минимум, для изготовления моданов, формирующих моду Гаусса-Эрмита (1,0) [2], [3]. Однако такой подход оказался неработоспособным в случае изготовления модана, анализирующего выходное модовое распределение, рассчитанного методом скрещенных дифракционных решеток [1], что привело к тому, что глубина готового рельефа составила лишь 70% от расчетной глубины 1200 нм. Более того, отклонение изготовленного рельефа сказалось на картине

дифракции света на элементе. В качестве попытки понять этот феномен, было предположено, что proximity effect оказывает различное влияние на различных типах дифракционных структур. Авторы продолжают исследования в этом направлении.

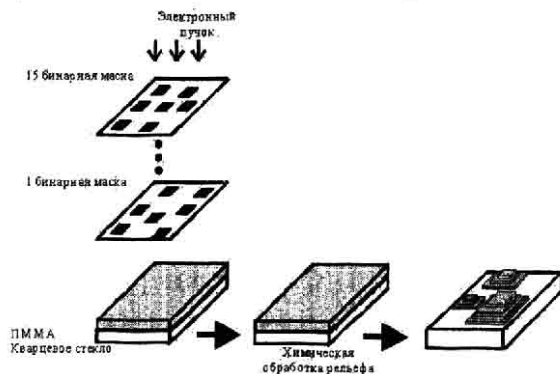


Рис. 6. Схема формирования микрорельефа ДОЭ

4. Оптическая схема натурального эксперимента

Изготовленный анализирующий модан был исследован в ходе серии натуральных экспериментов. Для этого была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на Рис. 7. На первом этапе натуральных экспериментов эта установка была использована для исследования взаимодействия анализирующего модана с освещающим одномодовым пучком Гаусса-Эрмита (1,0) или (0,1), соответственно. Каждый из этих двух освещающих пучков был сформирован путем преобразования освещающего пучка моданом [2] в комбинации с линзой и непрозрачным экраном с отверстием. Впоследствии эта установка была дополнена до простейшей модели многоканальной телекоммуникационной системы, построенной на основе использования поперечных мод, представленной на Рис. 1. Это позволило экспериментально исследовать взаимодействие анализирующего модана с пучком, содержащим обе (1,0) и (0,1) модовые компоненты, в зависимости от различных параметров эксперимента.

Оптическая система, схема которой представлена на Рис. 7, имела следующие физические параметры: $f_1 = 452 \text{ мм}$, $f_2 = 840 \text{ мм}$, $f_3 = 300 \text{ мм}$, диаметр отверстия в непрозрачных экранах составлял 2,7 мм, модовый параметр пучка $\sigma_{10} = \sigma_{01} = 0,58 \text{ мм}$ в плоскости анализирующего модана, выбранный в соответствии с размером эффективной области дифракции 4,096 мм x 4,096 мм, размер пиксела использованной CCD камеры составлял 13 мкм. Интересно отметить, что линза L_2 в данной схеме выполняет роль модели линзоподобной среды, в которой распространяются сгенерированные моды, с другой стороны поведение модового пучка в ее выходной плоскости соответствует картине дифракции в дальней зоне, например при организации оптической связи в свободном пространстве.

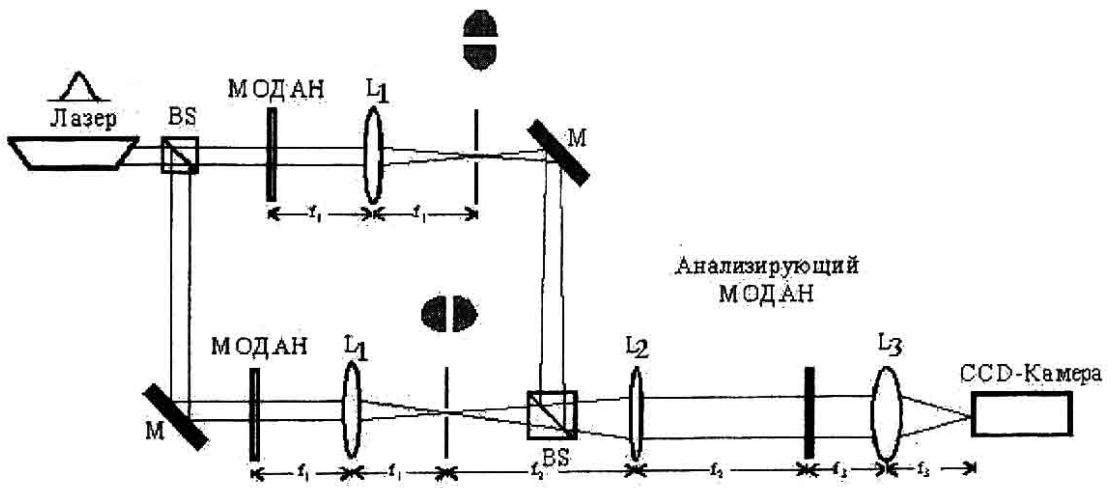


Рис. 7. Схема оптической установки для экспериментального исследования селекции мод с помощью ДОЭ: BS – делитель пучка, M – зеркало.

5. Сравнение результатов физического эксперимента с результатами компьютерного моделирования

На первом этапе с помощью вычислительного эксперимента была исследована работа анализирующего модана, освещенного одномодовым пучком Гаусса-Эрмита (1,0) с Гауссовым радиусом $\sigma_{10} = 0,58$ мм без учета квантованного характера его фазы. После применения быстрого преобразования Фурье было получено расчетное амплитудно-фазовое распределение в фокальной плоскости Фурье-линзы L_3 . Рассчитанные распределения амплитуды, фазы и интенсивности в фокальной плоскости Фурье-линзы L_3 представлены на Рис. 8. Отметим наличие корреляционного пика, соответствующего наличию освещающей моды (1,0), и его отсутствие в части рисунка, соответствующей моде (0,1). На рисунке 8а можно наблюдать лишь четыре паразитных пятна вокруг точки, соответствующей положению корреляционного пика. Расстояние между точкой, соответствующей положению корреляционного пика, и центрами паразитных пятен составляло 150

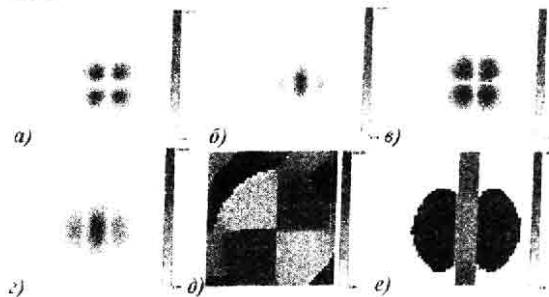


Рис. 8 а-е: Результаты вычислительного эксперимента по анализу входного пучка с помощью рассчитанного ДОЭ (без учета квантования): расчетные распределения интенсивности (Рис. а, б), амплитуды (Рис. в, г) и фазы (Рис. д, е) в окрестности точек формирования корреляционных пиков, соответствующих модам Гаусса-Эрмита (1,0) и (0,1)

Моделируя освещение этого же „идеального“ модана одномодовым пучком (0,1), мы получили аналогичные результаты (не представленные в данной работе), с единственным отличием, что выходное распределение было повернуто на 90 градусов по сравнению с представленным на Рис. 8.

Соотношение максимумов интенсивности корреляционных пиков, наблюдаемых в случае наличия детектируемой моды, и максимумов интенсивности паразитных пятен в случае отсутствия детектируемой моды составляло примерно 3:1. В силу специфики микрофотографической технологии, изготовленный элемент имел 16 уровней квантования фазы, теоретически соответствующих $15/16 \times 2\pi = 1200$ нм. Однако, из-за трудностей контроля глубины травления максимальная глубина травления рельефа составляла лишь 70% от рассчитанного значения 1200 нм. Исходя из этого, мы провели моделирование работы элемента с максимальной глубиной травления 70% от требуемого для случая, когда элемент освещен одномодовым пучком (1,0), (0,1) и пучком, содержащим обе моды с равными мощностями. Результаты этого вычислительного эксперимента представлены на Рис.9 (только распределения интенсивности). На рис а, в, д представлено распределение интенсивности в окрестности левого корреляционного пика, соответствующего моде Гаусса-Эрмита (0,1), на рис. б, г, е - распределение интенсивности в окрестности правого корреляционного пика, соответствующего моде Гаусса-Эрмита (1,0). В заключение, на Рис. 10 представлены результаты экспериментального исследования, выполненного с использованием экспериментальной установки, представленной на Рис. 7, при том же наборе физических параметров, что были использованы в компьютерном моделировании, результаты которого представлены на Рис. 9. Отметим хорошее соответствие результатов физического эксперимента результатам компьютерного моделирования, полученных для случая 70% реализации расчетной глубины профилирования. Учитывая физический размер чувствительного

элемента CCD-камеры и результаты моделирования, можно сделать вывод о качественном соответствии экспериментально полученных распределений в фокальной плоскости линзы L_3 , расчетным результатам, даже несмотря на небольшие различия в форме корреляционных пиков.

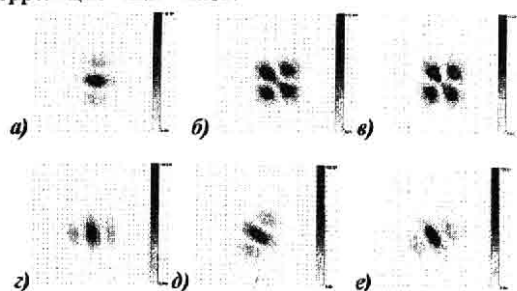


Рис. 9 а-е: Результаты вычислительного эксперимента по анализу входного пучка с помощью рассчитанного ДОО: расчетные распределения интенсивности в окрестности точек формирования корреляционных пиков, соответствующих модам Гаусса-Эрмита $(1,0)$ и $(0,1)$ при освещении модана модовым пучком Гаусса-Эрмита $(0,1)$ (Рис. а,б), Гаусса-Эрмита $(1,0)$ (Рис. в,г) и пучком, содержащим обе моды (Рис. д,е). В данном вычислительном эксперименте учитывалось квантование фазы элемента по 16 уровням, а также то, что глубина реализованного профиля составила лишь 70% от расчетного значения 1200nm

6. Заключение

В данной работе на основе результатов поставленных вычислительных и натуральных экспериментов была продемонстрирована принципиальная осуществимость концепции применения поперечных мод лазерного излучения в качестве носителей независимых каналов телекоммуникационной системы, предложенной в [1]. Показана целесообразность применения моданов, рассчитанных с помощью итерационной процедуры [2] и метода синтетических коэффициентов [1], и изготовленных с помощью электронной микролитографии, для построения такой системы.

Приложение

В данной работе проводилось также исследование амплитудно-фазового распределения, формируемого моданом, согласованным с модой Гаусса-Лагерра $(2,0)$, процесс расчета и изготовления которого описан в [10]. Модан был изготовлен в Институте систем обработки изображений РАН. Для замера распределений интенсивности во входной и выходной плоскостях линзы были использованы оптические схемы, аналогичные схемам, представленным на Рис. 10 и Рис. 12 работы [3]. Измерения проводились в Институте прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (г. Йена, Германия). На Рис. 11 и Рис. 12 приведены амплитудные распределения формируемой моды во входной и выходной плоскости Фурье-каскада соответственно, полученные по результатам измерений интенсивности. На Рис. 13 приведен результат интерферометрического исследования

следования фазового распределения сформированной моды. На Рис. 14 приведена оценка фазы сформированного модового пучка во входной плоскости, полученная в ходе 120 итераций процедуры [7] по амплитудным распределениям Рис. 11, Рис. 12.

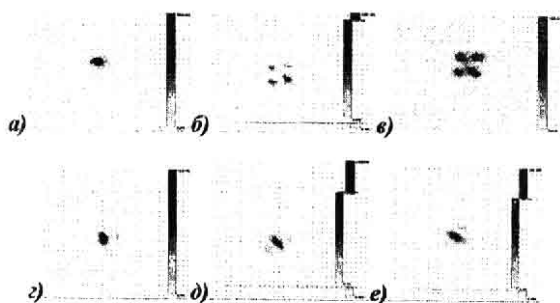


Рис. 10 а-е: Результаты измерений сформированной интенсивности в окрестности центров корреляционных пиков, соответствующих модам Гаусса-Эрмита $(1,0)$ и $(0,1)$ при освещении модана модовым пучком Гаусса-Эрмита $(0,1)$ (Рис. а,б), Гаусса-Эрмита $(1,0)$ (Рис. в,г) и пучком, содержащим обе моды (Рис. д,е)



Рис. 11. Распределение амплитуды моды Гаусса-Лагерра $(0,2)$

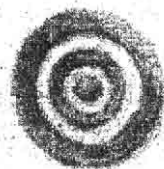


Рис. 12. Распределение амплитуды моды Гаусса-Лагерра $(0,2)$ после прохождения Фурье-каскада.



Рис. 13 Результат интерферометрического исследования сформированного модового пучка Гаусса-Лагерра $(2,0)$



Рис. 14 Итерационно восстановленное фазовое распределение модового пучка Гаусса-Лагерра (2,0) во входной плоскости Фурье-каскада с линзой L_2

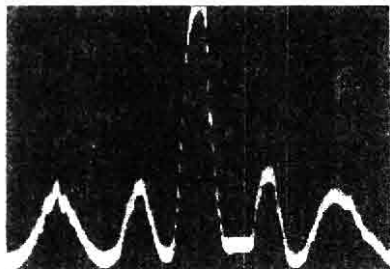


Рис. 15. Осциллограмма сигнала с ПЗС-линейки при натурном исследовании сформированной моды Гаусса-Лагерра

Благодарность

Авторы благодарят Уве Цайтнера из Института прикладной физики Фридрих-Шиллер Университета а также Г.В. Успеньева (Институт систем обработки изображений РАН) за помощь в литографическом формировании трехмерного микрорельефа дифракционных оптических элементов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-15-96026)

Литература

1. Soifer V. A., Golub M. A., Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms, CRC Press, 1994.
2. Duparre M., Pavelyev V. S., Luedge B., Kley E.-B.; Kowarschik R., Soifer V. A., Iterative calculation,

manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distributions. Proceedings SPIE 3110 (1997).

3. Duparre M., Pavelyev V. S., Luedge B., Kley E.-B.; Kowarschik R., Soifer V. A., Forming of selected unimodal complex amplitude distributions by means of novel DOEs of MODAN-type. In Optical Manufacturing and Testing II, H. Philip Stahl, ed., Proceedings SPIE 3134, 357 - 368 (1997).
4. V.V. Kotlyar, I.V. Nikolsky, V.A. Soifer An algorithm for calculating multichannel formers of Gaussian modes.// *Optik* V. 98, No. 1, (1994) p. 26-30
5. Бахарев М.А., Котляр В.В., Павельев В.С., Сойфер В.А., Хонина С.Н. Эффективное возбуждение пакетов мод идеального градиентного волновода с заданными фазовыми скоростями, *Компьютерная оптика* 17, с. 21-25.
6. В.С. Павельев, С.Н. Хонина, Быстрый расчет фазовых формирователей мод Гаусса-Лагерра, *Компьютерная оптика*, Самара, СГАУ, 1997, вып. 17, с. 15-20.
7. Fienup J. R., Iterative method applied to image reconstruction and to computer generated holograms. In Applications of Digital Image Processing 3, Proceedings SPIE 207, 2 - 13 (1979).
8. Волоотовский С.Г., Казанский Н.Л., Павельев В.С. Программное обеспечение для итерационного расчета и исследования ДОО, *Компьютерная оптика* 17, с. 48-53.
9. D.P. Kern. Proceedings of the 9th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, edited by R.Bakish (The Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1980), PV 80-6 491
10. Berezny A.E., Karpeev S.V., Uspleniev G.V. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography// *Optics and Lasers in Engineering*. - 1991.-Vol. 15.- P. 331-340.
11. Chu D. C., Fienup J. R., Recent approaches to computer-generated holograms. *Optical Engineering*, 13, 189 (1974.)
12. Старк Г., ред. Реконструкция изображений. - М.: Мир, 1992. - 636 с.