

И. Г. ПАЛЬЧИКОВА  
(Новосибирск)

### ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ИЗГОТОВЛЕНИЯ КИНОФОРМНОЙ ЛИНЗЫ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Известно, что при освещении киноформной линзы плоской монохроматической световой волной распределение интенсивности в дифракционном фокусе первого порядка будет описываться функцией Эйри [1]. Ошибки изготовления киноформной линзы приводят к искажению дифракционной картины.

В настоящей работе дана оценка влияния ошибок изготовления круговых зон киноформной линзы на функцию зрачка, при этом в качестве меры качества изображения используется число Штреля.

Для оптических систем, качество которых ограничено дифракцией, общепринятым является критерий Марешала [2], утверждающий, что система хорошо скорректирована, если нормированная интенсивность в дифракционном фокусе (число Штреля) больше или равна 0,8, т. е.

$$i = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{(\pi R)^2} \left| \int_0^R \int_0^{2\pi} e^{j2\pi W(\rho, \Theta)} \rho d\rho d\Theta \right|^2 = 1 - (2\pi)^2 [\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2] \geq 0,8, \quad (1)$$

где интегрирование ведется по выходному зрачку системы,  $(\rho, \Theta)$  — полярные координаты в плоскости выходного зрачка,  $2R$  — диаметр выходного зрачка,  $W(\rho, \Theta)$  — ошибка волнового фронта,  $\langle W^m \rangle$  — среднее значение  $m$ -й степени  $W(\rho, \Theta)$ :

$$\langle W^m \rangle = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} W^m(\rho, \Theta) \rho d\rho d\Theta.$$

Киноформная линза — это осесимметричный фазовый оптический элемент [1]. Его фазовая структура представляет собой набор круговых зон, границы которых задаются равенством

$$\rho_n^2 = 2n\lambda f + \text{члены более высокого порядка}, \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, \dots, N$  — номер зоны,  $\lambda$  — длина волны света,  $f$  — фокальная длина. Оптическая толщина в пределах каждой зоны изменяется от 0 до  $\lambda$  и имеет вид параболы. Функция пропускания киноформной линзы моделирует функцию пропускания обычной линзы  $T(\rho) = \exp(-j\pi\rho^2/\lambda f)$ .

Если границы зон выполнены точно, то реализуется требуемая функция пропускания  $T(\rho)$ . При наличии технологических ошибок функция пропускания  $\tilde{T}(\rho)$  киноформной линзы отличается от  $T(\rho)$ . Представив искаженную функцию в виде произведения функции  $T(\rho)$  и некоторой зрачковой функции, зависящей от характера искажений, можно оценить работу киноформной линзы по критерию Марешала. Далее будем считать, что выходной зрачок системы совпадает с плоскостью киноформной линзы.

При изготовлении оптических элементов с помощью прецизионного лазерного фотопостроителя [3], где запись дифракционной структуры осуществляется сфокусированным лазерным пучком в полярной системе координат, возможны:

- 1) ошибки определения начала координат, когда сфокусированный лазерный луч перед записью устанавливается не точно в центр вращения подложки;
- 2) случайные ошибки радиусов зон, появляющиеся вследствие микросейсмов, теплового расширения подложки, электрических помех;
- 3) ошибки, возникающие из-за деформации подложки.

Пусть при изготовлении киноформной линзы начало координат, относительно которого отсчитываются радиусы зон, смещено на  $\delta$  от центра вращения подложки. Тогда оптический элемент будет иметь функцию пропускания

$$\tilde{T}(\rho) = e^{-2\pi j(\rho+\delta)^2/2\lambda f} \approx e^{-2\pi j\rho^2/2\lambda f} e^{-2\pi j\rho\delta/\lambda f}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что «децентровка» приведет к искажению формы фокального пятна и его сдвигу вдоль оптической оси. Запишем функцию ошибки волнового фронта, выделив член, описывающий дефокусировку, в виде отдельного слагаемого  $-\beta\rho^2$ :

$$W(\rho) = -[(\rho\delta/\lambda f) + \beta\rho^2]. \quad (4)$$

Коэффициент  $\beta$  зависит от величины ошибки  $\delta$  и будет определен ниже.

Проведя вычисления, получим выражение для среднеквадратичной деформации волнового фронта в виде

$$\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 = \delta^2 R^2 / 18\lambda^2 f^2 + 2\delta\beta R^3 / 15\lambda f + \beta^2 R^4 / 12. \quad (5)$$

В плоскости наилучшей фокусировки уменьшение числа Штреля минимально, т. е.  $\frac{\partial}{\partial \beta} (\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2) = 0$ , откуда с учетом (5) находим, что  $\beta = -4\delta/5\lambda f R$ .

Легко видеть, что параметр  $\beta$  соответствует изменению фокусного расстояния  $\Delta f \approx 8\delta f/5R$ .

Пользуясь критерием Марешаля, определим, с какой точностью необходимо совмещать начало координат с центром вращения подложки:

$$\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 = \delta^2 R^2 / 450 \lambda^2 f^2 < 0,2 / (2\pi)^2.$$

Отсюда получим, что величина ошибки

$$\delta \leq (\lambda f / 2\pi R) 9,49. \quad (6)$$

Аналогичным образом можно оценить максимально допустимое среднеквадратичное значение  $\langle \Delta^2 \rangle$  случайных ошибок положения зон. Для этого вычислим величину среднеквадратичной деформации волнового фронта и оценим ее по выбранному критерию, исходя из того, что среднее значение ошибки волнового фронта равно нулю:

$$\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 = (1/2) \langle \Delta^2 \rangle (R/\lambda f)^2 < 0,2 / (2\pi)^2.$$

Отсюда следует оценка

$$\sqrt{\langle \Delta^2 \rangle} \leq (\lambda f / 2\pi R) 0,632. \quad (7)$$

Зоны киноформной линзы могут иметь вид эллипсов вследствие систематических ошибок изготовления, например деформаций подложки и биений при ее вращении. Границы зон задаются уравнением

$$\rho^2 + \rho^2 \cos 2\Theta (a^2 - 1) = \text{const},$$

где  $a > 1$  ( $a$  — отношение большой оси эллипса к малой).

По аналогии с предыдущим функция ошибки волнового фронта будет иметь вид

$$W(\rho, \Theta) = -(\epsilon/2\lambda f) (\rho^2 + \rho^2 \cos 2\Theta), \quad \epsilon = (a^2 - 1)/2. \quad (8)$$

В формуле (8) первый член — это абберрация дефокусировки, которую можно исключить, выбирая плоскость наилучшей фокусировки. Легко показать, что фокусное расстояние при этом изменится на величину  $\Delta f \approx (1 - a)f$ . Усредняя функцию ошибки волнового фронта по выходному зрачку, получим число Штреля

$$i = 1 - (1/6) (\pi \epsilon R^2 / \lambda f)^2.$$

Используя критерий Марешаля, находим ограничение на степень эллиптичности, при которой киноформная линза имеет один фокус:

$$a < 1 - 1, 1 (\lambda f / \pi R^2).$$

При большой эллиптичности появляются два астигматических фокуса.

Таким образом, в данном сообщении указаны ограничения на величину деформаций зон киноформной линзы, при которых качество изображения ограничивается дифракцией на выходном зрачке. Допустимые величины ошибок изготовления линейно зависят от величины относительного отверстия. Для длины световой волны  $\lambda = 0,632 \cdot 10^{-3}$  мм допустимые ошибки составят:  $\delta = 3,8$  мкм,  $\sqrt{\langle \Delta^2 \rangle} = 0,25$  мкм при относительном отверстии  $f/2R = 2$  и  $\delta = 7,6$  мкм,  $\sqrt{\langle \Delta^2 \rangle} = 0,51$  мкм при  $f/2R = 4$ ; допустимая степень эллиптичности —  $a = 1,35$  при  $R^2/\lambda f = 100$ .

В заключение отметим, что полученные оценки позволяют уточнить требования к системе позиционирования и оптическому блоку записи лазерного фотопостроителя и тем самым повысить точность изготавливаемых структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Clair J. J. Synthèse optique de filtres d'amplitude et de phase dits "kinoforn": Thèse de doctorat. Paris: l'Université de Paris VI, 1972.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
3. Ведерников В. М. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов. — Автометрия, 1981, № 3.

Поступило в редакцию 20 февраля 1984 г.;  
окончательный вариант — 28 мая 1984 г.