

4. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка.— Автометрия, 1985, № 6.
5. Спектор Б. И., Твердохлеб П. Е., Трубецкой А. В., Щербаченко А. М. Лазерная запись высокоинформативных изображений.— Там же.

Поступила в редакцию 4 июля 1985 г.

УДК 535.4 : 519.28

И. Г. ПАЛЬЧИКОВА, А. Г. РЯБЧУН  
(Новосибирск)

## О ВЛИЯНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КИНОФОРМОВ НА ФУНКЦИЮ ЗРАЧКА

Технология изготовления киноформов с помощью фотолитографического процесса включает в себя подготовку комплекта фотошаблонов, топология которых переводится в рельеф подложки (стеклянной, кварцевой, германиевой и т. п.) путем химического, ионного или плазмохимического травления [1, 2]. Многоступенчатый рельеф формируется методом многоступенчатого травления, на каждом шаге производится фотолитография с помощью соответствующего шаблона. Если при каждой фотолитографии подложка травится на одинаковую глубину, равную  $2\pi L/N$  ( $N$  — число ступеней рельефа,  $L=1$ ), что возможно для любого  $N$ , то требуется  $M_0 = N - 1$  шаблонов (случай I); если же  $N = 2^m$  ( $m$  — целое), то число шаблонов для данного  $N$  можно резко уменьшить:  $M_0 = \log_2 N = m$ , но при этом глубина травления подложки  $2\pi L/N$  зависит от порядкового номера фотолитографии  $M$ , поскольку  $L = 2^{M-1}$  ( $M = 1, 2, 3, \dots, M_0$ ) (случай II). Ошибки изготовления или совмещения фотошаблонов приводят к искажению световой волны после киноформа.

Определение действия такого искажения на качество изображения затрудняется тем, что при прохождении света через киноформ возникают различные дифракционные порядки, из которых интерес представляет лишь первый. В работе определяется влияние погрешностей изготовления или совмещения одного из фотошаблонов на функцию зрачка киноформа для первого дифракционного порядка для двух способов травления.

Пусть комплексная прозрачность оптического элемента  $F(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)]$ , где  $x, y$  — координаты выходного зрачка. При изготовлении его в виде киноформа фазовое распределение  $\varphi(x, y)$  моделирует-

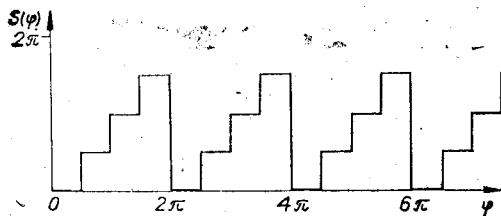


Рис. 1.

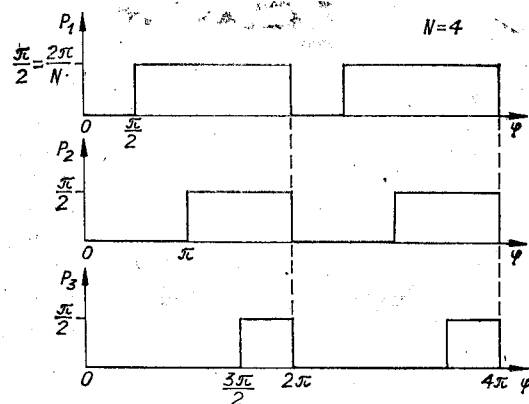


Рис. 2.

ся «ступенчатой» функцией  $S(\varphi)$  (рис. 1). Комплексная прозрачность киноформа

$$F_1(x, y) = e^{j[S(\varphi(x, y))]}.$$

Так как  $S$  периодична по  $\varphi$  с периодом  $2\pi$ , то  $F_1(x, y)$  разлагается в ряд Фурье:

$$F_1[\varphi(x, y)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\varphi(x, y)}; \quad (1)$$

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_1(\varphi) e^{-jn\varphi} d\varphi, \quad n - \text{целое}. \quad (2)$$

Можно показать, что

$$C_n = \begin{cases} 0, & n \neq mN + 1; \\ (-1)^m \frac{\sin \left[ \pi \left( \frac{1}{N} + m \right) \right]}{\pi \left( \frac{1}{N} + m \right)} e^{-jn \left( \frac{1}{N} + m \right)}, & n = mN + 1; \\ & m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Слагаемое  $C_1 e^{j\varphi(x, y)}$ , где  $C_1 = \frac{\sin(\pi/N)}{\pi/N} e^{-j(\pi/N)}$ , описывает первый дифракционный порядок и пропорционально требуемой комплексной прозрачности  $F(x, y)$ . Доля энергии в первом дифракционном порядке равна  $|C_1|^2$  и стремится к 1 при  $N \rightarrow \infty$ . Остальные порядки являются паразитными и их стараются уменьшить или диафрагмировать [3]. Дифракционная эффективность киноформа  $\eta_0 = |C_1|^2 \cdot 100\%$  определяется числом ступеней квантования  $N$  и точностью изготовления.

Комплексную прозрачность многоступенчатого киноформа можно представить следующим образом:

$$F_1[\varphi(x, y)] = \prod_{l=1}^{M_0} \exp \{jP_l(\varphi)\}; \quad (4)$$

$$S[\varphi(x, y)] = \sum_{l=1}^{M_0} P_l[\varphi(x, y)].$$

Функция  $P_l(\varphi)$  соответствует изменению оптической толщины подложки после обработки ее с помощью  $l$ -го шаблона.

Случай I, соответствующий травлению на одинаковую глубину при каждой фотолитографии. Набор функций  $P_l(\varphi)$  для  $N=4$  показан на рис. 2. Пусть один из шаблонов (допустим  $k$ -й) искажен или смещен с ошибкой. Тогда если идеальный шаблон соответствует фазовому распределению  $\varphi(x, y)$ , то дефектный шаблон — распределению  $\varphi'(x, y) = \varphi(x, y) + \varepsilon(x, y)$ . Далее функция фазовой ошибки считается достаточно малой величиной  $|\varepsilon(x, y)| < 2\pi$ . Комплексная прозрачность всего киноформа при этом примет вид

$$F'_1(x, y) = F_1(x, y) e^{-jP_k(\varphi)} e^{jP_k(\varphi + \varepsilon)}. \quad (5)$$

Легко видеть, что функция  $F'_1(x, y)$  также периодична по  $\varphi$  с периодом  $2\pi$  и разлагается в ряд Фурье:

$$F'_1(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C'_n[\varepsilon(x, y)] e^{jn\varphi(x, y)}. \quad (6)$$

Однако коэффициенты  $C'_n$  теперь будут зависеть от  $\varepsilon$  и, следовательно, от координат  $(x, y)$ . Слагаемое при  $n=1$  можно представить в виде

$$C'_1[\varepsilon(x, y)] e^{j\varphi(x, y)} = C_1 e^{j\varphi(x, y)} \left[ \frac{C'_1[\varepsilon(x, y)]}{C_1} \right], \quad (7)$$

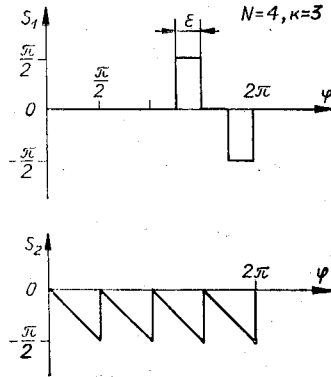


Рис. 3.

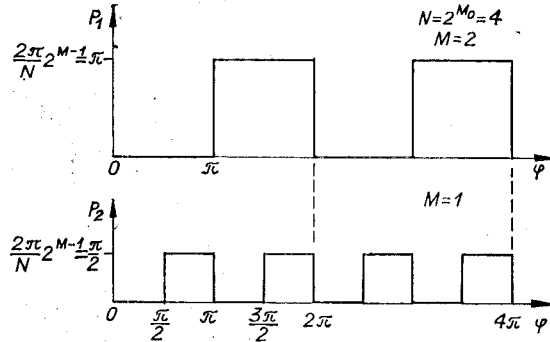


Рис. 4.

т. е. первый дифракционный порядок просто умножается на абберационную функцию  $A_I(x, y) = C'_1[\varepsilon(x, y)]/C_1$ , которая в случае совпадения поверхности киноформа с выходным зрачком оптической системы является функцией зрачка.

По аналогии с (2) для  $C'_1(\varepsilon)$  имеем

$$C'_1(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_1(\varphi) e^{j\{P_k(\varphi+\varepsilon) - P_k(\varphi)\}} e^{-j\varphi} d\varphi \quad (8)$$

или

$$C'_1(\varepsilon) - C_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [e^{jS_1(\varphi, \varepsilon)} - 1] e^{jS_2(\varphi)} d\varphi, \quad (9)$$

где

$$S_1(\varphi, \varepsilon) = P_k(\varphi + \varepsilon) - P_k(\varphi); \quad (10)$$

$$S_2(\varphi) = S(\varphi) - \varphi. \quad (11)$$

Функции  $S_1(\varphi, \varepsilon)$  (для случая  $N=4, k=3, \varepsilon(x, y) < 0$ ) и  $S_2(\varphi)$  изображены на рис. 3. Легко видеть, что выражение  $(e^{jS_1} - 1)$  в интеграле (9) будет отлично от нуля только на отрезках длиной  $|\varepsilon|$  (здесь и далее полагаем  $|\varepsilon(x, y)| < 2\pi/N$ ), примыкающих к точкам  $2\pi k/N$  и  $2\pi$  (0 в случае  $\varepsilon < 0$ ).

Проводя интегрирование, получим

$$C'_1[\varepsilon(x, y)] - C_1 = -\frac{2j}{\pi} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]^2 \text{sign}(\varepsilon) e^{-j\frac{\pi}{N}(\text{sign}(\varepsilon)+1)} (e^{-j\varepsilon} - 1), \quad (12)$$

или для функции зрачка

$$A_I(x, y) = \frac{C'_1[\varepsilon(x, y)]}{C_1} = 1 - \frac{2j}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \text{sign}(\varepsilon) e^{-j\frac{\pi}{N}\text{sign}(\varepsilon)} (e^{-j\varepsilon} - 1). \quad (13)$$

Разлагая экспоненту в ряд (с учетом малости  $\varepsilon$ ), можно записать

$$A_I(x, y) \approx 1 - (2/N) \sin(\pi/N) |\varepsilon(x, y)| e^{-j\pi/N \text{sign}(\varepsilon)} \quad (14)$$

или, подробнее,

$$A_I(x, y) \approx 1 + (2/N) \sin^2(\pi/N) j\varepsilon(x, y) - (1/N) \sin(2\pi/N) |\varepsilon(x, y)|. \quad (15)$$

В случае II глубина травления зависит от номера фотолитографии. Набор функций  $P_l(\varphi)$  для  $N=4$  показан на рис. 4. Дальнейшее рассмотрение полностью аналогично случаю I. Комплексная прозрачность киноформа описывается выражением (5) и разлагается в ряд Фурье (6). Функция зрачка  $A_{II}(x, y) = C'_1[\varepsilon(x, y)]/C_1$  определяется интегралом (9)

с учетом нового вида функций  $P_1(\varphi)$ :

$$C'_1[\varepsilon(x, y)] - C_1 = -\frac{2j}{\pi} \left[ \sin\left(\pi \frac{L}{N}\right) \right]^2 \text{sign}(\varepsilon) e^{-j\frac{\pi}{N}|\text{sign}(\varepsilon)|+1} (e^{-j\varepsilon} - 1), \quad (16)$$

$$N = 2^{M_0}, \quad L = 2^{M-1}, \quad M = 1, 2, 3, \dots, M_0;$$

$$A_{II}(x, y) = 1 - \frac{2j}{N} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi L}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)} \text{sign}(\varepsilon) e^{-j\frac{\pi}{N}\text{sign}(\varepsilon)} (e^{-j\varepsilon} - 1). \quad (17)$$

Окончательно, учитывая малость  $\varepsilon$ , получаем

$$A_{II}(x, y) = 1 + 2\sin^2(\pi L/N) j\varepsilon(x, y)/N - 2\sin^2(\pi L/N) \times \\ \times \text{ctg}(\pi/N) |\varepsilon(x, y)|/N. \quad (18)$$

Сравнивая функции зрачка  $A_I$  и  $A_{II}$ , легко видеть, что первый способ формирования рельефа предпочтительнее, поскольку при одинаковых ошибках в топологии  $\varepsilon(x, y)$  или ошибке совмещения одного из фотошаблонов искажения волнового фронта после киноформа в I-м случае не зависят от номера дефектного шаблона и всегда меньше либо равны (лишь для  $M=1$ , т. е. для одной литографии) искажениям во II-м случае. Следует отметить, что ухудшение дифракционной эффективности также меньше в I-м случае, поскольку  $\eta'_0/\eta_0 = |C'_1/C_1|^2 = |A(x, y)|^2$ . Однако для II-го способа формирования рельефа количество необходимых фотошаблонов существенно меньше, чем для I-го (для 4-ступенчатого рельефа необходимо 2 шаблона, а для 8 — всего 3), что уменьшает количество технологических операций.

С помощью полученных выражений для зрачковой функции киноформа при малых искажениях  $\varepsilon(x, y)$  одного из фотошаблонов можно оценить работу киноформа по общепринятым критериям [4].

Приведем пример использования функции  $A(x, y)$  для оценки работы киноформной линзы, модулирующей фазовое распределение  $\varphi(x, y) = -\pi(x^2 + y^2)/\lambda f$  ( $\lambda$  — длина волны света,  $f$  — фокусное расстояние,  $2R$  — диаметр линзы,  $x = \rho \cos \theta$ ,  $y = \rho \sin \theta$ ,  $(\theta, \rho)$  — полярные координаты в плоскости киноформа). Пусть при изготовлении линзы один из шаблонов был совмещен не точно: произошел сдвиг на малую величину  $\delta$ . Тогда для фазовой функции ошибки имеем

$$\varepsilon(\rho, \theta) = 2\pi\rho\delta \cos(\theta - \theta_0)/\lambda f. \quad (19)$$

Плоскость киноформа является выходным зрачком. Функция зрачка имеет вид:

I-й случай —

$$A_I(\rho, \theta) = 1 + \frac{4\pi j}{\lambda N} \sin^2\left(\frac{\pi}{N}\right) \frac{\rho\delta \cos(\theta - \theta_0)}{f} - \frac{2\pi}{\lambda N} \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \frac{\rho\delta}{f} |\cos(\theta - \theta_0)|; \quad (20)$$

II-й случай —

$$A_{II}(\rho, \theta) = 1 + \frac{4\pi j}{\lambda N} \sin^2\left(\frac{\pi L}{N}\right) \frac{\rho\delta \cos(\theta - \theta_0)}{f} - \\ - \frac{4\pi}{\lambda N} \sin^2\left(\frac{\pi L}{N}\right) \text{ctg}\left(\frac{\pi}{N}\right) \frac{\rho\delta}{f} |\cos(\theta - \theta_0)|. \quad (21)$$

Мнимая часть выражений (20) и (21) описывает сдвиг изображения в параксимальной фокальной плоскости, ее можно полностью скомпенсировать соответствующим сдвигом точки наблюдения в ту же сторону, что и шаблона; действительная часть отвечает за искажения изображения. Для нормированного числа Штреля  $i$  [3] получаем следующие вы-

ражения в I-м и во II-м случаях соответственно:

$$i_I = 1 - \frac{1}{N^2} \sin^2 \left( \frac{2\pi}{N} \right) \frac{R^2 \delta^2}{f^2 \lambda^2} 2,76; \quad (22)$$

$$i_{II} = 1 - \frac{1}{N^2} \sin^4 \left( \frac{\pi L}{N} \right) \operatorname{ctg}^2 \left( \frac{\pi}{N} \right) \frac{R^2 \delta^2}{f^2 \lambda^2} 11,04. \quad (23)$$

Используя критерий Марешаля [3] ( $i \geq 0,8$ ), находим ограничение на величину  $\delta$ , при этом качество изображения ограничивается дифракцией на выходном зрачке:

I-й случай —

$$\delta_I \leq 0,27N\lambda f / \sin(2\pi/N)R; \quad (24)$$

II-й случай —

$$\delta_{II} \leq 0,135N\lambda f / \sin^2(\pi L/N) \operatorname{ctg}(\pi/N)R.$$

Допустимая величина ошибки совмещения линейно зависит от величины относительного отверстия киноформной линзы. Для  $\lambda = 0,632 \times 10^{-3}$  мм, относительного отверстия  $f/2R = 2$ , количества ступеней рельефа  $N = 4$  допустимая ошибка совмещения составит в I-м случае  $\delta_I = 2,73 \cdot 10^{-3}$  мм, во II-м —

$$\delta_{II} = \begin{cases} 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ мм при } L = 1 \text{ (первый шаблон);} \\ 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ мм при } L = 2 \text{ (второй шаблон).} \end{cases}$$

Таким образом, представлен общий подход к анализу работы киноформных оптических элементов, изготовленных с помощью фотолитографического процесса. Описаны зрачковые функции киноформа при преобладающих искажениях одного из фотошаблонов для двух способов формирования рельефа. Показано, что при произвольных ошибках топологии фотошаблона искажения волнового фронта после киноформа будут меньше, если при каждой фотолитографии травление производится на одинаковую глубину. Найдено ограничение на допустимую величину ошибки совмещения фотошаблонов при изготовлении киноформной линзы. Проведенное рассмотрение позволяет уточнить требования к точности изготовления и совмещения фотошаблонов произвольных киноформов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Koronkevich V. P. e. a. Fabrication of kinoform optical elements.— *Optik*, 1984, Bd 67, N 3, S. 257—266.
2. Спектор Б. И. Об одном способе синтеза фазовой структуры киноформов.— *Автометрия*, 1985, № 6.
3. Clair J. J. Synthèse optique de filtres d'amplitude et de phase dits "kinoform".— *These de doctorat, e'Universite de Paris V1*, 1972.
4. Проектирование оптических систем/Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанга.— М.: Мир, 1983.

Поступила в редакцию 7 мая 1985 г.