

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОО

### Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОО), предназначенные для фокусировки лазерного излучения и известные как фокусаторы [1-3], позволяют сформировать в фокальной области требуемое распределение интенсивности. При этом качество фокусировки зависит от методов изготовления дифракционного микрорельефа ДОО. Для оценки качества фокусировки на этапе проектирования фокусаторов используется математическая модель, представляющая ДОО как набор модулей кольцевой, линейной или прямоугольной формы [4-6].

Такая модель предполагает кусочно-постоянную аппроксимацию микрорельефа ДОО, что характерно, например, для литографических технологий [7-9].

Однако существуют и развиваются альтернативные технологии изготовления ДОО, обеспечивающие более сложную (например, кусочно-линейную) аппроксимацию профиля дифракционного микрорельефа ДОО [10-15].

В настоящей работе предложен метод оценки энергетической эффективности ДОО на стадии проектирования. Метод может быть использован для оценки влияния различных технологических ошибок изготовления на работу дифракционных оптических элементов.

### 1. Постановка задачи

Пусть  $\varphi(u,v)$  есть фазовая функция ДОО, фокусирующего лазерный пучок света с комплексной амплитудой  $W(u,v)$  в область  $Q$  фокальной плоскости (Рис.1). Важнейшим критерием оценки работы ДОО является энергетическая эффективность [4-6, 16]

$$E = \frac{\iint_Q I(x,y) dx dy}{\iint_F |W(u,v)|^2 du dv} \quad (1)$$

где  $I(x,y)$  - распределение интенсивности в фокальной плоскости, а  $F$  - апертура ДОО. Значение  $E$  характеризует долю энергии освещающего пучка, фокусируемую в требуемую фокальную область  $Q$ .

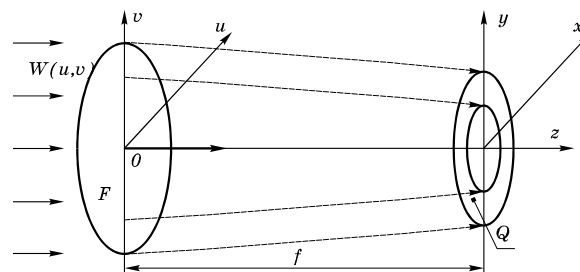


Рис. 1. Геометрия фокусировки

Предположим, что технологические погрешности изготовления ДОО могут быть описаны в виде нелинейного преобразования  $G[\varphi]$  фазовой функции ДОО  $\varphi(u,v)$ . Например, погрешность фотолитогра-

фической технологии описывается квантованием фазовой функции  $\varphi(u,v)$ , приведенной к интервалу  $[0, 2\pi)$ . В этом случае функция нелинейного преобразования фазы  $G[\varphi]$  будет иметь вид

$$G[\varphi] = \text{int} \left[ \frac{\varphi}{\Delta} \right] \Delta, \quad \Delta = 2\pi / M$$

где  $\text{int}[x]$  - целая часть от  $x$ , а  $M$  - число уровней квантования фазы.

Целью настоящей статьи является получение оценок изменения энергетической эффективности ДОО для некоторых функций искажений  $G[\varphi]$ , описывающих технологические погрешности изготовления дифракционного микрорельефа.

## 2. Оценка энергетической эффективности ДОО

С учетом технологических ошибок изготовления функция комплексного пропускания ДОО имеет вид

$$T(u,v) = \exp(iG[\varphi(u,v)]) \quad (2)$$

Чтобы описать работу оптического элемента (2), разложим функцию  $T(u,v)$  в ряд Фурье [17-18] по переменной  $\varphi$

$$T(u,v) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} c_n \exp\left(i \frac{n}{N} \varphi(u,v)\right) \quad (3)$$

где  $N$  - количество зон микрорельефа ДОО,

$$c_n = \frac{1}{2\pi N} \int_0^{2\pi N} \exp\left(iG[\xi] - i \frac{n}{N} \xi\right) d\xi \quad (4)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} |c_n|^2 = 1$$

В соответствии с (3) комплексная амплитуда поля в фокальной плоскости элемента (2) описывается выражением

$$W(x,y) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} c_n W_n(x,y) \quad (5)$$

В приближении Френеля-Кирхгофа [19-20]  $W_n(x,y)$  имеет вид

$$W_n(\mathbf{x}) = \frac{1}{i\lambda f} \iint_F E_0(\mathbf{u}) \times \exp\left(i \frac{n}{N} \varphi(\mathbf{u}) - i \frac{k}{2f} (\mathbf{x} - \mathbf{u})^2\right) d^2\mathbf{u} \quad (6)$$

где  $\mathbf{x}=(x,y)$ ,  $\mathbf{u}=(u,v)$ ,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  - длина волны, а  $f$  - расстояние до фокальной плоскости.

В соответствии с (5) и (6) элемент (2) формирует дифракционные порядки  $W_n(x,y)$ ,  $n = -\infty, \infty$ . Требуемая фокусировка описывается членом  $W_N(x,y)$ . Численный анализ интеграла (6) для  $n \neq N$  показывает его малость по сравнению с интегралом  $W_N(x,y)$  для случая фокусировки в линию. В частности, как следует из общего представления фазовой функции фокусатора в линию [2, 6, 21] члены  $W_n(x,y)$ ,  $n \neq N$ , соответствуют расфокусированным

линиям. Дифракционная ширина таких линий на порядок больше дифракционной ширины линии, описываемой членом ряда  $W_N(x,y)$ . Поэтому при фокусировке в линию с хорошей точностью можно использовать следующее соотношение

$$W(x,y) \cong c_N W_N(x,y) \quad (7)$$

Согласно (1) и (7) получаем оценку энергетической эффективности ДОО (2) в форме

$$\hat{E} = |c_N|^2 E \quad (8)$$

где  $E$  - дифракционная эффективность ДОО с фазовой функцией  $\varphi(u,v)$ . Следует заметить, что (8) является оценкой снизу энергетической эффективности оптического элемента (2), так как паразитные порядки, соответствующие  $n \neq N$ , в некоторых случаях могут накладываться на полезное изображение, увеличивая энергетическую эффективность.

Как следует из (8), изменение энергетической эффективности ДОО, обусловленное нелинейным искажением  $G[\varphi]$  его фазовой функции, пропорционально квадрату модуля коэффициента Фурье  $c_N$  в разложении фазовой функции  $\exp(iG[\varphi])$ . Конкретная форма функции  $G[\varphi]$  зависит от типа технологических погрешностей и конкретной технологии изготовления ДОО.

## 3. Расчет функции нелинейного искажения

В качестве примера рассмотрим расчет  $G[\varphi]$  для ДОО с аксиальной симметрией, изготавливаемых на прецизионных станках [10-12,15]. Особенностью такого метода изготовления является кусочно-линейная аппроксимация зон дифракционного микрорельефа ДОО, генерируемого радиальной фазовой функцией  $\varphi(r) \in [0, 2\pi N]$ ,  $r = (u^2+v^2)^{1/2}$ ,  $r \in [0, R]$ . Разобьем интервал  $[0, R]$  на набор непересекающихся отрезков  $[U_m, U_{m+1}]$ , каждый из которых подчиняется следующему условию

$$\varphi(U_{m+1}) - \varphi(U_m) = 2\pi l, \quad l = \text{const}, \quad l \leq N \quad (9)$$

Величину  $l$  можно интерпретировать как интервал приведения фазы (см.Рис.2). Предположим, что на каждом интервале  $[U_m, U_{m+1}]$  функция  $G[\varphi(r)]$  является линейной и принимает на концах интервала значения 0 и  $2\pi l$  соответственно (Рис.2). В этом случае функция нелинейного преобразования (искажения) имеет вид

$$G[\xi] = \frac{\xi - f_1(\xi)}{f_2(\xi) - f_1(\xi)} 2\pi l, \quad \xi \in [0, 2\pi N] \quad (10)$$

где

$$f_1(\xi) = \varphi^{-1} \left( 2\pi l \text{int} \left[ \frac{\xi}{2\pi l} \right] \right),$$

$$f_2(\xi) = \varphi^{-1} \left( 2\pi l \left( \text{int} \left[ \frac{\xi}{2\pi l} \right] + 1 \right) \right)$$

а  $\varphi^{-1}$  - функция, обратная к  $\varphi(r)$ .

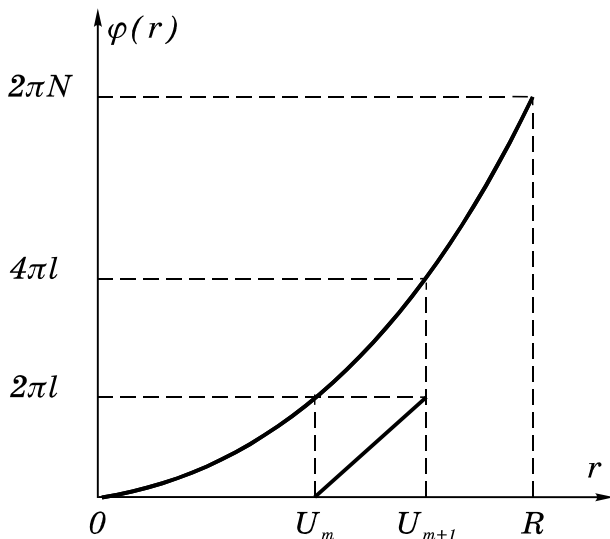


Рис. 2. Кусочно-линейная аппроксимация фазовой функции ДОЭ.

Чтобы оценить изменение энергетической эффективности на основе функции  $G[\xi]$ , определенной в (10), были рассчитаны коэффициенты  $|c_N|^2$  для дифракционной линзы, задаваемой формулой

$$\varphi(r) = \frac{\pi}{\lambda f} (R^2 - r^2); \quad R = (2\lambda N)^{1/2}$$

со следующими параметрами:  $\lambda=0.001$  мм;  $f=100$  мм;  $N=4-100$ .

Графики фазовой функции линзы до и после нелинейного преобразования  $G[\varphi]$  показаны на Рис. 3(а,б).

В Таблице 1 приведены рассчитанные значения квадратов модулей коэффициентов Фурье  $c_N$  для различных значений параметров  $N$  и  $l$ .

Значения  $|c_N|^2$ , описывающие изменения энергетической эффективности для кусочно-линейной аппроксимации профиля микрорельефа дифракционной линзы

$l$	$N$						
	4	8	16	20	40	50	100
1	0.8073	0.8837	0.9354	0.9471	0.9724	0.9772	0.9881
2	0.2573	0.4851	0.6967	0.7486	0.8646	0.8900	0.9440
5	-	0.3217	0.5562	0.6220	0.7635	0.7987	0.8831
10	-	-	0.1841	0.2225	0.3669	0.4198	0.5910
20	-	-	-	0.0221	0.0377	0.0690	0.1148

### Благодарность

Работа выполнена в рамках Государственной научно-технической программы "Наукоемкие технологии" при поддержке Министерства науки и технической политики РФ. Авторы выражают благодарность А.Е.Царегородцеву, Я.Е.Тахтарову и С.В.Смагину за помощь в подготовке статьи.

### Литература

1. Сисакян И.Н., Соифер В.А. Компьютерная оптика. Достижения и проблемы // Компьютерная оптика, вып.1.- М.: МЦНТИ. - 1987. - С.5-19.
2. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infrared radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. - 1991. - Vol.15, No 5. - P.297-309.

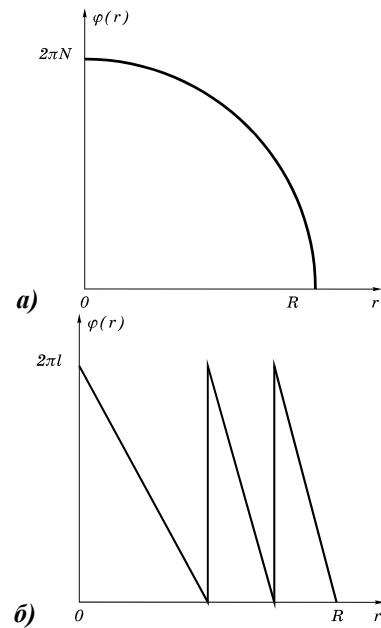


Рис. 3. Графики фазовой функции линзы до (а) и после (б) применения нелинейного преобразования  $G[\varphi]$ .

Данные, приведенные в Таблице 1, могут быть использованы для выбора допустимых параметров  $N$  и  $l$  дифракционной линзы при кусочно-линейной аппроксимации профиля зон микрорельефа. В частности, применение кусочно-линейной аппроксимации микрорельефа дифракционной линзы с вышеприведенными параметрами для количества зон  $N>4$  и  $l=1$  приводит к уменьшению энергетической эффективности не более чем на 20%. В то же время линейная аппроксимация сразу относительно большего числа зон Френеля  $N/l < 20$  при  $l \geq 2$  является неэффективной.

Таблица 1.

3. Sisakyan I.N., Soifer V.A. Infrared focusators, new optical elements // *Infrared Physics*. - 1991. - Vol.32. - P.435-438.
4. Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Математическая модель фокусировки излучения элементами компьютерной оптики // *Научное приборостроение*. - 1993. - Т.3, No 1. - С.9-23.
5. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. // *Автометрия*. - 1988. - No 1. - С. 70-82.
6. Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment // *Optik*. - 1994. - Vol.96, No 4. - P.158-162.
7. Попов В.В. Материалы и методы для создания плоских фокусирующих элементов // *Компьютерная оптика*. - М.: МЦНТИ, 1987. - Вып.1. - С.160-163.
8. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation / Golub M.A., Rybakov O.E., Usplenjev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G. // *Optics and Laser Technology*. - 1995. - Vol.27, No 4. - P.215-218.
9. Rectangular-apertured micro-Fresnel lens arrays fabricated by electron-beam lithography / Shiono T., Setsune K., Yamazaki O., Wasa K. // *Applied Optics*. - 1987. - Vol.26. - P.587-591.
10. Curcio M. Diamond machining of infrared optics utilizing two-axis machine technology // *Proceedings SPIE*. - 1981. - Vol.306. - P.105-113.
11. Булатов Е.Д., Гридин С.А., Даниленко А.А. Изготовление элементов плоской оптики миллиметрового и субмиллиметрового диапазона на серийных промышленных станках с числовым программным управлением // *Компьютерная оптика*. - М.: МЦНТИ, 1987. - Вып.1. - С.167-173.
12. Clark P.P., Londono C. Production of kinoform by single point diamond machining // *Optics News*. - 1989. - Vol.15. - P.39-40.
13. Dry photopolymer films for computer-generated infrared radiation focusing elements / Boiko Yu.B., Solovjev V.S., Calixto S., Lougnot D.-J. // *Applied Optics*. - 1994. - Vol. 33, No 5. - P.787-793.
14. Соловьев В.С. Исследование поведения слоя ЖФПК во время рельефообразования // *Компьютерная оптика*. - М.: МЦНТИ, 1992. - Вып.10-11. - С.145-149.
15. Sweeney D.W., Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses // *Applied Optics*. - 1995. - Vol.34, No 14. - P.2469-2475.
16. Бобров С.Т., Грейсх Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. - Л.: Машиностроение, 1986. - 224с.
17. Dallas J.M. Phase quantization - a compact derivation // *Applied Optics*. - 1971. - Vol.10. - P.674-676.
18. Goodman J.W., Silvestri A.M. Some effects of Fourier-domain phase quantization // *IBM Journ. Res. Develop.* - 1969. - Vol.14. - P.478-484.
19. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.- М.: Наука, 1973. - 720 с.
20. Kathuria Y.P. Computer modeling of three-dimensional Fresnel-diffraction pattern at circular, rectangular and square apertures // *Optica Applicata*. - 1984. - Vol. 14, No 4. - P.509-514.
21. Soifer V.A., Golub M.A. Diffractive micro-optical elements // *Proceedings SPIE*. - 1992. - Vol.1751. - P.140-154.