

потенциальными возможностями и гибкостью. Это в первую очередь относится к АОИ, в которых можно оперативно управлять характеристиками интерференционной картины [7, 12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий Ю. В. Многолучевые интерферометры отраженного света.— Новосибирск: Наука, 1985.
2. Голдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В. Синтез характеристик многолучевого отражающего интерферометра // Автометрия.— 1975.— № 3.
3. Бельтюгов В. Н., Троицкий Ю. В. Выбор и расчет структуры диэлектрического дифракционного селектора // Квантовая электрон.— 1975.— Т. 2, № 2.
4. Goldina N. D., Zakharov M. I., Troitsky Yu. V. Optical resonator using anisotropic metal film for mode selection // Appl. Opt.— 1971.— V. 11, N 2.— P. 261—264.
5. Bölgler B. A multiple-beam interferometer with transmission-like fringes in reflection // Opt. Commun.— 1971.— V. 4, N 4.— P. 313—315.
6. Rosenberg R., Rubinstein C. B., Herriott D. R. Resonant optical Faraday rotator // Appl. Opt.— 1964.— V. 3, N 9.— P. 1079—1083.
7. А. с. 945641 (СССР). Многолучевой интерферометр для спектральных и поляризационных измерений/М. И. Захаров.— Оpubл. в БИ, 1982, № 27.
8. Захаров М. И., Прилепских В. Д. Характеристики многолучевого отражающего интерферометра с анизотропными элементами // Журн. прикл. спект.— 1985.— Т. 43, № 5.
9. Захаров М. И., Прилепских В. Д. Частотная селекция в лазерах при помощи анизотропного отражающего интерферометра.— Новосибирск, 1984.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6435.
10. Скоков И. В. Оптические интерферометры.— М.: Машиностроение, 1979.
11. Заявка на изобрет. № 3861 405/25. Спектрметр/М. И. Захаров.— Полож. реш. 28.05.86.
12. Захаров М. И., Прилепских В. Д. Управление профилем интерференционных полос в анизотропном многолучевом интерферометре.— Новосибирск, 1984.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6436.

*Поступила в редакцию 21 июля 1986 г.*

УДК 681.7.013.8

**С. Т. БОБРОВ**

*(Ленинград)*

### ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРУЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В настоящее время известно два способа синтеза структуры дифракционных оптических элементов (ДОЭ) со ступенчатым профилем штриха [1]. В обоих способах главным инструментом служит комплект фотошаблонов (ФС), позволяющих создать на поверхности ДОЭ фоторезистивные маски, через окна которых производится травление подложки элемента. Каждая вновь создаваемая маска должна быть при этом согласована с уже имеющейся на подложке структурой, т. е. надо совместить с этой структурой соответствующий ФС.

В первом способе синтеза ступенчатого профиля травление производится всякий раз на одну и ту же глубину, равную глубине одной ступени. В итоге для создания ДОЭ с  $N$  уровнями в профиле штриха требуется  $(N - 1)$  фотошаблон (см. рис. 2 из [1]), причем каждый ФС содержит одно окно в пределах штриха элемента, т. е. пространственная частота всех ФС одинакова, поэтому будем называть такой комплект одночастотным. Во втором способе травление осуществляется на разную глубину, а фотошаблоны имеют различное число окон в пределах штриха ДОЭ, т. е. различную пространственную частоту. В [1] показано, что  $N$ -уровневый ДОЭ можно изготовить с помощью  $L$  ФС, где  $2^{L-1} < N \leq 2^L$ , т. е. требуется меньшее число ФС, чем в первом способе. Наибольший

выигрыш получается, когда  $N = 2^L$ , при этом первый ФШ имеет ту же пространственную частоту, что и в одночастотном случае, а в каждом последующем ФШ частота удваивается, тогда как глубина травления в 2 раза уменьшается (см. рис. 3 из [1]), поэтому такой комплект назывем дихотомическим.

Высокая эффективность ДОЭ со ступенчатым профилем штриха снижается при сдвигах ФШ в процессе изготовления, поэтому важно иметь оценку допустимого рассовмещения. Впервые подобная задача для дифракционных линз (ДЛ) рассмотрена в работе [2], где предложена методика оценки, состоящая в вычислении фактора Штреля  $D$  на основе функции зрачка реальной ДЛ  $H(x, y) = C_1'(x, y)/C_1$ , где  $C_1$  — коэффициент первого (рабочего) порядка дифракции идеального ступенчатого ДОЭ с эффективностью  $I_1 = |C_1|^2 = \sin^2(\pi/N)/(\pi/N)^2$ ;  $C_1'(x, y)$  — коэффициент первого порядка реальной структуры в данной точке. В [2] анализируется влияние сдвига только одного ФШ из комплекта (этого достаточно для двухшаблонных комплектов), тогда как в настоящей статье рассмотрены трехшаблонные комплекты при одновременном наличии двух ошибок совмещения. Сначала, однако, необходимо повторить некоторые из результатов [2], поскольку в них допущены неточности.

Для одночастотного комплекта в случае сдвига одного ФШ в [2] получена функция зрачка

$$H = 1 - j \frac{2}{N} \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \text{sign}(\varepsilon) e^{j\frac{\pi}{N}\text{sign}(\varepsilon)} (e^{-j\varepsilon} - 1), \quad (1)$$

где  $\varepsilon = 2\pi\delta/T$  — фазовая ошибка совмещения ФШ;  $\delta$  — линейный сдвиг ФШ в направлении, перпендикулярном штриху ДОЭ;  $T$  — ширина штриха (период структуры) ДОЭ. Предполагается, что  $\varepsilon < 2\pi/N$ .

Аналогичная формула для дихотомического комплекта в [2] неверна. Приведенное там выражение дает различный результат для первого и второго ФШ при любом числе уровней  $N$ , но при  $N = 4$  весь комплект состоит из двух ФШ и указанная разница не может иметь места. Анализ показывает, что правильное выражение для функции зрачка в этом случае будет следующим:

$$H = 1 - j \frac{2^l}{N} \frac{\sin^2(\pi/2^l)}{\sin(\pi/N)} \text{sign}(\varepsilon) e^{j\frac{\pi}{N}\text{sign}(\varepsilon)} (e^{-j\varepsilon} - 1), \quad (2)$$

где  $l = 1, 2, \dots, L$  — номер ФШ;  $N = 2^L$  — число уровней.

В случае дифракционных линз величина  $\varepsilon$  изменяется в пределах элемента; в частности, для зонной пластинки Френеля, как показано в [2], имеем

$$\varepsilon(\rho, \Theta) = \frac{2\pi\delta}{\lambda f} \rho \cos(\Theta - \Theta_0), \quad (3)$$

где  $\rho, \Theta$  — полярные координаты в плоскости ДЛ;  $\delta$  — радиальный сдвиг центра ФШ;  $\Theta_0$  — полярный угол направления сдвига;  $f$  — фокусное расстояние ДЛ в первом порядке дифракции на рабочей длине волны  $\lambda$ .

Если подставить фазовую ошибку (3) в выражения (1) и (2) и разложить экспоненты в ряд, считая  $\varepsilon \ll 1$ , то в обоих случаях, как показано в [2], получим, что мнимая часть  $H$  означает сдвиг изображения, формируемого ДЛ, и для вычисления фактора Штреля можно ограничиться действительной частью, имеющей вид  $H \approx 1 - A\rho |\cos(\Theta - \Theta_0)|$ , где  $A$  — постоянный коэффициент. В итоге для фактора Штреля находим

$$D \approx \left| \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r \int_0^{2\pi} (1 - A\rho |\cos(\Theta - \Theta_0)|) \rho d\rho d\Theta \right|^2 = \left| 1 - \frac{A}{\pi r^2} \frac{4r^3}{3} \right|^2 \approx 1 - \frac{8A}{3\pi} r, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус ДЛ.

Подставляя в (4) конкретные выражения для  $A$ , получаем окончательно для одночастотного и дихотомического случаев

$$D \approx 1 - \frac{16 \sin(2\pi/N)}{3N} \frac{r\delta}{\lambda f}; \quad D \approx 1 - \frac{16}{3} \frac{2^l \sin^2(\pi/2^l)}{N \operatorname{tg}(\pi/N)} \frac{r\delta}{\lambda f}. \quad (5)$$

Отметим, что формулы (5) существенно отличаются от соответствующих выражений в [2], где интегрирование произведено неверно. Задавая условием  $D \geq 0,8$ , для конкретного примера, использованного в [2] ( $N=4$ ,  $\lambda=632,8$  нм,  $f/2r=2$ ), имеем  $\delta \leq 0,15T_{\min} = 0,37$  мкм в одночастотном и  $\delta \leq 0,075T_{\min} = 0,19$  мкм в дихотомическом случаях, что на порядок жестче, чем в [2]. В приведенных оценках  $T_{\min} = \lambda f/r$  — минимальная ширина штриха на краю зонной пластинки.

Таким образом, влияние сдвига одного ФШ в 2 раза больше в дихотомическом случае, однако для объективного сравнения необходимо учитывать большее число совмещений в одночастотном случае. При  $N=4$  дихотомический комплект состоит из двух ФШ и подвержен только одной ошибке совмещения. Функция зрачка реальной ДЛ имеет вид  $H \approx 1 - |\varepsilon|/2 - j\varepsilon/2$ , что для зонной пластинки дает уже полученную выше оценку  $\delta \leq 0,075T_{\min}$ . Одночастотный комплект состоит из трех ФШ, т. е. возможны две ошибки совмещения. Здесь нельзя дать единой формулы, необходимо рассматривать различные соотношения двух ошибок как по знаку, так и по величине. Анализ показывает, что все возможные сочетания можно свести к трем случаям. Получающиеся при этом профили штриха представлены на рис. 1, а соответствующие выражения для функции зрачка имеют вид

$$\left. \begin{aligned} H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_2| + |\varepsilon_3|}{4} - j \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{4} \quad \text{при } \varepsilon_2 \varepsilon_3 \leq 0; \\ H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_2|}{4} - j \frac{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3}{4} \quad \text{при } \varepsilon_2 \varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_2| \geq |\varepsilon_3|; \\ H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_3|}{4} - j \frac{2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{4} \quad \text{при } \varepsilon_2 \varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_3| > |\varepsilon_2|, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  — фазовые ошибки совмещения второго и третьего ФШ комплекта относительно первого. Все экспоненты в (6) заменены приближенными выражениями. Для наглядности на рис. 2, а представлены кривые равной эффективности реального ДОЭ  $I_1' = I_1 |H(\varepsilon_2, \varepsilon_3)|^2$ , где  $I_1$  — эффективность идеального ДОЭ с  $N=4$  (кривые рассчитаны по точным формулам). Нетрудно видеть, что  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  входят в формулы (6) совершенно одинаковым образом, а на рис. 2, а все кривые симметричны относительно линий  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  и  $\varepsilon_2 = -\varepsilon_3$ , т. е. ошибки совмещения второго и третьего ФШ в одночастотном комплекте равноправны.

При вычислении фактора Штреля на основе (6) необходимо учитывать, что ФШ могут сдвигаться в разных направлениях:  $\varepsilon_2 = A\delta_2 r \cos(\Theta - \Theta_2)$ ,  $\varepsilon_3 = A\delta_3 r \cos(\Theta - \Theta_3)$ . Если  $\Theta_2 = \Theta_3$ , то во всех точках ДЛ  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  имеют одинаковые знаки и постоянное соотношение величин, что приводит к оценке  $\delta \leq 0,15T_{\min}$ , где  $\delta$  — максимальная из ошибок  $\delta_2, \delta_3$ . Если  $\Theta_2 = \Theta_3 + \pi$ , то знаки  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  во всех точках будут противоположными, что дает условие  $\delta_2 + \delta_3 \leq 0,15T_{\min}$ , в 2 раза более жесткое, чем в предыдущем случае. Наконец, если  $\delta_2 = \delta_3 = \delta$  и  $\Theta_2 = \Theta_3 + \pi/2$ , то в разных областях ДЛ осуществляются различные соотношения между  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , при этом мнимая часть функции зрачка уже не определяет единый сдвиг изображения по всей апертуре ДЛ. Однако вклад мнимой части  $H$  в фактор Штреля пропорционален  $\varepsilon^2$  и им можно пренебречь, поэтому, по-прежнему используя действительную часть  $H$ , получаем для указанных условий оценку  $2\delta \leq 0,18 T_{\min}$ , которая почти не отличается от случая  $\Theta_2 = \Theta_3 + \pi$ . Таким образом, при использовании одночастотного комплекта требования к совмещению ФШ снижаются по сравнению с дихотомическим случаем, однако только совпадение направлений смещения двух ФШ дает заметный выигрыш по совмещению (в 2 раза),

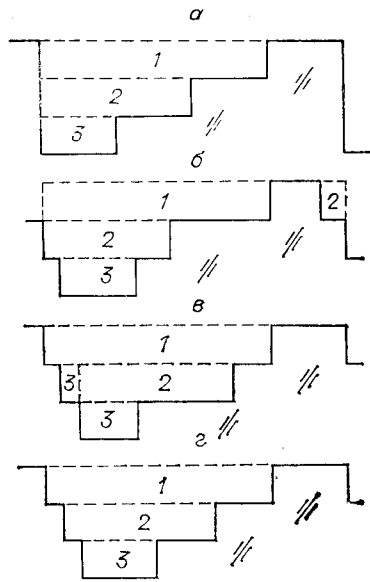


Рис. 1. Профили штриха четырехуровневого ДОЭ ( $N=4$ ), изготавливаемого с помощью одночастотного комплекта ФШ, при наличии ошибок совмещения:  
 $a - \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ ;  $б - \varepsilon_2\varepsilon_3 < 0$ ;  $в - \varepsilon_2\varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_2| > |\varepsilon_3|$ ;  $г - \varepsilon_2\varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_3| > |\varepsilon_2|$ . (Цифрами обозначены области вытравливания материала подложки при 1-м, 2-м и 3-м травлениях)

тогда как в случае перпендикулярности направлений смещения (не говоря уже об их противоположности) требования практически те же, что и для дихотомического комплекта.

Рассмотрим теперь влияние ошибок совмещения для дихотомического комплекта из трех ФШ, т. е. при изготовлении ДОЭ с  $N=8$ . Оказывается, что в этом случае необходимо отдельно анализировать те же три варианта соотношения фазовых ошибок  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , а соответствующие формулы похожи на выражения (6) с той разницей, что влияние сдвигов второго и третьего ФШ неодинаково:

$$\left. \begin{aligned}
 H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_2|}{4 \operatorname{tg}(\pi/8)} - \frac{\sin(\pi/4)}{2} |\varepsilon_3| - j \frac{\varepsilon_2}{2} - j \varepsilon_3 \sin^2(\pi/8) \text{ при } \varepsilon_2\varepsilon_3 \leq 0; \\
 H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_2|}{4} - \frac{\sin(\pi/4)}{2} |\varepsilon_3| - j \frac{\varepsilon_2}{4 \operatorname{tg}(\pi/8)} - j \varepsilon_3 \sin^2(\pi/8) \\
 &\quad \text{при } \varepsilon_2\varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_3| \geq |\varepsilon_2|; \\
 H &\approx 1 - \frac{|\varepsilon_2|}{4 \operatorname{tg}(\pi/8)} - j \frac{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3}{4} \text{ при } \varepsilon_2\varepsilon_3 > 0, |\varepsilon_2| > |\varepsilon_3|.
 \end{aligned} \right\} (7)$$

На рис. 2, б показаны кривые равной эффективности. Как и для одночастотного комплекта, эффективность наиболее резко падает при противоположных направлениях сдвигов второго и третьего ФШ. Для зонной пластинки получаем в этом случае оценку  $\delta_2 + 0,59\delta_3 \leq 0,062T_{\min}$ . Если же направления сдвигов ФШ совпадают, причем  $\delta_2 \geq \delta_3$ , то приходим к условию  $\delta_2 \leq 0,062T_{\min}$ , которое оказывается несколько жестче полученной выше оценки для двухшаблонного дихотомического комплекта. Для  $N=8$  трудно оценить одночастотный вариант изготовления (семь ФШ), однако ясно, что при его использовании выше вероятность значительных ошибок.

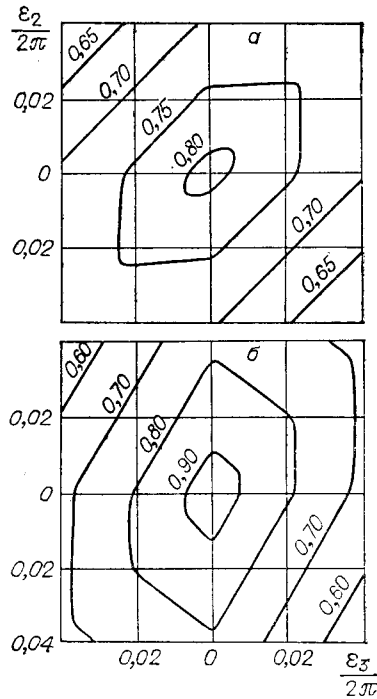


Рис. 2. Кривые равной эффективности реальных ДОЭ, изготавливаемых с помощью трехшаблонных комплектов ФШ:

$a$  — одночастотный комплект ( $N=4, I_1 = 0,811$ );  $б$  — дихотомический комплект ( $N=8, I_1 = 0,949$ )

вый уровень не подвергается травлению.

При изготовлении ДОЭ с помощью дихотомического комплекта между величинами  $\varphi_n$  выполняется соотношение  $\varphi_{n+N/2} = \varphi_n + \Delta_1$ , где  $\Delta_1$  — фазовая ошибка первого травления (с использованием наиболее низкочастотного ФШ), которое следует из того, что  $(n + N/2)$ -й уровень профиля ДОЭ формируется той же последовательностью травлений, что и  $n$ -й, плюс первое травление (см. рис. 3 из [4]). Аналогично можно записать  $\varphi_{n+N/4} = \varphi_n + \Delta_2$  и т. д., что позволяет привести (8) к виду

$$I'_1 = I_1 \prod_{l=1}^L \cos\left(\frac{\Delta_l}{2}\right). \quad (9)$$

Фазовая ошибка  $l$ -го травления в дихотомическом случае равна  $\Delta_l = 2\pi\delta h_l/2^l$ , где  $\delta h_l$  — относительная ошибка глубины травления. Поскольку  $\delta h_l$  слабо зависит от абсолютной глубины травления, т. е. от номера  $l$ , то ясно, что наибольшее влияние на отношение  $I'_1/I_1$  оказывает первое, наиболее глубокое травление. Выражение (9) означает также, что каждое последующее травление способно только ухудшить отношение  $I'_1/I_1$ , хотя эффективность  $I'_1$  при этом, конечно, увеличивается.

При использовании одночастотного комплекта в отличие от дихотомического можно в принципе решать задачу максимизации эффективности ДОЭ при последнем травлении, зная ошибки предыдущих, однако вряд ли это имеет смысл. Если возможно точно выдержать оптимальную глубину последнего травления, то можно выдержать и глубины предыдущих, в результате чего необходимость оптимизации отпадет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. — 1985. — № 6.
2. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Там же.

Поступила в редакцию 22 июля 1986 г.

УДК 519.237 : 535.34

А. А. ЯКОВЛЕВ

(Ленинград)

#### СТАТИСТИЧЕСКИ УСТОЙЧИВОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается задача статистической классификации изображений на основе расчета квадратичной меры  $b_j$ , удаления распознаваемого изображения от центра рассеивания изображений для объектов  $j$ -го класса. Обычно это удаление (расстояние) измеряется в метрике, определяемой