

# ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

## ИТЕРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ, РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА, ФОКУСИРУЮЩЕГО ГАУССОВ ОСВЕЩАЮЩИЙ ПУЧОК В КОЛЬЦЕВУЮ ФОКАЛЬНУЮ ОБЛАСТЬ

В.С. Павельев, В.А. Сойфер, М. Дюпарре\*, Р. Коваршик\*, Б. Людге\*, Б. Фукс\*\*

Институт систем обработки изображений РАН

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

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

### Аннотация

Описан итерационный расчет, технологическая реализация и исследование дифракционного элемента, фокусирующего Гауссов освещающий пучок в кольцевую освещающую область. Расчет произведен с помощью высокоэффективной итерационной процедуры, использующей вычисление всего двух одномерных преобразований Фурье на итерацию.

Элемент реализован путем степенного травления кварцевого стекла по шестнадцати уровням с последующим нанесением золотого напыления. Результаты натурального эксперимента находятся в хорошем согласовании с результатами вычислительного эксперимента.

### 1. Введение

Важной проблемой, с которой приходится сталкиваться при итерационном расчете дифракционных оптических элементов (ДОЭ), является проблема необходимости повышения эффективности итерационных процедур [1,2,3,4,5,6]. Построение итерационной процедуры расчета ДОЭ предполагает в общем случае использование двух двумерных преобразований Фурье на каждой итерации. При этом для качественного изготовления оптического элемента современными методами микролитографии требуется матрица отсчетов фазовой функции с размерами 2048\*2048 и более [7]. Эта проблема становится тем более актуальна, если учесть, что оптимизация параметров релаксации при использовании адаптивной модификации процедуры уменьшения ошибки [2] требует многократного повторения итерационного расчета и моделирования элемента. В работах [3,4,5,6] рассмотрен расчет радиальных ДОЭ с использованием итерационного алгоритма Фьенана. Пересчет поля между плоскостью ДОЭ и фокальной плоскостью в приближении Френеля-Кирхгофа соответствует вычислению преобразования Ганкеля нулевого порядка. В [3,4] с помощью экспоненциальной замены переменных вычисление преобразования Ганкеля сводится к вычислению трех преобразований Фурье. Таким образом, итерационный расчет, рассмотренный в [3,4], требует вычисления шести одномерных преобразований Фурье на каждой итерации. В работах [5,6] предложен метод расчета ДОЭ для фокусировки в радиальную область вне оптической оси. Метод основан на сочетании использования: 1) аппроксимации задачи фокусировки в радиальную область вне оптической оси одномерной задачей фокусировки на отрезок; 2) использовании итерационных процедур решения одномерной задачи фокусировки на отрезок. Построенная итерационная процедура требует вычисления двух одномерных преобразований Фурье на каждую итерацию, что в три раза сокращает вычислительные

затраты по сравнению с итерационной процедурой [3,4]. Данная работа посвящена исследованию результатов применения высокоэффективной итерационной процедуры [5,6] к расчету фокусатора лазерного излучения CO<sub>2</sub>-лазера с Гауссовым распределением выходного пучка в фокальную область в виде уширенного кольца.

### 2. Постановка задачи

Пусть лазерный пучок с комплексной амплитудой  $W_0(\rho) = \sqrt{I_0(\rho)} \exp(i\varphi_0(\rho))$ , где  $I_0(\rho)$  - интенсивность освещающего пучка,  $\varphi_0(\rho)$  - фаза освещающего пучка, падает на ДОЭ с функцией комплексного пропускания  $\exp(i\varphi_1(\rho))$ ,  $\rho \leq a$ , где  $a$  - радиус апертуры ДОЭ,  $\rho^2 = u^2 + v^2$  (Рис. 1).

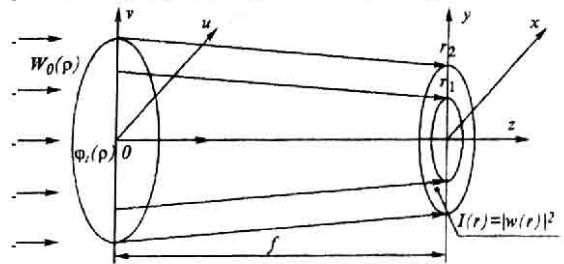


Рис. 1 Геометрия задачи фокусировки в радиальную область вне оптической оси

Задача состоит в отыскании фазовой функции ДОЭ  $\varphi_1(\rho)$ , обеспечивающей формирование заданного радиального распределения интенсивности  $I(r)$ ,  $r_1 \leq r \leq r_2$ ,  $r^2 = x^2 + y^2$  в фокальной плоскости  $z=f$ . В дальнейшем будем предполагать, что фазовая функция ДОЭ имеет вид:

$$\varphi_1(\rho) = \varphi(\rho) - \varphi_0(\rho). \quad (1)$$

Представление (1) позволяет производить расчет ДОЭ вне зависимости от фазы освещающего пучка. Комплексная амплитуда поля в фокальной плоскости

ти ДОЭ в приближении Френеля-Кирхгофа имеет вид:

$$w(r) = \frac{k}{f} \exp\left(i \frac{kr^2}{2f}\right) *$$

$$* \int_0^a \sqrt{I_0(\rho)} \exp(i\varphi(\rho)) \exp\left(i \frac{k\rho^2}{2f}\right) J_0\left(\frac{k}{f} r\rho\right) \rho d\rho \quad (2)$$

где  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ -длина волны,  $J_0(\xi)$ -Бессель-функция нулевого порядка. Используя асимптотическое представление для  $J_0(\xi)$  при  $\xi \gg 0$  [8]

$$J_0(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi\xi}} \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \xi^{-1/2} \rightarrow \infty \quad (3)$$

в [5,6] для  $w(r)$  получена следующая аппроксимация при  $r \gg 0$ :

$$w(r) = \exp(-i\pi/4) \left( w_1(r)/\sqrt{r} + iw_2(r)/\sqrt{r} \right), \quad (4)$$

где  $w_1(r) = \sqrt{\frac{k}{2\pi i f}} *$

$$* \int_0^a \sqrt{I_0(\rho)} \exp(i\varphi(\rho)) \exp\left(\frac{ik(r-\rho)^2}{2f}\right) d\rho, \quad (5)$$

$$w_2(r) = w_1(-r). \quad (6)$$

Функция  $w_1(r)$  соответствует комплексной амплитуде поля, формируемой одномерным ДОЭ с фазовой функцией  $\varphi(\rho)$  при освещении апертуры ДОЭ пучком с распределением интенсивности

$$\tilde{I}(\rho) = I_0(\rho)\rho. \quad (7)$$

Согласно (2), (4), (5), (6) в [5,6] предложено рассчитывать фазовую функцию ДОЭ для фокусировки в радиальную область с интенсивностью  $I(r), r \gg 0, r \in [r_1, r_2]$ , как фазовую функцию одномерного ДОЭ для фокусировки пучка с распределением интенсивности (7) в отрезок с распределением интенсивности

$$I_1(r) = I(r)r, r_1 \leq r \leq r_2 \quad (8)$$

При этом, согласно (6), слагаемое  $w_2(r)$  соответствует комплексной амплитуде поля при фокусировке в отрезок  $I_1(r), -r_2 \leq r \leq -r_1$  и не влияет на структуру поля при  $r \in [r_1, r_2]$ .

Таким образом, предложенная в [5,6] процедура может быть использована для итерационного расчета ДОЭ, фокусирующего входной пучок любой радиально-симметричной структуры в радиальную фокальную область вне оптической оси. В [5,6] на результатах вычислительного эксперимента показано, что построенная итерационная процедура позволяет рассчитывать элементы, формирующие фокальное распределение в виде уширенного кольца из равномерного освещающего пучка с энергетической эффективностью 89-92% и погрешностью 7-13%.

В данной работе проводилось исследование применения предложенной в [5,6] процедуры к расчету элемента, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка с распределением интенсивности

$$I_0(\rho) = \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right)$$

в кольцо заданной ширины. На Рис. 2 приведен трехмерный график Гауссова распределения интенсивности на апертуре элемента.

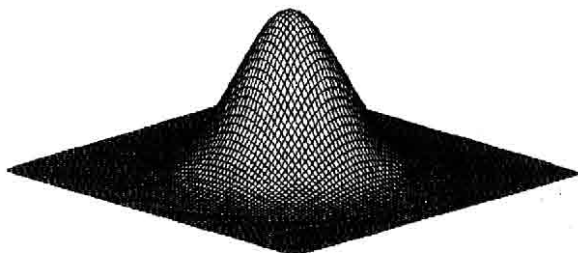


Рис. 2 Расчетное распределение интенсивности на апертуре ДОЭ

## 2. Экспериментальные результаты

Расчет элемента производился для следующих физических параметров: длина волны  $\lambda=10,6$  мкм; радиус апертуры элемента  $a=10,5$  мм; фокусное расстояние  $f=190,35$  мм; внутренний радиус фокального кольца  $r_1=8,35$  мм; внешний радиус фокального кольца  $r_2=11,3$  мм; параметр Гауссова пучка  $\sigma=5,5$  мм; число итераций  $n=111$ ; число значащих отсчетов фазовой функции вдоль радиуса  $N=5250$ , что соответствует минимальному шагу дискретизации использованного микролитографического оборудования (2 мкм). Такое число отсчетов было выбрано для обеспечения необходимой точности реализации достаточно нерегулярной фазовой структуры ДОЭ, рассчитанного линейной итерационной процедурой.

Для оценки качества фокусировки использованы значения энергетической эффективности  $e$  и среднеквадратичного отклонения  $\delta$ . Значение

$$e = \int_{r_1}^{r_2} I(r) r dr / \int_0^a I_0(\rho) \rho d\rho \quad (9)$$

характеризует долю энергии освещающего пучка, фокусируемую в заданную фокальную область. Значение

$$\delta = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{2}{(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} [I(r) - \bar{I}]^2 r dr} \quad (10)$$

характеризует среднеквадратичное отклонение распределения интенсивности от среднего значения

$$\bar{I} = \frac{2}{(r_2^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^{r_2} I(r) r dr \quad (11)$$

Отметим, что использование выбранного числа итераций стало возможным благодаря использованию высокоэффективной итерационной процедуры [5,6]. В качестве начального приближения использовалась геометрооптическая фаза. Для уменьшения ошибки формирования заданного распределения интенсивности на последних 11 итерациях расчет проводился с применением адаптивной коррекции [2]. Вместе с использованием адаптивной модификации производилось обнуление в фокальной плоскости при  $r \leq r_1/3$  на каждой итерации, что позволило практически полностью избежать появления осцилляций внутри фокального кольца и в то же время добиться уменьшения погрешности в области фокусировки. На Рис. 3 представлено фокальное распределение интенсивности вдоль радиуса, полученное моделированием элемента по формуле (2).

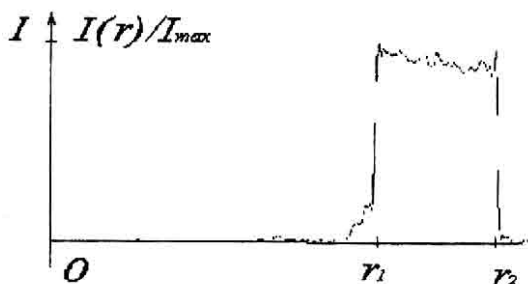


Рис. 3 Результат моделирования рассчитанного ДОЭ

В результате моделирования (2) были получены следующие значения критериев качества: энергетическая эффективность  $\epsilon=89\%$ , среднеквадратичное отклонение интенсивности  $\delta=4\%$ . После расчета радиального массива фазовой функции был сформирован двумерный массив отсчетов фазовой функции на апертуре ДОЭ, работающего на отражение, размером  $10500 \times 14848$  отсчетов (Рис. 4).

На Рис. 5 приведено распределение интенсивности, полученное моделированием рассчитанного элемента с помощью процедуры двумерного БПФ (число отсчетов матрицы  $1024 \times 1024$ ).

Значения критериев качества фокусировки  $\epsilon, \delta$  практически совпали со значениями, полученными при одномерном моделировании (2).

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента показали возможность расчета ДОЭ, фокусирующего Гауссов пучок в кольцевую фокальную область со значениями среднеквадратичного отклонения  $\delta=4\%$  и энергетической эффективности  $\epsilon=89\%$ , с помощью процедуры, предложенной в [5,6]. Для исследования возможности применения методов микролитографии к изготовлению ДОЭ, рассчитанного итерационной процедурой [5,6], по рассчитанному массиву отсчетов фазовой функции был рассчитан и изготовлен технологический комплект из четырех бинарных масок, предназначенный для изготовления ДОЭ методом степенного травления [7,9,10]. Изготовление технологического комплекта масок производилось в Институте прикладной

физики Университета Фридриха Шиллера (г. Йена, Германия) на литографе ZBA-23 производства фирмы "Jepoptik GmbH Jena" (Германия). На Рис. 6 и 7 представлены центральные фрагменты первой и третьей бинарных масок.

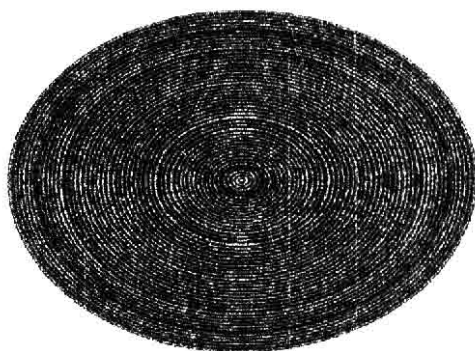


Рис. 4 Фазовое распределение на апертуре ДОЭ

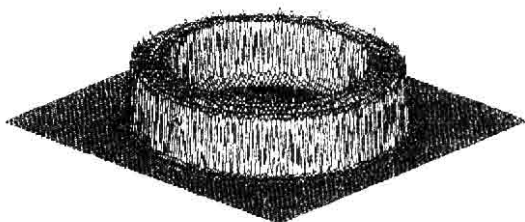


Рис. 5 Распределение интенсивности, формируемое ДОЭ

Анализ структуры бинарных масок показал хорошую технологичность рассчитанного элемента. По созданным технологическим маскам элемент был изготовлен путем степенного травления кварцевого стекла на установке RIBE (Reactive Ion Beam Etching) с последующим нанесением золотого покрытия. Изготовление ДОЭ проводилось в Институте прикладной физики Университета Фридриха Шиллера. Изготовленный элемент исследовался методом натурального эксперимента в Институте прикладной оптики Университета Фридриха Шиллера. На Рис. 8 представлен результат взаимодействия излучения  $\text{CO}_2$ -лазера ULTRALASERTECH (производство Канада), сфокусированного ДОЭ, с термочувствительной бумагой.

Результат натурального эксперимента (Рис. 8) согласуется с результатом вычислительного эксперимента и подтверждает работоспособность и перспективность итерационной процедуры расчета высококачественных радиально-симметричных ДОЭ, предложенной в [5,6]. Кроме того, данный результат дает основание для вывода о целесообразности применения микролитографической технологии степенного травления [7] к изготовлению элементов, рассчитанных итерационной процедурой, предложенной в [5,6]. Тем не менее, технологические погрешности изготовления ДОЭ привели к появлению паразитного изображения в виде кольца около оптической оси.



Рис. 6 Центральный фрагмент первой бинарной маски

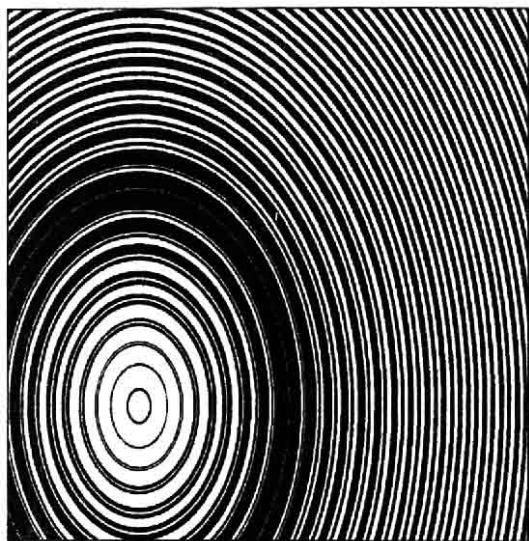


Рис. 7 Центральный фрагмент третьей бинарной маски

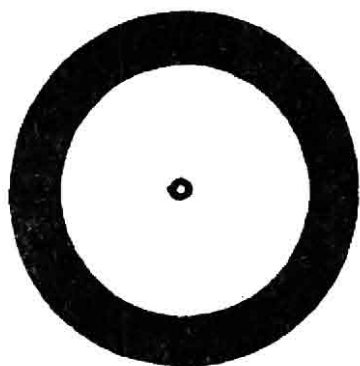


Рис. 8 Результат взаимодействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера, сфокусированного ДОО, с термочувствительной бумагой

#### Литература

1. Fienup J.R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms// Optical Engineering, 1980. - Vol.19. - P.297-303.
2. Kotlyar V.V., Nikolsky I.V., Soifer V.A. Adaptive iterative algorithm for focuser synthesis// Optik.- 1991.-Vol. 88, N 1-P. 17-19.
3. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Fast Hankel transform for focusators synthesis// Optik.- 1991.- Vol.88, N 4 - P.182-184.
4. Doskolovich L.L., Khonina S.N., Kotlyar V.V., Nikolsky I.V., Soifer V.A., Uspleniev G.V. Focusators into a ring// Optical and Quantum Electronics.- 1993. - Vol. 25. - P.801-814.
5. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Павельев В.С., Сойфер В.А. Расчет дифракционных оптических элементов для фокусировки во внеосевые радиальные фокальные области// Автометрия. - 1995.- N 1. - С. 114-119.
6. Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Pavelyev V.S. A hybrid method for calculating DOEs focusing into radial focal domain // Proceedings SPIE. 9th Meeting on Optical Engineering in Israel.- Vol.2426.- P. 358-365.
7. Duparre' M., Golub M.A., Ludge B.,Pavelyev V.S., Soifer V.A., Uspleniev G.V., Volotovskii S.G. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO<sub>2</sub>-laser beams// Applied Optics. - 1995. - Vol.34, N 14.- P. 2489-2497.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.-М.:Наука, 1984. 831 с.
9. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Seraphimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer generated holograms// Proceedings SPIE. - 1995. - Vol.2363 "Image Processing and Computer Optics (DIP-94)". - P.278-284.
10. Golub M.A., Rybakov O.E., Usplenjev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation// Optics and Laser Technology. - 1995. - Vol.27, ' 4. - P.215-218.

# Iterative calculation, manufacture and investigation of an element focusing a Gaussian illuminating beam into a ring focal region

I.V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, M. Duparre<sup>1</sup>, R. Kowarschik<sup>1</sup>, B. Luedge<sup>1</sup>, B. Fuchs<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Optics, Friedrich Schiller University (Jena, Germany)

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, Friedrich Schiller University (Jena, Germany)

## Abstract

The paper describes the iterative calculation, technological implementation and investigation of a diffractive element focusing a Gaussian illuminating beam into an annular illuminating region. The calculation was performed using a highly efficient iterative procedure that involves the calculation of only two one-dimensional Fourier transforms per iteration.

The element is produced by power etching of quartz glass at sixteen levels, followed by gold sputtering. The results of the full-scale experiment are in good agreement with the results of the computational experiment.

*Citation:* Pavelyev VS, Soifer VA, Duparre M, Kowarschik R, Luedge B, Fuchs B. Iterative calculation, manufacture and investigation of an element focusing a Gaussian illuminating beam into a ring focal region. *Computer Optics* 1998; 18: 111-114.

## References

- [1] Fienup JR. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms. *Opt Eng* 1980; 19: 297-305.
- [2] Kotlyar VV, Nikolsky IV, Soifer VA. Adaptive iterative algorithm for focusator synthesis. *Optik* 1991; 88(1): 17-19.
- [3] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA. Fast Hankel transform for focusators synthesis. *Optik* 1991; 88(4): 182-184.
- [4] Doskolovich LL, Khonina SN, Kotlyar VV, Nikolsky IV, Soifer VA, Uspleniev GV. Focusators into a ring. *Opt Quant Electron* 1993; 25: 801-814.
- [5] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Soifer VA. The calculation of diffractive optical elements for focusing into off-axis radial focal area [In Russian]. *Avtometriya* 1995; 1: 114-119.
- [6] Soifer VA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Pavelyev VS. A hybrid method for calculating DOEs focusing into radial focal domain. *Proc SPIE* 1995; 2426: 358-365.
- [7] Duparré M, Golub MA, Ludge B, Pavelyev VS, Soifer VA, Uspleniev GV, Volotovskii SG. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO<sub>2</sub>-laser beams. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2489-2497.
- [8] Korn G, Korn T. *Mathematical Handbook in mathematics for scientists and engineers*. McGraw-Hill; 1968.
- [9] Doskolovich LL, Golub MA, Kazanskiy NL, Khramov AG, Pavelyev VS, Seraphimovich PG, Soifer VA, Volotovskiy SG. Software on diffractive optics and computer generated holograms. *Proc SPIE* 1995; 2363: 278-284.
- [10] Golub MA, Rybakov OE, Usplenjev GV, Volkov AV, Volotovskiy SG. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation. *Opt Lasers Technol* 1995; 27(4): 215-218.