

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО ДОО, ФОКУСИРУЮЩЕГО ГАУССОВ ПУЧОК В КРУГ

В.С. Павельев, В.А. Сойфер, Т. Глазер<sup>1</sup>, З. Шротер<sup>1</sup>, Р. Пульманн<sup>1</sup>, Х. Бартельт<sup>1</sup>

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>1</sup>Институт физических высоких технологий, Йена, Германия

## Аннотация

Рассмотрено изготовление и исследование четырехуровневого дифракционного оптического элемента (ДОО), фокусирующего гауссов пучок в круг. В качестве технологии изготовления использовалась прямая лазерная запись на фоторезисте. Значение замеренной энергетической эффективности элемента находится в хорошем согласовании с теоретической оценкой и составляет около 80 %.

## Введение

Решение значительного количества задач синтеза ДОО приводит к расчету радиально-симметричной фазовой функции [1]. Многие технологии изготовления ДОО связаны с аппроксимацией рассчитанной и, в общем случае, непрерывной функции микрорельефа кусочно-постоянной (квантованной) [2]. Таким образом, разработка высокоэффективных методов расчета и изготовления радиально-симметричных ДОО с квантованной фазой является актуальной. Отметим, что для расчета радиально-симметричных ДОО с малым числом уровней квантования целесообразно применение стохастических методов. Это обусловлено, во-первых, возможностью сведения в радиально-симметричном случае двумерного оператора распространения к одномерному, что существенно экономит время его вычисления, во-вторых, выбор малого числа уровней квантования сужает множество допустимых решений.

В этом случае отметим также отсутствие погрешностей квантования, так как стохастический поиск организуется непосредственно над множеством технологически реализуемых функций.

В [3] рассмотрено построение стохастической генетической процедуры оптимизации радиально-симметричной функции с малым числом уровней квантования. Данная работа посвящена исследованию четырехуровневого ДОО, фокусирующего гауссов пучок в круг. Элемент рассчитывался с помощью процедуры [3].

## Технологическая реализация ДОО

Четырехуровневый рельеф формировался с помощью лазерной микролитографии. Записывающее лазерное устройство DWL66 производства фирмы Heidelberg Instruments с рабочей длиной волны лазера 442 нм использовалось для формирования рассчитанной структуры на позитивном фоторезисте AZ4562 (Hoechst). Для записи применялся объектив с фокусом 4 мм и пространственным разрешением 640 нм. Эти параметры позволяют записывать линии с шириной порядка 1 мкм. Значение показателя преломления фоторезиста составляло  $n = 1,628$ , что для длины волны  $\lambda=543$  нм излучения

лазера, пучок которого фокусировался ДОО, определяет максимальную глубину травления как  $\lambda/(n-1)=865$  нм. Записывающее устройство может работать в бинарном или полутонном режиме. В бинарном режиме переключение состояний ON и OFF определяет формирование бинарной структуры. Полутонный режим позволяет вести непосредственную реализацию многоуровневого (до 32 уровней) профиля с высотой, определяемой условиями экспозиции. В этом случае рассчитанный рельеф должен быть представлен на входе устройства в виде стандартного DXF-файла (стандарт представления данных, разработанный фирмой Autodesk Inc).

## Результаты натурного эксперимента

Элемент, рассчитанный с помощью 1 000 000 итераций процедуры [3] как дополнение к сферической линзе, имеет следующие параметры: фокус внешней линзы  $f=300$  мм, длина волны освещающего пучка  $\lambda = 543$  нм, радиус апертуры  $R=1,75$  мм, радиус фокального круга  $R_f=0,6$  мм, радиус освещающего гауссова пучка  $\sigma=0,525$  мм, число отсчетов фазовой функции вдоль радиуса  $N=50$ .

Элемент имеет радиально-симметричную фазовую структуру с 14 зонами. На рис. 1 представлен расчетный рельеф (радиальное сечение) и результат профилометрии реализованного микрорельефа.

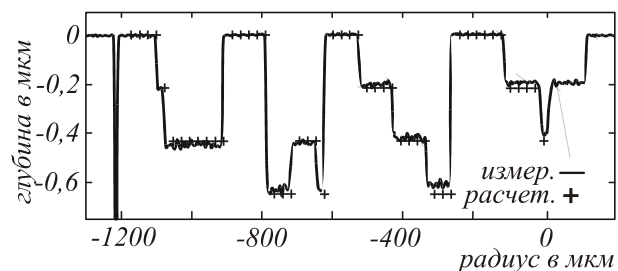


Рис. 1. Сравнение расчетного профиля элемента (крестики) с реализованным (сплошная линия) — по результатам измерений

В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер, работающий на длине волны 543 нм с расходимостью  $M^2 \cong 1,2$ . На рис. 2 представлены сечения сформированного пучка, полученные с помощью CCD-камеры в выходной плоскости линзы и в плоскости, отстоящей на 20 мм за выходной плос-

костью линзы. Для сравнения на рис. 2 приведено сечение расчетного распределения интенсивности в фокусе линзы для дифракционно-ограниченного пучка ( $M^2 = 1$ ). Полученное абсолютное значение интенсивности нормировалась по распределению энергии в фокусе той же оптической системы, но в отсутствие ДОО. Расчетная интенсивность, полученная для Гауссова пучка  $M^2 = 1$ , и результат измерений ( $M^2 \cong 1,2$ ) были откалиброваны, исходя из предположения, что максимальное значение интенсивности гауссова пучка, прошедшего через оптическую систему в отсутствие ДОО, равно единице. Наличие высших мод в освещающем пучке объясняет больший размер сформированного фокального круга по сравнению с расчетным.

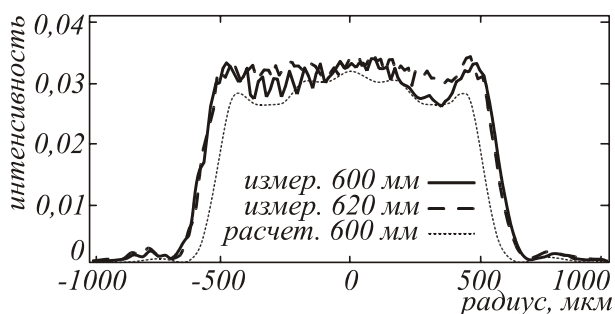


Рис. 2. Сравнение расчетного распределения интенсивности в выходной плоскости линзы (точки), замеренного распределения интенсивности в фокусе линзы (сплошная линия) и замеренного распределения в плоскости, находящейся на 20 мм за выходной плоскостью линзы

На рис. 3 представлены двумерные распределения интенсивности, сформированные ДОО и замеренные в отсутствие оптического элемента. Отметим, что для четырехуровневого элемента, реализованного для данного набора физических параметров, плоскость с меньшей неравномерностью распределения интенсивности находится за выходной плоскостью линзы.

Численное интегрирование по результатам измерений, проведенных с помощью CCD-камеры в выходной плоскости линзы, дало оценки энергетической эффективности 77,6% и 79,6% для значений радиуса фокального круга  $R_f=0,6$  мм и  $R_f=0,66$  мм, соответственно, что хорошо согласуется с оценками, полученными в ходе численного эксперимента (81,3% и 81,6%, соответственно). Под энергетической эффективностью в натурном эксперименте понималось отношение энергии, сфокусированной ДОО в фокальный круг, к полной энергии светового пучка, прошедшего через пластину с нанесенным микрорельефом ДОО.

Таким образом, замеренная эффективность четырехуровневого элемента составила около 97% теоретического предела при хорошей равномерности сформированного распределения интенсивности. Отметим, что для практических приложений важным

параметром является также глубина фокуса ДОО, фокусирующего излучение в радиально-симметричную область [1].

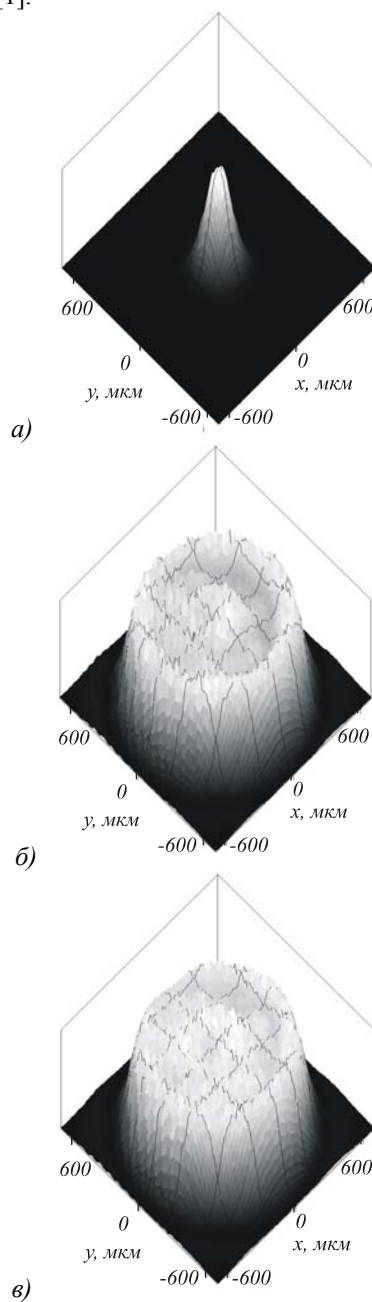


Рис. 3. Распределение интенсивности, замеренное в выходной плоскости линзы: в отсутствие ДОО (а), в присутствии ДОО (б), и в плоскости, отстоящей на расстоянии 20 мм за выходной плоскостью линзы (с)

На рис. 4 представлены расчетное продольное сечение интенсивности пучка, сформированного ДОО, и восстановленное по результатам оптических измерений на расстоянии от 540 до 660 мм от плоскости ДОО (расстояние 600 мм от плоскости ДОО соответствует выходной плоскости линзы:  $2f=600$  мм).

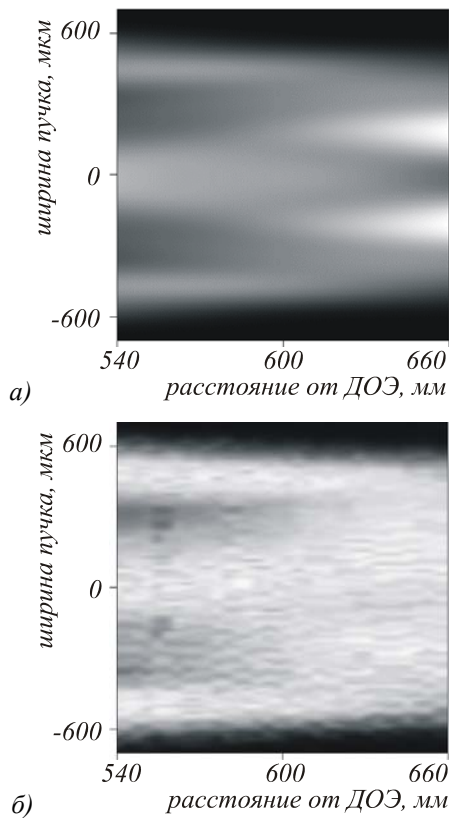


Рис. 4. Расчетное продольное сечение интенсивности пучка, сформированного ДОЭ (а), и восстановленное по результатам оптических измерений (б)

### Заключение

Натурные исследования элемента, фокусирующего гауссов пучка в круг, продемонстрировали высокое качество реализации расчетного профиля. Значение замеренной энергетической эффективности элемента находится в хорошем согласовании с теоретической оценкой и составляет 77-79 %. Таким образом, замеренная эффективность четырехуровневого элемента составила около 97 % теоретического предела при хорошей равномерности сформированного распределения интенсивности. Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности расчета квантованных ДОЭ с помощью стохастических процедур расчета и применения прямой лазерной записи для технологической реализации рассчитанного микрорельефа.

### Литература

1. V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation // Taylor & Francis Ltd., London, 1997.
2. A.V. Volkov, N.L. Kazansky, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev Methods For Computer Design Of Diffractive Optical Elements // Chapter 4. Technology of DOE fabrication. In Victor A. Soifer (Ed.). A Wiley Interscience Publication. John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002. P. 267-345.
3. Павельев В.С. К расчету квантованных радиально-симметричных ДОЭ // Компьютерная оптика, 2002. Т. 22 (принято к публикации).

# Experimental study of a four-level DOE focusing a Gaussian beam into a circle

V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, V.A. Soifer<sup>1,2</sup>, T. Glaser<sup>3</sup>, S. Schröter<sup>3</sup>, R. Pöhlmann<sup>3</sup>, H. Bartelt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

<sup>3</sup>Institute for Physical High Technology (Jena, Germany)

## Abstract

The article considers the production and research of a four-level diffractive optical element (DOE) focusing a Gaussian beam into a circle. Direct laser recording on a photoresist was used as the production technology. The value of the measured energy efficiency of the element is in good agreement with the theoretical estimate and amounts to approximately 80%.

*Keywords:* four-level DOE, diffractive optical element, Gaussian beam, laser recording on a photoresist.

*Citation:* Pavelyev VS, Soifer VA, Glaser T, Schröter S, Pöhlmann R, Bartelt H. Experimental study of a four-level DOE focusing a Gaussian beam into a circle. *Computer Optics* 2001; 22: 53-55.

## References

- [1] Soifer VA, Kotlyar VV, Doskolovich LL. Iterative methods for diffractive optical elements computation. London: Taylor and Francis Ltd; 1997.
- [2] Volkov AV, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Soifer VA, Uspleniev GV. Technology of DOE fabrication. In Book: Soifer VA, ed. Methods for computer design of diffractive optical elements. Ch 4. New York: John Wiley and Sons Inc; 2002: 267-345.
- [3] Pavelyev VS. Design of quantized, radially symmetric DOEs. *Computer Optics* 2001; 22 (accepted for publication).