

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО ДОО, ФОКУСИРУЮЩЕГО ГАУССОВ ПУЧОК В КРУГ

В.С. Павельев, В.А. Сойфер, Т. Глазер¹, З. Шротер¹, Р. Пульманн¹, Х. Бартельт¹

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет

¹Институт 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.

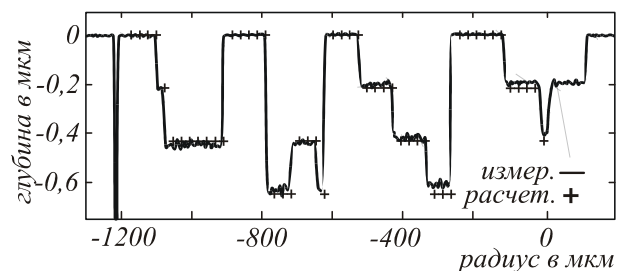


Рис. 1. Сравнение расчетного профиля элемента (крестики) с реализованным (сплошная линия) — по результатам измерений

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.

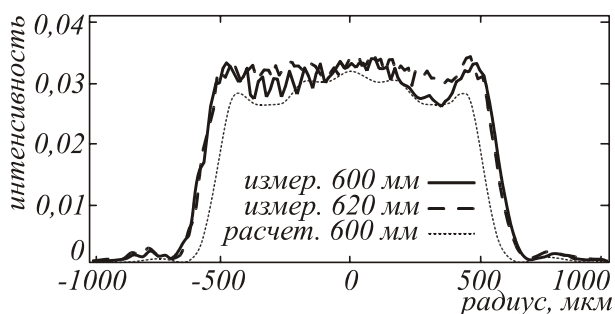


Рис. 2. Сравнение расчетного распределения интенсивности в выходной плоскости линзы (точки), замеренного распределения интенсивности в фокусе линзы (сплошная линия) и замеренного распределения в плоскости, находящейся на 20 мм за выходной плоскостью линзы

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].

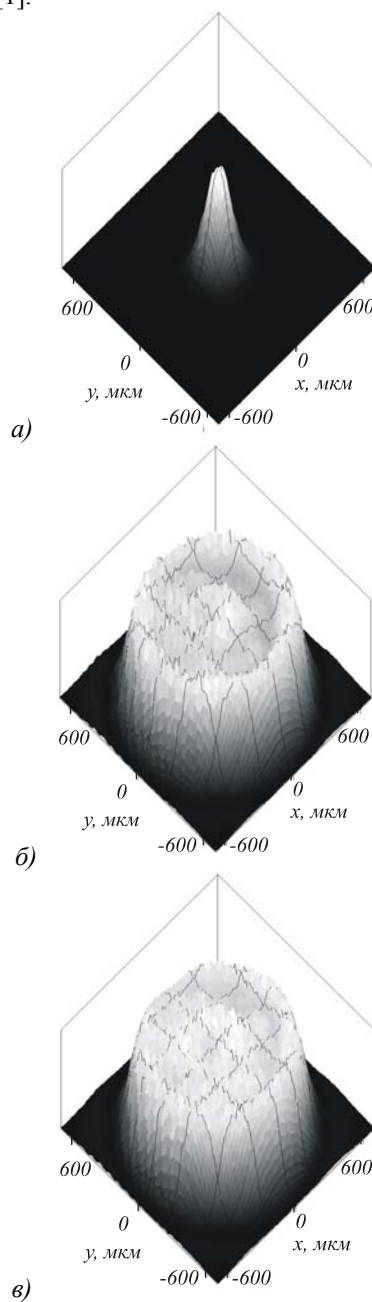


Рис. 3. Распределение интенсивности, замеренное в выходной плоскости линзы: в отсутствие ДОО (а), в присутствии ДОО (б), и в плоскости, отстоящей на расстоянии 20 мм за выходной плоскостью линзы (с)

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).

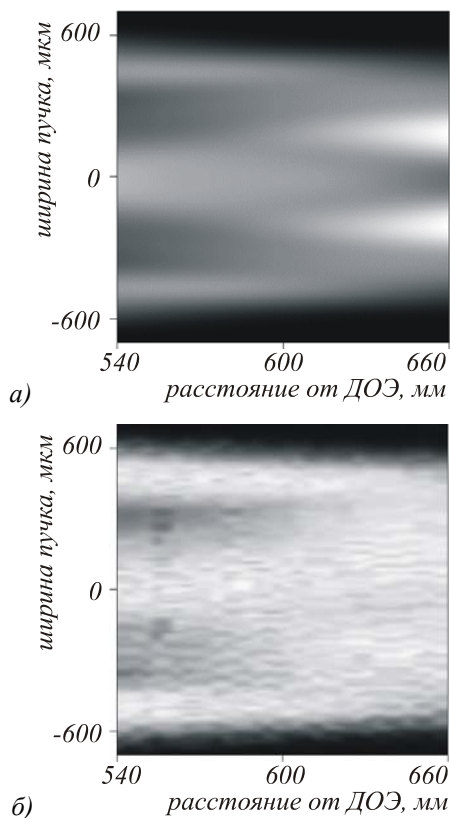


Рис. 4. Расчетное продольное сечение интенсивности пучка, сформированного ДОЭ (а), и восстановленное по результатам оптических измерений (б)

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).