

# ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗДИСПЕРСИОННЫХ МНОГОМОДОВЫХ ПУЧКОВ, ФОРМИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ДООЭ

Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л., Павельев В.С., Карпеев С.В.,  
Палагушкин А.Н.\*, Прокопенко С.А.\* Сергеев А.П.\*, Арламенков А.Н.\*,  
Самарский государственный аэрокосмический университет,  
Институт систем обработки изображений РАН,  
\* Институт оптико-нейронных технологий РАН

## Аннотация

Данная работа посвящена исследованию бездисперсионных многомодовых пучков, формируемых с помощью дифракционных оптических элементов (ДООЭ). Приведены результаты экспериментов по формированию и исследованию бездисперсионных многомодовых пучков. Результаты численных и натуральных экспериментов находятся во взаимном соответствии.

## Введение

В [1, 2] показано, что неединственность собственной функции оператора волноводного распространения света, соответствующей фиксированному собственному значению оператора, позволяет поставить задачу формирования *бездисперсионных многомодовых пучков* - пучков, состоящих из нескольких волноводных мод с одинаковым значением постоянной распространения.

Распространение такого пучка в соответствующей волноводной среде будет подобно распространению волноводной моды – пучок будет обладать свойством *самовоспроизведения* [2].

Распределение комплексной амплитуды в сечении *бездисперсионного многомодового пучка* описывается собственной функцией оператора распространения (и в этом смысле *бездисперсионный многомодовый пучок* также является *модой*, как и каждая из мод, входящих в его состав).

В [2] показано, что замечательные свойства таких пучков могут быть использованы для построения волоконно-оптических линий связи с поперечно-модовым уплотнением. В [3] рассмотрено использование свойств *бездисперсионных многомодовых пучков* для обеспечения безопасности информации в волоконно-оптических линиях связи.

В [1] рассмотрена задача высокоэффективного формирования *бездисперсионного многомодового пучка* в линзоподобных средах с помощью дифракционного оптического элемента (ДООЭ), освещаемого пучком с амплитудой  $A(x, y)$  в сечении (Рис. 1).

В [1] показано, что наличие непростых собственных значений оператора распространения в линзоподобной среде (и соответствующих *собственных подпространств*) позволяет эту задачу переформулировать следующим образом: требуется найти собственную функцию  $\psi_m(x, y)$ , соответствующую определенному собственному числу  $\lambda_m$  оператора распространения света в линзоподобной волноводной среде  $\tilde{P}$ , имеющую амплитудное распределение, максимально близкое к распределению освещающего пучка  $|\psi_m(x, y)| \cong A(x, y)$ ,  $\lambda_m = \exp(i\beta_m z)$ , где  $\beta_m$  - постоянная распространения.

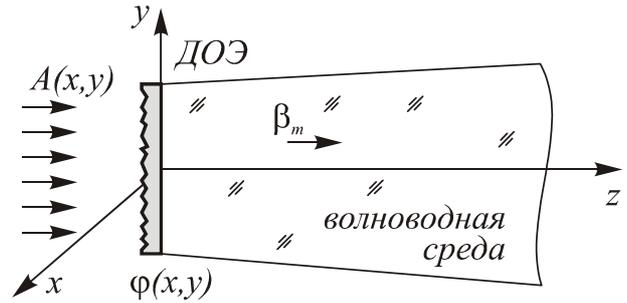


Рис. 1. Постановка задачи формирования пучка, заданного распределением амплитуды в поперечном сечении освещающего пучка  $A(x, y)$  и значением постоянной распространения  $\beta_m$

В этом случае фаза  $\varphi(x, y) = \arg[\psi_m(x, y)]$  может быть выбрана в качестве фазовой функции формирующего оптического элемента.

Для эффективного решения данной задачи в случае градиентного параболического профиля необходимо решить уравнение [1]

$$A(x, y) \exp(i\varphi(x, y)) - \sum_{p=0}^m \tilde{C}_{p(m-p)} \hat{\psi}_{p(m-p)}(x, y) = 0, \quad (1)$$

где  $A(x, y)$  – распределение амплитуды освещающего пучка в плоскости установки ДООЭ,  $\varphi(x, y)$  – фазовая функция ДООЭ, относительно коэффициентов  $\tilde{C}_{p(m-p)}$  при модах Гаусса-Эрмита  $\hat{\psi}_{p(m-p)}(x, y)$ .

Для численного нахождения приближенного решения уравнения (1) можно использовать максимизацию функционала [1]

$$\Phi(\varphi(x, y)) = \sum_{p=0}^m \tilde{C}_{p(m-p)}^2 \rightarrow \max, \quad (2)$$

где

$$\tilde{C}_{p(m-p)}^2 = \left| \iint_D A(x, y) \exp(i\varphi(x, y)) \hat{\psi}_{p(m-p)}(x, y) dx dy \right|^2, \quad (3)$$

где  $D$  – апертура оптического элемента.

## 1. Результаты численного эксперимента

В данной работе проводился расчет ДОО, осуществляющего эффективное формирование бездисперсионного многомодового пучка, сечение которого описывается собственной функцией оператора распространения света в среде с параболическим распределением показателя преломления [2].

Отметим, что моды таких сред обладают свойством самовоспроизведения в свободном пространстве с точностью до масштаба [2].

В качестве освещающего пучка рассматривался Гауссов пучок. Вычислительный эксперимент ставился для следующих параметров: апертура ДОО  $D = 3,2$  мм, индекс  $p+l = m$  выбирался равным 2, 3 и 4, радиус Гауссова освещающего пучка полагался равным  $\sigma_0 = 0,75$  мм, модовый радиус формируемого пучка  $\sigma = 0,44$  мм, число уровней квантования фазовой функции -  $M = 32$ , число отсчетов фазовой функции выбиралось  $N = 128$ . Оптимизация функционала (2) проводилась с помощью стохастической процедуры, использующей методы целочисленного программирования.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1 и на рис.2, 3, 4.

$m$	2	3	4
$\Phi(\varphi(x, y))$	0,87	0,8	0,74

Отметим некоторое снижение значения функционала с увеличением значения индекса  $m$ , что может показаться странным, учитывая возрастание числа членов суммы в (2). Однако увеличение значения индекса  $m$  соответствует также возрастанию пространственной частоты распределения, аппроксимирующего Гауссово распределение. Кроме того, стоит отметить увеличение радиуса сечения бездисперсионного многомодового пучка при увеличении значения индекса  $m$ .

На рис.2 приведены рассчитанные фазовые функции оптических элементов.

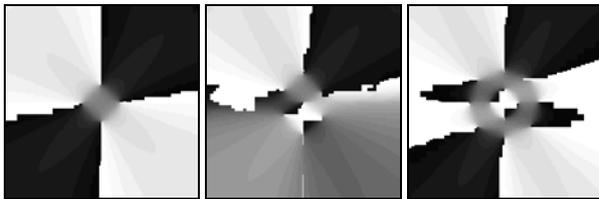


Рис. 2. Рассчитанные фазовые функции ДОО  
(а - для  $m=2$ , б - для  $m=3$ , в- для  $m=4$ )

На рис. 3 представлено распределение амплитуды в сечении освещающего пучка.

На рис. 4 представлены распределения амплитуды в сечении пучков вида  $\sum_{p=0}^m \tilde{C}_{p(m-p)} \hat{\Psi}_{p(m-p)}(x, y)$ , где коэффициенты  $\tilde{C}_{p(m-p)}$  найдены оптимизацией функционала (2) для приведенных выше параметров.

Таким образом, оптимизируя функционал (2), можно подобрать решения для  $m=2$ ,  $m=3$  и  $m=4$ , аппроксимирующие Гауссов пучок.

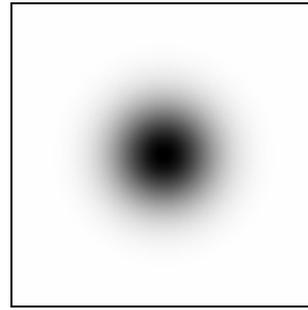


Рис. 3. Распределение амплитуды в сечении Гауссова освещающего пучка

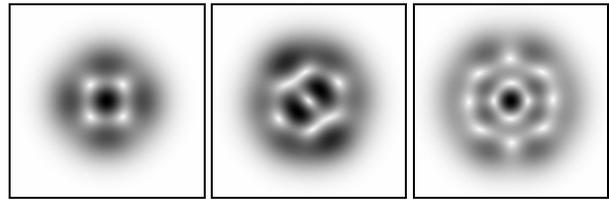


Рис. 4. Распределение амплитуды в сечении пучков  
(а -  $m=2$ , б -  $m=3$ , в -  $m=4$ )

На рис. 5 представлены распределения амплитуды в дальней зоне в сечении пучков, полученных после прохождения освещающего Гауссова пучка через рассчитанные элементы с фазовыми функциями, приведенными на рис. 2а, б.

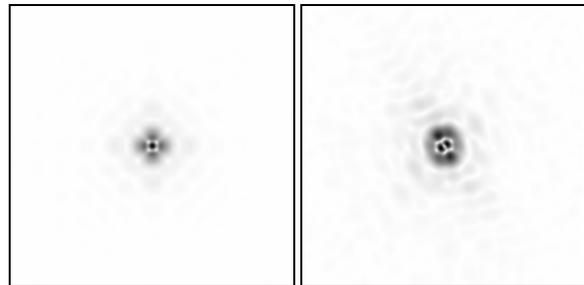


Рис. 5. Распределение амплитуды в дальней зоне  
(а -  $m=2$ , б -  $m=3$ )

Отметим, что структура распределений амплитуды в центре рис. 5а, б близка к структуре соответствующих распределений амплитуды, представленных на рис. 4. Это объясняется тем, что погрешность аппроксимации Гауссова распределения амплитуды распределениями, приведенными на рис. 4, соответствует наличию высших мод в сформированном пучке.

## 2. Результаты оптического эксперимента

Для экспериментального исследования свойств бездисперсионных многомодовых пучков был изготовлен элемент с фазовой функцией, представленной на рис. 2в, с вышеприведенными параметрами для длины волны  $\lambda=0,6328$  мкм. Элемент был изготовлен методом 3D электроннолучевой записи на резисте Nano 950 PMMA (MicroChem Inc) с помощью электроннолучевого литографического комплекса на базе SEM ZRM-20 (Carl

Zeiss), оснащенного дополнительным генератором изображений и программным обеспечением NanoMaker, разработанным фирмой Interface Ltd. и ИПТМ РАН, в Институте оптико-нейронных технологий РАН. Микрорельеф изготовленного элемента исследовался в ОКБ «Микротехнология» ИСОИ РАН с помощью микроинтерферометрического профилометра WLI (Fraunhofer-Institution for Applied Optics and Precision Engineering, г Йена, Германия). Используемая технология формирования микрорельефа позволила с высокой точностью реализовать заданную глубину рельефа (расчетное значение максимальной глубины составляло 1,3 мкм) (рис. 6).

Для исследования распределений интенсивности, создаваемых изготовленным фазовым элементом, была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 7. Изготовленный фазовый элемент (на рисунке МОДАН) освещался пучком He-Ne лазера ЛГН-215 и полученные распределения исследовались при помощи ПЗС-камеры в ближней и дальней зонах дифракции, что соответствует двум положениям ПЗС-камеры, показанным на рисунке.

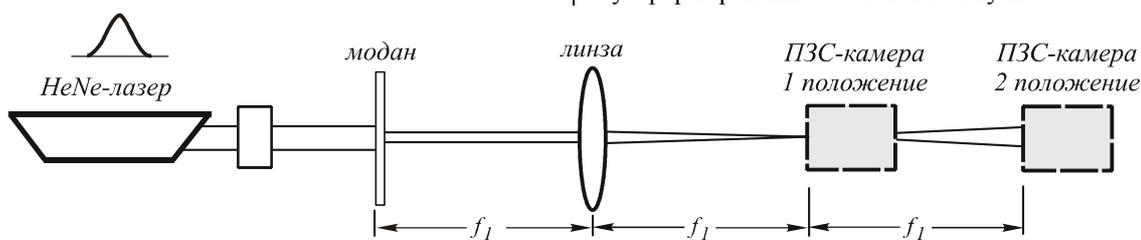


Рис. 7. Оптическая схема экспериментальной установки

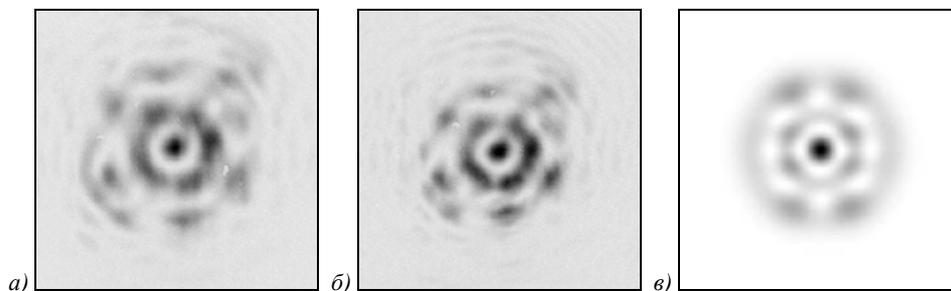


Рис. 8. Распределения интенсивности, сформированные ДОЭ в фокусе (а), на двойном фокусном расстоянии (б) и расчетное распределение интенсивности в сечении бездисперсионного многомодового пучка (в)

Однако замеренная энергетическая эффективность изготовленного оптического элемента составила всего 0,47, что значительно меньше оценки, приведенной в таблице 1. Такое расхождение может быть объяснено высокой шероховатостью поверхности (рис. 9), а также наличием потерь на френелевское отражение (оптические поверхности элемента не просветлялись).

#### Заключение

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования ДОЭ, формирующих бездисперсионные многомодовые пучки.

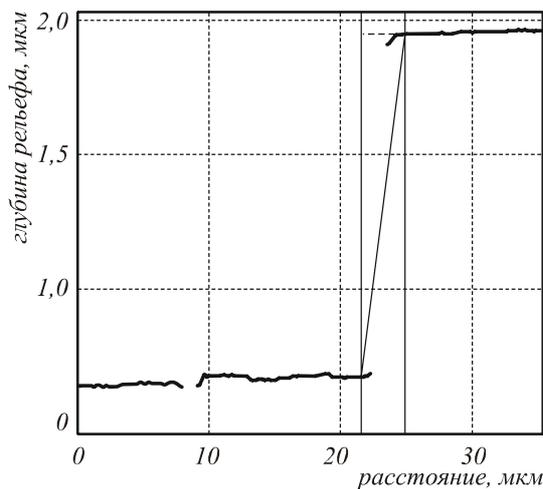


Рис. 6. Результат измерения глубины реализованного микрорельефа

Фокусное расстояние  $f_1=1000$  мм. Сравнивая полученные распределения интенсивности в фокусе и на двойном фокусном расстоянии (рис. 8а, б) с расчетным (рис. 8в) можно убедиться в модовом характере и наличии свойства самовоспроизведения у сформированного элементом пучка.

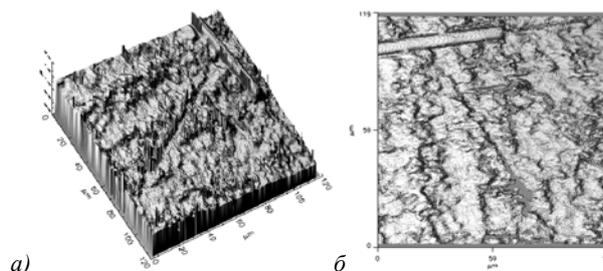


Рис. 9. Результат микроинтерферометрического исследования (а) и микрофотография (б) реализованного микрорельефа

Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласовании с результатами численного эксперимента и подтверждают перспективность подхода, описанного в [1].

Представляется, что подход [1] к формированию мод линзоподобных сред (или других волноводных сред) может быть востребован при решении задач оптических телекоммуникаций, а также при передаче световой энергии с минимальными потерями на дисперсию.

#### *Благодарность*

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ-1007.2003.1, а также российско-американской программы «Фундаментальные ис-

следования и высшее образование» («BRHE») и грантов РФФИ 04-02-08094 и 05-01-96505.

#### *Литература*

1. Павельев В.С. Применение замечательных свойств собственных подпространств оператора распространения света в линзоподобной среде для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2002. Вып. 24. С.58-61.
2. Павельев В.С., Сойфер В.А., Глава 6 Селекция мод лазерного излучения // Методы компьютерной оптики под ред. В.А. Сойфера, М. «Физматлит», 2000, с.395-469
3. Карпеев С. В., Павельев В.С., Казанский Н. Л., Сойфер В.А. Многоканальная система безопасной передачи информации по многомодовому волоконному световоду // Патент РФ на полезную модель № 39242 от 16 марта 2004 года. Дата публикации 20.07.2004, бюлл. № 20

# Numerical and experimental studies of dispersionless multimode beams generated using a DOE

S.A. Borodin<sup>1</sup>, A.V. Volkov<sup>1,2</sup>, N.L. Kazanskiy<sup>1,2</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>,  
A.N. Palagushkin<sup>1</sup>, S.A. Prokopenko<sup>1</sup>, A.P. Sergeev<sup>3</sup>, A.N. Arlamenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University (SSAU)

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS

<sup>3</sup>Institute of Optical Neural Technologies of RAS

## **Abstract:**

This work is devoted to the study of dispersionless multimode beams generated using diffractive optical elements (DOEs). The results of experiments on the generation and study of dispersionless multimode beams are presented. The results of numerical and field experiments are in mutual agreement.

**Keywords:** diffraction optical elements, DOE, dispersionless multimode beam

**Acknowledgments:** This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation NSh-1007.2003.1, as well as the Russian-American program "Basic Research and Higher Education" ("BRHE") and grants from the Russian Foundation for Basic Research 04-02-08094 and 05-01-96505.

**Citation:** Borodin SA, Volkov AV, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Karpeev SV, Palagushkin AN, Prokopenko SA, Sergeev AP, Arlamenko AN. Numerical and experimental studies of dispersionless multimode beams generated using a DOE. *Computer Optics* 2005; 27: 41-44.

## **References:**

- [1] Pavelyev VS. Application of remarkable properties of eigensubspaces of light propagation operator in a lenslike medium for solving the problems of computer optics [In Russian]. *Computer Optics* 2002; 24: 58-61.
- [2] Pavelyev VS, Soifer VA. Selection of laser light modes. In Book: Soifer VA, ed. *Methods of computer optics*. Ch 6. New York: John Wiley and Sons Inc; 2002.
- [3] Karpeev SV, Paveliev VS, Kazanskiy NL, Soifer VA. Multichannel system for the safe transmission of information over a multimode fiber waveguide [In Russian]. Pat RF for Utility Model N 39242 of March 16, 2004. *Russian Bull of Inventions* N20, 2004.