

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНО-МОДОВОГО СОСТАВА БЕЗДИСПЕРСИОННЫХ МНОГОМОДОВЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

В.С. Павельев, С.В. Карпеев, М. Дюпарре¹, Б. Людге¹, К. Рокитул¹, З. Шротер²

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

¹Институт прикладной оптики Фридрих-Шиллер Университета (Йена, Германия)

²Институт физических высоких технологий (Йена, Германия)

Аннотация

Моды лазерного излучения – пучки, амплитудно-фазовые распределения, в поперечном сечении которых описываются собственными функциями оператора распространения света в волноводной среде. Двумерный характер сечения реальных волноводов допускает существование пучков, амплитудно-фазовое распределение в поперечном сечении которых описывается суперпозицией нескольких мод, обладающих одинаковым значением постоянной распространения. Такие пучки ранее были названы «бездисперсионными» [1] из-за их способности распространяться с нулевой межмодовой дисперсией, подобно отдельным модам. Распространение такого пучка в волноводе происходит без возникновения уширения импульса, вызываемого межмодовой дисперсией. Такие пучки могут найти интересные практические применения, например, для построения высокоэффективных линий оптической связи. Отметим, что пучки такого вида сохраняют амплитудно-фазовую структуру при распространении в среде, подобно отдельным модам. Произвол выбора коэффициентов при разных модах в пучке дает дополнительную степень свободы при построении итерационной процедуры расчета дифракционных оптических элементов – формирователей таких пучков. Данная статья содержит результаты натурального исследования бездисперсионных пучков, формируемых дифракционно-оптическими элементами, в частности, результаты измерения поперечно-модового состава бездисперсионных пучков с помощью специальных модовых корреляционных фильтров, реализованных как амплитудные голограммы.

Введение

Фундаментальными свойствами мод являются свойства сохранения поперечной амплитудно-фазовой структуры отдельных мод и взаимной ортогональности при распространении в соответствующих волноводных средах (например, в свободном пространстве или волноводе) [1-3]. В работах [3, 4] рассмотрены МОДАНЫ – дифракционные оптические элементы, позволяющие формировать и селективировать моды лазерного излучения. Как будет показано ниже, двумерный характер сечения реальных волноводов допускает существование пучков, амплитудно-фазовое распределение в поперечном сечении которых описывается суперпозицией нескольких мод, обладающих одинаковым значением постоянной распространения. Такие пучки ранее были названы «бездисперсионными» [1] из-за их способности распространяться с нулевой межмодовой дисперсией. В данной статье ограничимся рассмотрением Гауссовых мод, характерных для градиентных волокон с параболическим профилем.

Основной формализм

Для градиентного волоконного световода с поперечно-неоднородным показателем преломления $n(x)$ волновые фронты направляемых мод являются плоскими [2]. В этом случае оператор распространения \bar{P} связывает решение $F(x, z)$ уравнения Гельмгольца

$$\nabla_{\perp}^2 F(x, z) + \frac{\partial^2 F(x, z)}{\partial z^2} + n^2(x) k^2 F(x, z) = 0 \quad (1)$$

с граничным значением комплексной амплитуды $F|_{z=0} = F(x, 0)$, где $\nabla_{\perp} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ – поперечный дифференциальный оператор Гамильтона (рис. 1).

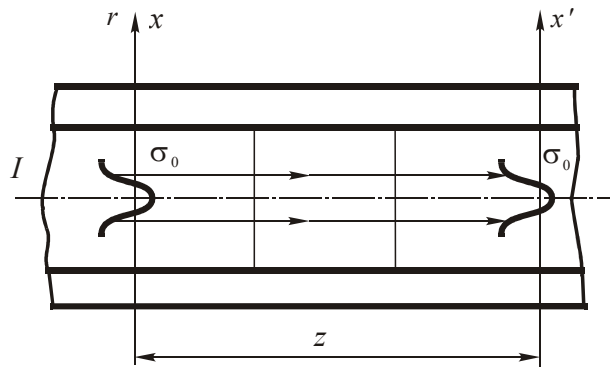


Рис. 1. Распространение мод в градиентном волокне

При учете конечного диаметра волновода появляются дополнительные граничные условия на границе сердечника. Моды градиентного волокна имеют плоский волновой фронт и удовлетворяют уравнению [3]

$$\nabla_{\perp}^2 \psi_p(x) + [k^2 n^2(x) - \beta_p^2] \psi_p(x) = 0. \quad (2)$$

Для произвольного значения z имеем

$$F(x, z) = \gamma_p \psi_p(x), \quad (3)$$

$$\gamma_p = \exp(iK_p z), \quad (4)$$

$$K_p = \beta_p + iq_p, \quad (5)$$

где β_p — константа распространения, q_p — коэффициент затухания моды ψ_p , $\mathbf{p} = (p, l)$.

В [3] показано, что в случае параболического профиля

$$n^2(x, y) = n_1^2 \left(1 - 2\Delta \frac{(x^2 + y^2)}{a^2} \right), \quad (6)$$

где a — радиус сердечника волокна,

$$\gamma_p(z) = \exp(i\beta_p z), \quad (7)$$

где

$$\beta_p = \left[k^2 n_1^2 - \frac{4}{\sigma^2} (r_p + 1) \right]^{1/2}, \quad (8)$$

k — волновое число, σ — радиус основной моды, $r_p = r_p(p, l)$.

Решения уравнения (2) в этом случае могут быть записаны через полиномы Эрмита [3]:

$$\psi_p(\mathbf{x}) = E_{pl} H_p \left(\frac{\sqrt{2}x}{\sigma} \right) H_l \left(\frac{\sqrt{2}y}{\sigma} \right) \exp \left(-\frac{\mathbf{x}^2}{\sigma^2} \right),$$

$$E_{pl} = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi 2^{p+l} p! l!}}, \quad (9)$$

где $H_p(\cdot)$ — полином Эрмита p -го порядка.

Причем [3],

$$r_p = p + l. \quad (10)$$

Отметим интересную особенность пучков, состоящих из гауссовых мод с одинаковым значением постоянной распространения β_p . Комплексная амплитуда в сечении таких пучков имеет следующий вид:

$$\chi_p(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{r_p} \tilde{C}_i \psi_{i(r_p-i)}(\mathbf{x}). \quad (11)$$

Распространение пучков вида (11) будет напоминать распространение отдельных мод $\psi_p(\mathbf{x})$. В самом деле, пучок когерентного света с поперечным сечением вида (11) будет обладать свойством самовоспроизведения амплитудно-фазовой структуры в ходе распространения в соответствующей среде. Пучки такого вида называют *инвариантными модовыми пакетами* (точнее, они являются разновидностью инвариантных модовых пакетов, о которых подробнее можно прочитать в [5]) или *многомодовыми бездисперсионными импульсами*.

Подобно отдельным гауссовым модам, пучки вида (11) не изменяют своей амплитудно-фазовой структуры при распространении в линзоподобных средах, свободном пространстве, при прохождении через Фурье-каскад, изменяя лишь фундаментальный модовый радиус.

Исследование поперечной амплитудно-фазовой структуры бездисперсионных пучков

Для исследований фундаментальных свойств бездисперсионных многомодовых пучков был изготовлен МОДАН, предназначенный для преобразования гауссова пучка с поперечным распределением интенсивности в плоскости установки ДОЭ

$$I_0(x, y) = \exp \left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\sigma_{00}^2} \right] \quad (15)$$

и постоянной фазой в сумму мод Гаусса-Эрмита с номерами (4,0) и (2,2) с единичными весами:

$$\chi_4(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^4 \tilde{C}_i \psi_{i(4-i)}(\mathbf{x}), \quad (16)$$

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} 1, & i = 4 \\ 1, & i = 2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Таким образом, функция комплексного пропускания изготовленного ДОЭ может быть записана в виде:

$$T(x, y) = \frac{\chi_4(x, y)}{\sqrt{I_0(x, y)}}. \quad (17)$$

На рис. 2 и 3 представлены, соответственно, рассчитанные амплитудное распределение в сечении пучка $|\chi_4(x, y)|$ и фазовое $\arg(\chi_4(x, y))$.

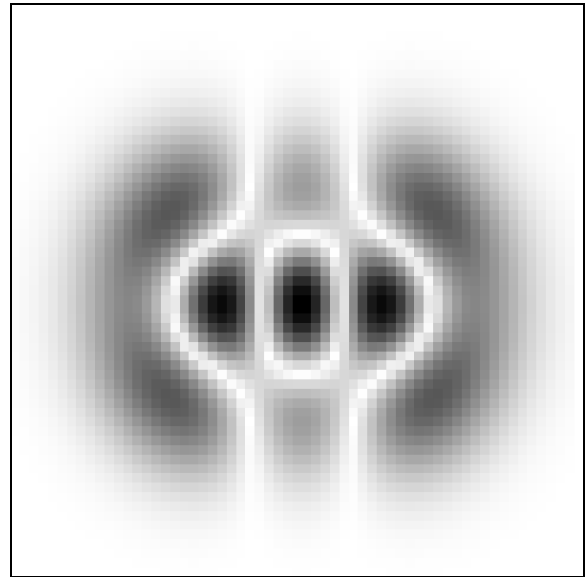


Рис. 2. Теоретическая оценка амплитудного распределения в сечении бездисперсионного пучка

Амплитудно-фазовая функция пропускания элемента кодировалась в чисто фазовую с помощью введения прямоугольно-импульсной несущей 33,3 линий/мм в фазу элемента (обобщенный метод Кирка-Джонса, [3]). Маска элемента имела 1024*1024 пиксела, размер одного пиксела 3 мкм.

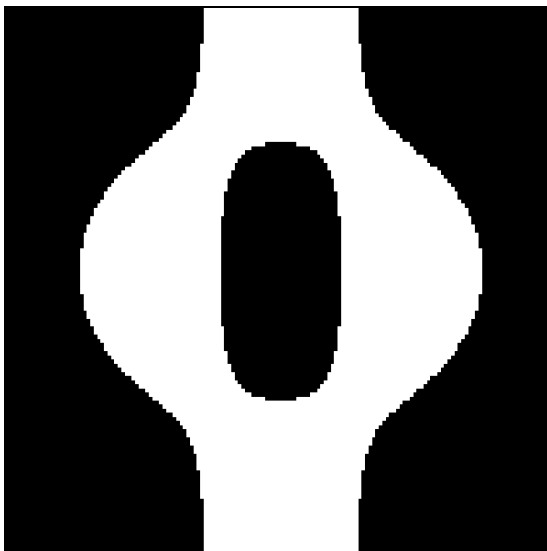


Рис. 3. Теоретическая оценка фазового распределения в сечении бездисперсионного пучка (черный цвет соответствует нулевому значению фазы, белый цвет соответствует значению фазы π)

Элемент рассчитывался как добавка к внешней Фурье-линзе для следующих физических параметров: длина волны освещающего пучка $\lambda = 632,8$ нм, радиус освещающего гауссова пучка $\sigma_{00} = 0,525$ мм, фундаментальный радиус мод в формируемом бездисперсионном пучке $\sigma = 0,5$ мм, фокусное расстояние линзы $f_1 = 452$ мм.

Рассчитанный элемент был изготовлен путем многоуровневой электронно-лучевой прямой записи в резисте ПММА с последующей химической обработкой. Исследование способности изготовленного элемента формировать бездисперсионный пучок проверялось с помощью серии натуральных экспериментов. Экспериментальная установка, представленная на рис. 4, использовалась для измерения интенсивности в фокусе Фурье-линзы. Типичный результат представлен на рис. 5.

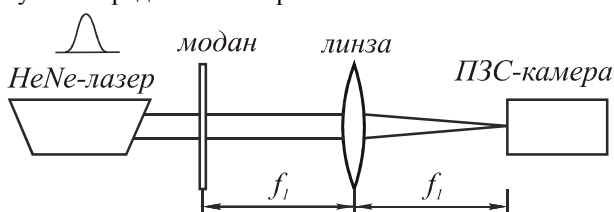


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования МОДАНа

Сравнительный анализ теоретических оценок с экспериментальными результатами (рис. 2 и 5) демонстрирует хорошее взаимное соответствие.

Для экспериментального подтверждения «инвариантного» характера сформированного пучка исследовалась устойчивость амплитудно-фазовой структуры к оптическому аналогу Фурье-преобразования. Комплексная амплитуда в сечении бездисперсионного пучка должна сохранять свою структуру при прохождении через Фурье-каскад.

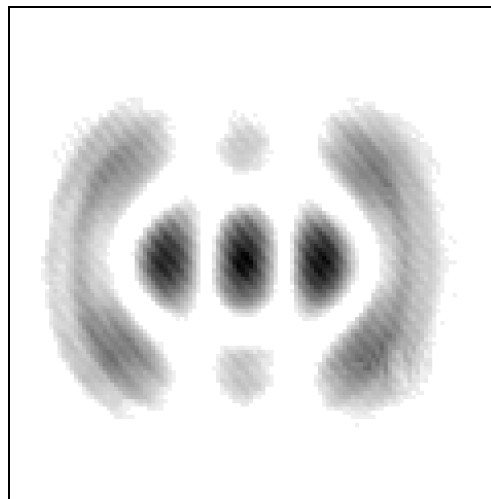


Рис. 5. Амплитуда как результат измерения интенсивности в выходной плоскости МОДАНа

Схема экспериментальной установки, использованной в данном эксперименте, представлена на рис. 6. Типичное распределение, полученное в ходе эксперимента, представлено на рис. 7.

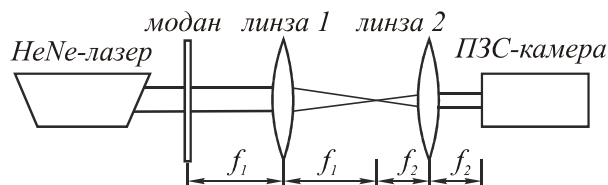


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования прохождения бездисперсионного пучка через Фурье-каскад

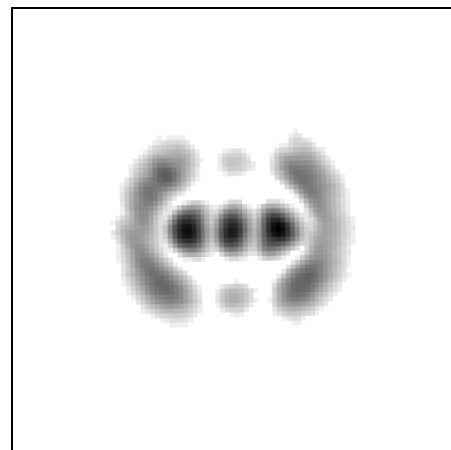


Рис. 7. Амплитудное распределение в сечении бездисперсионного пучка как результат измерения интенсивности в фокальной плоскости линзы 2

По результатам измерений интенсивности в ближней и дальней зонах восстанавливалась фаза пучка. Фаза восстанавливалась в ходе 26 итераций хорошо известного итерационного алгоритма Фьенпа [6].

После завершения 26 итерации, среднеквадратичное отклонение оценки амплитуды от амплитуды, восстановленной по результатам измерения интенсивности, было менее 16%. Восстановленные фа-

зовые распределения во входной и выходной плоскостях Фурье-каскада представлены на рис. 8.

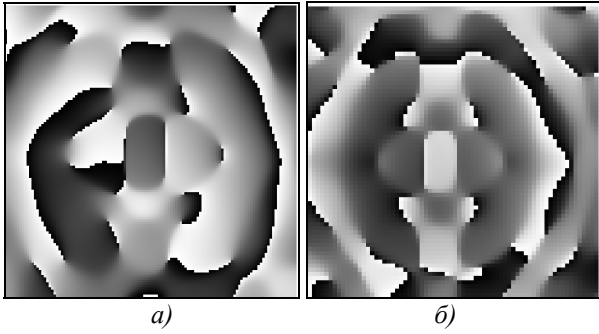


Рис. 8. Результаты восстановления фазы бездисперсионного многомодового пучка по результатам измерения интенсивности
 а) оценка фазы пучка в ближней зоне,
 б) оценка фазы пучка в дальней зоне

Таким образом, устойчивость сформированного двухмодового бездисперсионного пучка к прохождению через Фурье-каскад, была исследована методом оптического эксперимента и результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими результатами.

Исследование поперечной модовой структуры бездисперсионных пучков

В качестве верификации результатов исследования поперечной амплитудно-фазовой структуры в данной работе проводилось исследование поперечно-модового спектра, сформированного бездисперсионного пучка. Измерение поперечно-модовой структуры пучка было решено произвести с помощью МОДАНа – корреляционного фильтра, согласованного с модами лазерного излучения. Удобнее всего реализовать такой МОДАН в виде амплитудной бинарной голограммы, соответствующей комплексной функции

$$T(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{N_{\text{mod}}} \psi_n^*(\mathbf{x}) \exp(i2\pi \mathbf{v}_n \mathbf{x}), \quad (16)$$

где $\mathbf{x} = (x, y)$, $\mathbf{v}_n = (v_{nx}, v_{ny})$ – вектор, определяющий координаты центра дифракционного порядка, соответствующего модовой функции $\psi_n(x)$. В [3] показано, что корреляционные пики, амплитуда которых

пропорциональна содержанию в пучке соответствующей моды будут наблюдаться в выходной плоскости Фурье-каскада в точках с координатами $\mathbf{x}_n = \mathbf{v}_n \lambda f$. Соответствующий МОДАН для мод Гаусса-Эрмита низших порядков был реализован в виде бинарной амплитудной голограммы по методу Ли с числом ячеек 512×512 по технологии электронной микролитографии. В нашем случае выбиралось $N_{\text{mod}}=16$. Измерялось содержание мод Гаусса-Эрмита со следующими порядковыми номерами: (0,0), (0,1), (1,0), (2,0), (0,2), (1,1), (3,0), (0,3), (1,2), (2,1), (4,0), (0,4), (1,3), (3,1), (2,2), (0,5).

Для исследования поперечно-модового состава сформированного бездисперсионного многомодового пучка была собрана схема, представленная на рис. 9.

Модан 1 – фазовый дифракционный элемент, формирующий пучок, состоящий из мод Гаусса-Эрмита с номерами (4,0) и (2,2). Модан 2 – амплитудный оптический элемент с функцией пропускания (16). Линза 1 имела фокусное расстояние $f_1=452$ мм, линза 2 – $f_2=300$ мм. Расстояния z_1, z_2, z_3, z_4 выбирались, исходя из значений f_1, f_2 .

На рис. 10 представлено корреляционное поле модана 2 при освещении модана 1 пучком лазера. На рис. 11 представлено замеренное распределение интенсивности в центрах корреляционных пиков, соответствующих различным модам Гаусса-Эрмита, в выходной плоскости анализирующего элемента.

Измерение интенсивности в центрах корреляционных пиков, соответствующих различным модам лазерного излучения, показало (как видно из таблицы 1), что значение интенсивности в центрах пиков, соответствующих модам (2,2) и (4,0), минимум в 9,5 раз превышает значение интенсивности, замеренное в центрах корреляционных пиков нерасчетных мод.

Именно высокое содержание таким образом заданных мод с одинаковым значением постоянной пространства и определяет «инвариантный» характер исследованного пучка, продемонстрированный в ходе исследования устойчивости амплитудно-фазовой структуры к преобразованию Фурье (рис. 2-рис. 8).

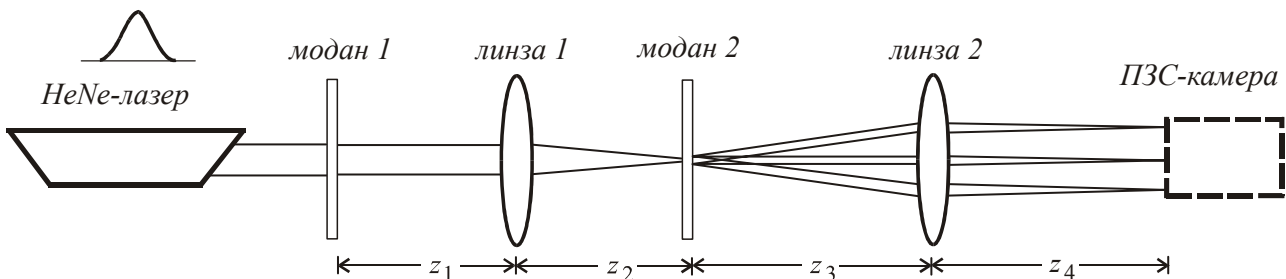


Рис.9. Оптическая схема, использованная для исследования поперечно-модового спектра бездисперсионного пучка



Рис. 10. Распределение интенсивности в корреляционной плоскости анализирующего модана

Таблица 1

(4,0) 74,5%	(2,0) 3,7%	(0,4) 1,6%	(3,1) 2,5%
(1,0) 5,8%	(0,1) 0,4%	(0,0) 3,3%	(1,3) 0%
(0,2) 2,5%	(5,0) 3,3%	(1,1) 1,2%	(2,2) 77,8%
(3,0) 7,8%	(2,1) 0%	(1,2) 7%	(0,3) 0%

Замеренное распределение интенсивности в центрах корреляционных пиков, соответствующих различным модам Гаусса-Эрмита, в выходной плоскости анализирующего элемента (в круглых скобках – порядковые номера мод, рядом, замеренная интенсивность в центре корреляционного пика в процентах от максимального замеренного значения интенсивности в выходной плоскости)

Заключение

Таким образом, результаты измерения амплитудно-фазовой структуры бездисперсионного многомодового пучка, сформированного фазовым дифракционным оптическим элементом, находятся в хорошем соответствии с результатами компьютерного моделирования и результатами измерения поперечно-модовой структуры пучка, что подтверждает перспективность формирования бездисперсионных многомодовых пучков с помощью фазовых дифракционных оптических элементов.

Литература

1. Павельев В.С., Соيفер В.А. Селекция мод лазерного излучения // Методы компьютерной оптики. Под ред. В.А. Соифера, Физматлит, М., 2000. Глава 6.
2. Ярив А. Квантовая электроника // М.: Сов. Радио, 1980.
3. V.A. Soifer, M.A. Golub Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms // CRC Press, 1994.
4. M. Duparré, V. Pavelyev, B. Luedge, B. Kley, V. Soifer, R. Kowarschik Generation, Superposition And Separation Of Gauss-Hermite-Modes By Means Of DOEs // Proceedings SPIE, 1998. V. 3291, P. 104-114,
5. Котляр В.В., Соифер В.А., Хонина С.Н. Световые пучки с периодическими свойствами // Методы компьютерной оптики. Под ред. В.А. Соифера, Физматлит, М., 2000. Глава 7
6. J.R. Fienup *Applied optics* **21** (15), 2758 (1982)