

вектора оптического потока к плоскости, что в итоге приводит к приближению восстановленной формы к шару. Этого можно избежать при точном измерении интенсивности, увеличивая λ (однако это приводит к увеличению числа необходимых итераций) или же выбрав для меры отклонения от гладкости частные производные второго и более высоких порядков.

Из этих результатов видно, что данный алгоритм дает хорошие результаты, если исходные изображения получены с высоким отношением сигнал/шум. Алгоритм работает только с гладкими равномерно окрашенными объектами. Если поверхность имеет изломы, можно применять данный алгоритм, сгладив предварительно исходные изображения гауссовым фильтром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. — М.: Мир, 1989.
2. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. — М.: Радио и связь, 1987.

Поступила в редакцию 30 апреля 1991 г.

УДК 535.4 : 519.28

А. Г. Полещук

(Новосибирск)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ СТРУКТУР С НЕПРЕРЫВНЫМ И МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРОФИЛЕМ ДЛЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

Приводятся результаты исследования нового фотолитографического метода создания высокоэффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), не требующего в отличие от широкоизвестного многоуровневого метода изготовления комплекта фотошаблонов и их совмещения. Показано, что использование техники бинаризации полутоновых изображений позволяет с помощью единственного растрованного фотошаблона и проекционной оптической системы фотолитографической установки, используемой как фильтр высоких пространственных частот, изготавливать ДОЭ с непрерывным фазовым профилем и высокой дифракционной эффективностью. Сравнение растрового и многоуровневого методов показало, что предлагаемый метод предпочтителен при изготовлении ДОЭ с размером зон менее 10 мкм. С использованием алгоритма широтно-импульсной модуляции изготовлены экспериментальные образцы ДОЭ — корректоры аберраций и матрицы киноформных линз с числовой апертурой $NA = 0,1$. Дифракционная эффективность этих элементов, изготовленных на стандартном фотолитографическом оборудовании, составила свыше 80 %.

Введение. Дифракционные оптические элементы являются одними из важнейших компонентов оптических систем, таких, как лазерные считывающие головки, датчики, принтеры, соединители ВОЛС и т. д. Однако наиболее широкое применение их ожидается в области межсоединений СБИС и оптических вычислителей [1, 2]. Интерес к ДОЭ обусловлен тем, что они изготавливаются методами фотолитографии на тонких подложках в одном технологическом цикле и на том же оборудовании, что и СБИС. Этими методами достаточно просто изготовить ДОЭ с бинарным фазовым профилем. Дифракционная эффективность (ДЭ) таких элементов ограничена 40 %, а применение за редким исключением — научными исследованиями. Используя комплект из 3—4 фотошаблонов, можно изготовить многоуровневые ($M = 8—16$, M — количество уровней) ДОЭ с ДЭ более 90 % и хорошим отношением сигнал/шум (ОСШ) [3, 4]. По своим параметрам эти ДОЭ вполне могут конкурировать с элементами классической оптики.

Однако возможности традиционной фотолитографической технологии ограничены при изготовлении ДОЭ с малым периодом зон — T . Это обусловлено тем, что размер элементарной ступеньки составляет $T/M = 0,5—1$ мкм

(дифракционная линза с числовой апертурой $NA = 0,1-0,2$ имеет $T = 4-8$ мкм). При таких размерах ступенек точность совмещения фотошаблонов (доли микрона в лучших фотолитографических установках [5]) начинает играть ведущую роль, приводя к падению ДЭ и возрастанию шумов.

Изготовить ДОЭ с высокой ДЭ можно и с использованием одного полутонового фотошаблона [6]. При этом отпадает необходимость в совмещении фотошаблонов, а минимальные размеры фазового профиля ДОЭ определяются только процессом фотолитографии.

Использование техники бинаризации полутоновых изображений позволяет еще более упростить процедуру изготовления ДОЭ за счет применения, вместо полутонового фотошаблона, обычного с двухградационным пропусканием.

ШИМ) для бинаризации функции пропускания фотошаблона ДОЭ. Исследованы основные характеристики многоуровневой фотолитографической технологии изготовления ДОЭ. Проведено сравнение характеристик исследованных технологий.

Синтез фазового рельефа ДОЭ. Задача изготовления чисто фазового ДОЭ (киноформа) с комплексной функцией пропускания (для простоты рассматривается одномерный случай)

$$T(x) = \exp[-j\varphi(x)], \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ — изменяющаяся по модулю 2π фазовая функция, сводится к формированию в оптической среде подложки рельефа $h(x)$, который удовлетворял бы соотношению

$$h(x) = \varphi(x)/k(n-1), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны света, n — коэффициент преломления подложки ДОЭ.

Из теории фотолитографии известно [5], что при экспонировании позитивных резистов излучением интенсивностью $I(x)$ толщина оставшегося после проявления слоя резиста равна

$$h_{ph}(x) = D_0 - cI(x), \quad (3)$$

где D_0 — толщина исходной пленки; c — коэффициент, учитывающий продолжительность экспозиции, проявления и другие параметры резиста.

Если создать распределение интенсивности $I(x)$, пропорциональное фазовой функции $\varphi(x)$, то в слое фоторезиста сформируется рельеф ДОЭ, удовлетворяющий соотношению (2). Однако на практике это не осуществимо по двум причинам. Во-первых, все виды фотопечати ухудшают качество изображения из-за явлений дифракции, интерференции, рассеяния и т. д., во-вторых, технически сложно изготовить полутоновой фотошаблон с функцией пропускания $U(x) \sim \varphi(x)$.

Второе, технологическое, ограничение можно обойти следующим образом. В [7] было предложено, используя один из известных алгоритмов бинаризации изображений [8], заменить полутоновой фотошаблон на растринированный с функцией пропускания

$$B(x) = V[\varphi(x)], \quad (4)$$

где V — оператор, указывающий правила преобразования непрерывной функции $\varphi(x)$ с ограниченным спектром в бинарную $B(x)$. Оптическая проекционная система осуществляет фильтрацию низких пространственных частот функции $B(x)$.

На рис. 1, а показана схема проекционной фотолитографической установки, с помощью которой может быть реализован этот метод. Растриваемый фотошаблон 2 освещается некогерентным световым потоком 1 с интенсивностью I_0 . Проекционная система 3 осуществляет фильтрацию пространственных частот фотошаблона и формирует в плоскости 5 фоторезиста распределение интенсивности 4, близкое к функции $\varphi(x)$. Соотношение частоты среза F_c оптической передаточной функции (ОПФ) объектива 3 и частоты дискретизации F_d функции $B(x)$ пропускания фотошаблона 2 и его частотного спектра f_x показано на рис. 1, б. Согласно теореме отсчетов, должно выполняться неравенство $f_x < F_c < F_d$.

Выбор метода бинаризации. Бинаризация изображения — это процесс преобразования пространственного полутонового распределения интенсивности $I(x)$ в двухуровневое (бинарное) изображение $B(x)$ [9]. Характеристики восстановленного изображения зависят от вида процедуры кодирования, так как на практике форма отсчетов отличается от δ -функций и имеет вид прозрачных участков (полосок для одномерного и квадратов или кругов для двумерного случаев) конечной ширины на непрозрачном фоне. Для кодирования полутонового изображения наиболее часто используют частотно-импульсную и широтно-импульсную модуляции пропускания.

Выбор алгоритма, в частности, определяется технологическими особенностями метода изготовления растриваемого фотошаблона ДОЭ.

В настоящее время для изготовления фотошаблонов наиболее широко используются генераторы изображения сканирующего типа [5, 10], когда протяженные участки топологии фотошаблона шириной L записываются за $n = (L - a)/(1 - s)a$ сканирующих проходов луча (здесь a — ширина луча, s — коэффициент перекрытия), как показано на рис. 2, а, б. Если функция пропускания $U(x) = 0,5$, то ширина импульсов ШИМ (а) и ЧИМ (б) равна соответственно $T_d/2$ и a , период следования — T_d и $2a$. Поэтому отношение числа проходов, требуемых для записи участка фотошаблона с пропусканием 0,5 методами ШИМ и ЧИМ, равно $(T_d - 2a)/T_d(1 - s)$. При $a = 1$ мкм, $T_d = 6$ мкм, $s = 0,7$ это отношение равно 2, из чего следует, что при прочих равных условиях время, необходимое для записи растриваемого фотошаблона методом ЧИМ, в 2 раза меньше, чем методом ШИМ.

Формирование фазового профиля ДОЭ. Процесс изготовления ДОЭ с непрерывным фазовым профилем включает следующие основные этапы:

- расчет комплексной функции пропускания ДОЭ;
- изготовление фотошаблона;

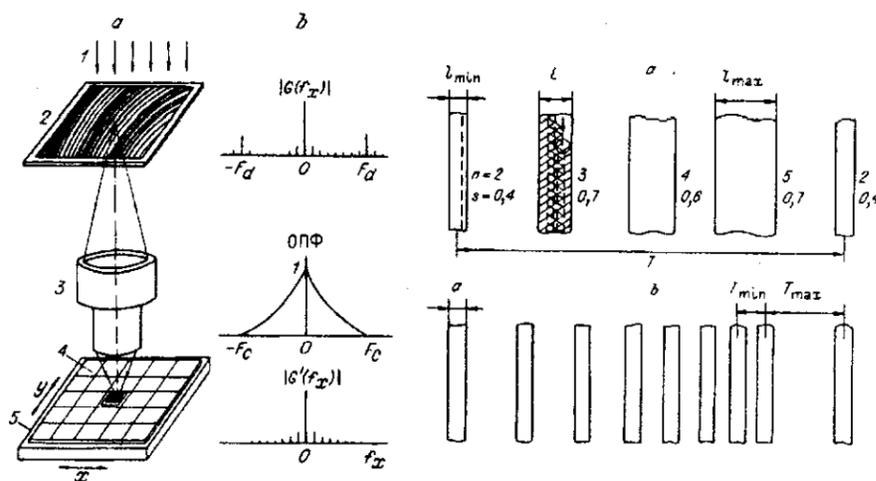


Рис. 1

Рис. 2

— экспонирование и проявление слоя фоторезиста и при необходимости переноса рельефа в материал подложки его сухое травление.

Исследовались два метода получения непрерывного фазового профиля ДОО — с использованием алгоритмов ЧИМ и ШИМ.

Бинаризация по методу ЧИМ. Пусть полутоновое изображение описывается функцией $U(x)$, изменяющейся в пределах 0—1. Это изображение преобразуется в растринрованное изображение $B(x)$, которое принимает только два значения — 0 и 1. При использовании бинаризации по методу ЧИМ пространственная частота следования импульсов (в дальнейшем полосок, имеющих постоянную ширину a) пропорциональна значению функции $U(x)$:

$$F \sim U(x). \quad (5)$$

Частота следования обычно изменяется в пределах $F_{\max} - F_{\min}$, поэтому выражение (5) можно записать в виде

$$F = F_m \{0,5 + P_m [U(x) - 0,5]\}, \quad (6)$$

где $F_m = 2F_{\min}/(1 + P_m)$, $P_m = (F_{\max} - F_{\min})/(F_{\max} + F_{\min})$ — коэффициент глубины модуляции.

Если исходное изображение является периодической функцией с периодом T :

$$U(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U(x - nT), \quad (7)$$

то растринрованное изображение можно представить в виде суммы периодических последовательностей полосок шириной a , сдвинутых друг относительно друга на величину

$$T_i = T_m \{0,5 + P_m [U_i(x) - 0,5]\}, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, m$, m — число полосок растра на периоде исходной функции T ; $T_m = 1/F_m$, $U_i(x)$ — значение функции (7) в точке $x = \sum_{j=1}^i T_j$,

причем $\sum_{i=1}^m T_i = T$.

Из выражений (7) и (8) следует, что с учетом погрешности нанесения растра функцию пропускания фотошаблона можно записать в виде

$$B(x) = a(x) \otimes \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^m \delta[x - (nT - T_i - R_i)], \quad (9)$$

где $a(x)$ — функция пропускания элементарной полоски; R_i — случайная ошибка в положении центра i -й полосы растра.

Если $a(x) = \text{rect}(x/a)$, то пространственный спектр функции (9) при освещении ее некогерентным световым потоком с интенсивностью I_0 имеет вид

$$\begin{aligned} G(f_x) &= FT[B(x)I_0] = \\ &= \text{sinc}(f_x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[-j2\pi nTf_x] \sum_{i=1}^m \exp[-j2\pi(T_i + R_i)f_x]. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь FT означает преобразование Фурье; $\text{sinc}(f_x) = \sin(\pi f_x)/\pi f_x$.

На рис. 3, a, b показаны соответственно функция пропускания (9) растринрованного фотошаблона для $U(x) = (1/T)x$ и модуль ее пространственного спектра (10). Видно, что в области нижних частот спектр $|G(f_x)|$ соответствует спектру пилообразной функции, а в области средних частот, начиная с F_{\min} , содержит комбинационные составляющие F и F_d .

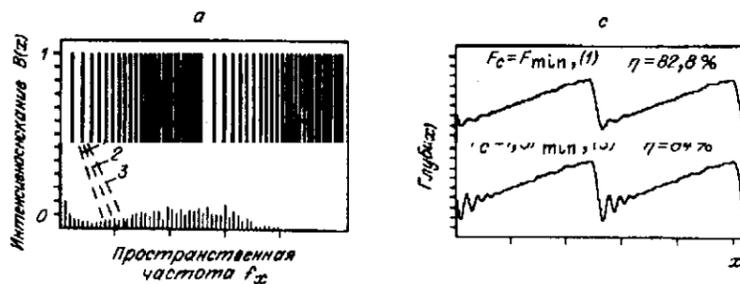


Рис. 3

Если для фильтрации этих спектральных компонент используется безабберационная проекционная система с увеличением $\mu = 1$ (см. рис. 1, а) и с ОПФ [11]:

$$H(f_x) = \begin{cases} 1 - f_x/F_c & \text{для } |f_x| < F_c; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (11)$$

то распределение интенсивности светового потока в плоскости фоторезиста будет

$$I_{ph}(x) = FT[G(f_x)H(f_x)]. \quad (12)$$

Из выражения (11) следует, что распределение интенсивности (12) и пропорциональная ему глубина рельефа $h(x)$ (2) зависят от положения частоты среза ОПФ F_c (штриховая линия на рис. 3, б). На рис. 3, с показана форма рельефа в фоторезисте, рассчитанная по формулам (8)–(12) для трех значений F_c/F_{min} (1–3) при постоянной пространственной частоте $F = 1/T$ пилы. В соответствии с теорией формирования изображения с ростом F_c форма рельефа $h_{ph}(x)$ приближается к пилообразной. Бинаризация исходной функции $U(x)$ приводит к появлению искажений, которые особенно хорошо видны при $F_c > F_{min}$.

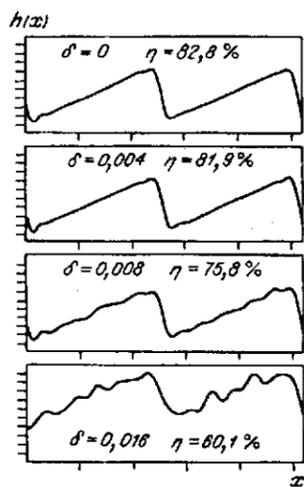


Рис. 4

Показанные на рис. 3, с фазовые профили ДОЭ рассчитаны без учета влияния погрешностей изготовления раstra фотошаблона (в выражении (9) $R_i = 0$). Используемые для изготовления фотошаблонов электронно-лучевые и лазерные генераторы изображений [5, 10] имеют среднеквадратичную погрешность выполнения топологии $\sigma = 0,05-0,5$ мкм. Влияние этих погрешностей необходимо учитывать при выборе частоты дискретизации и минимального периода ДОЭ. На рис. 4 показаны примеры профилей рельефа, рассчитанные (формулы (8)–(12)) для различных значений относительной погрешности $\delta = \sigma/T_{min}$ изготовления фотошаблонов. Видно, что при $\delta > 0,005$ форма рельефа значительно искажается.

Бинаризация по методу ШИМ. В этом методе бинаризации пространственная частота следования полосок раstra постоянна, а их ширина

l (в двумерном случае — площадь) пропорциональна значению кодируемой функции (7) в точках i дискретизации:

$$l_i = T_d \{ 0,5 + P_m [U(x - iT_d) - 0,5] \}. \quad (13)$$

Здесь $T_d = 1/F_d$ — период дискретизации; $i = 1, 2, 3; m$ — номер полосы;

$$D(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^m a_i(x) \otimes \delta(x - iT_d - nT), \quad (14)$$

где $a_i(x)$ — функция пропускания i -й элементарной полосы, имеющей ширину $l_i + R_i$; R_i — случайная ошибка ширины i -й полосы растра фотошаблона, возникающая в процессе его изготовления.

На рис. 5, *a, b* показаны соответственно функция пропускания (14) растрованного фотошаблона для $U(x) = (1/T)x$ и модуль ее пространственного спектра, который находится аналогично (10). В области нижних частот спектр $|G(f_x)|$ соответствует спектру исходной пилообразной функции, а на частоте F_d имеет значительную составляющую, обусловленную дискретизацией. Сравнивая спектры ЧИМ и ШИМ, видно, что частоту F_c среза ОПФ (штриховые линии на рис. 5, *b*) нельзя выбирать значительно выше частоты дискретизации F_d . На рис. 5, *c* показана форма рельефа в фоторезисте, рассчитанная для двух значений F_c/F_d (1, 2) при постоянной пространственной частоте F исходной полутоновой функции. Видно, что даже при незначительном увеличении частоты F_c резко возрастают периодические искажения рельефа ДОЭ.

Изменения формы рельефа, вызванные ошибками изготовления растрованного фотошаблона, имеют тот же характер (см. рис. 4), что и при использовании бинаризации по методу ЧИМ. Искажения становятся значительными при $\delta > 0,03$.

Характеристики ДОЭ, изготовленных фоторастровым методом. Основные характеристики ДОЭ — это дифракционная эффективность и ОСШ в сфокусированном изображении.

Пусть функция пропускания изготовленной фазовой пластины $T_{ph}(x) = \exp[-jk(n-1)h_{ph}(x)]$ и распределение интенсивности $I(u)$ в плоскости фокусировки связаны через преобразование Фурье

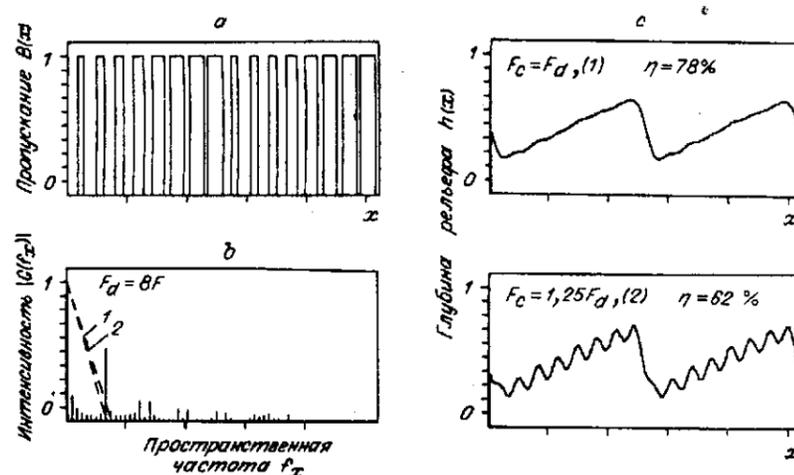


Рис. 5

$$I(u) = |G(u)|^2 = |FT[T_{ph}(x)]|^2. \quad (15)$$

Тогда величина

$$\eta = \int_s I(u) du / \int I(u) du, \quad (16)$$

где s — область задания полезного изображения $S(u)$, определяет долю энергии светового пучка, формирующего полезное изображение, т. е. дифракционную эффективность.

Величина

$$P = \frac{\int_s [S(u)]^2 du}{\int_s [S(u) + R|G(u)|]^2 du}, \quad (17)$$

где $R = \int |S(u)| du / \int |G(u)| du$ — масштабный коэффициент, определяет ОСШ.

Исходная фазовая функция помещалась на дискретное поле, состоящее из 2048 точек. Период T пилообразной функции был выбран равным 512 точкам. Для вычисления распределения светового потока в плоскости резиста (12) и пространственно-частотного спектра готового элемента (15) использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Оценивалось качество фокусировки излучения в -1 -й порядок дифракции. Областью s задания полезного изображения $S(u)$ выбран промежуток между 0 -м и -2 -м порядками дифракции. Это очень жесткий критерий, так как все составляющие оптического сигнала (15) в этой области считаются шумами.

Изготовление ДОЭ методом ЧИМ. Моделировалось изготовление ДОЭ с пилообразным фазовым профилем с помощью изображенной на рис. 1 установки.

Анализ показал, что оптимальная глубина рельефа, при которой достигается максимум ДЭ, зависит от числа $m = \text{int}(F_c/F)$ гармоник и изменяется от $0,6\lambda/(n-1)$ при $m = 1$ до $\lambda/(n-1)$ при $m \rightarrow \infty$. Этот результат имеет важное значение для выбора правильной экспозиции при изготовлении ДОЭ, размеры зон которых меняются в значительных пределах (киноформные линзы и корректоры аберраций).

В табл. 1 приведена зависимость дифракционной эффективности η и оптимальной глубины h_{opt} рельефа сформированной в фоторезисте решетки от числа m прошедших через объектив Z (см. рис. 1, а) пространственных гармоник.

Расчет производился при следующих параметрах бинаризации: $F_c = F_{min}$, $P_m = 0,6$, $B(x) = 0,5$. Глубина рельефа h_{opt} нормирована к длине волны λ светового потока, освещающего ДОЭ. Из табл. 1 следует, что крайние зоны киноформных линз должны иметь глубину меньше, чем центральные. Для линзы с

m	$\eta, \%$	h_{opt}
1	33	0,6
2	51	0,75
3	59	0,8
7	79	0,92
10	85	0,95
15	89	0,98

$NA = 0,2$ и рабочей длиной волны $\lambda = 0,8$ мкм размер крайних зон составляет $T = 4$ мкм. Если проекционная система фотолитографической установки имеет предел разрешения $F_c = 1600 \text{ мм}^{-1}$, то $m = 6$ и из табл. 1 следует, что ДЭ крайних зон линзы будет 74 % при глубине рельефа $0,9\lambda$.

Существенное влияние на качество формируемого в полезном дифракционном порядке изображения оказывает выбор параметров бинаризации и системы изготовления. На рис. 6 приведены результаты численных расчетов зависимости ДЭ для ДОЭ с пилообразным профилем (см. рис. 3) от отношения F_c/F_{min} при

нескольких значениях F/F_{\min} . Дифракционная эффективность растет с увеличением частоты среза F_c при неизменной частоте F_{\min} . С другой стороны, на выход проекционной системы начинают проникать комбинационные составляющие частоты бинаризации, приводящие к появлению рассеянного света. Эти составляющие искажают рельеф (см. рис. 3) и с дальнейшим ростом F_c приводят к падению ДЭ и увеличению шумов. Максимумы ДЭ не совпадают, поэтому при изготовлении необходимо учитывать назначение ДОЭ и соответствующим образом выбрать F_c и F_{\min} .

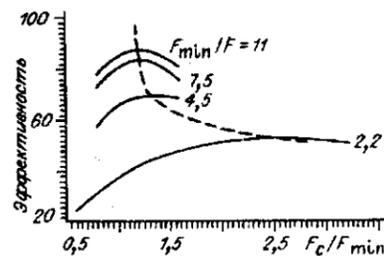


Рис. 6

Все этапы изготовления ДОЭ вносят ошибки, которые существенно влияют на его характеристики. Основные источники и виды ошибок приведены в табл. 2.

На рис. 7, а показана зависимость ДЭ решетки с пилообразным профилем от числа m гармоник, формирующих изображение $I_{ph}(x)$ в плоскости фоторезиста, при различных значениях относительной среднеквадратичной ошибки $\delta = \sigma/T$ положения линий раstra. Кривая для $\delta = 0$ соответствует данным, приведенным в табл. 1. С ростом ошибок ДЭ резко падает. Если считать приемлемым падение ДЭ на 5% от идеального случая, то относительная допустимая ошибка изготовления раstra лежит в пределах $\delta < 0,004$. При размере зон ДОЭ $T = 3-5$ мкм $\sigma < 0,01-0,02$ мкм. Типичные ошибки при изготовлении фотошаблонов [5] в зависимости от оборудования лежат в пределах $0,1-0,5$ мкм, т. е. в 5-10 раз больше допустимого. Поэтому фотошаблоны необходимо изготавливать в увеличенном масштабе 1 : 5 или 1 : 10, а затем уменьшать до нужных размеров. Основное преимущество этого метода заключается в уменьшении влияния неточностей изготовления фотошаблона. Минимальные размеры зон ДОЭ (масштаб 1 : 10) составляют $T = 30-80$ мкм, а относительные погрешности изготовления сводятся до допустимой величины.

Зависимость ДЭ от другого источника погрешностей — отклонения величины экспозиции (и глубины рельефа (3)) от оптимальной — показана на рис. 7, б, откуда видно, что следует достаточно точно (5%) подбирать необходимую величину экспозиции.

Изготовление ДОЭ методом ШИМ. В табл. 3 приведена зависимость дифракционной эффективности η и оптимальной глубины h_{opt} рельефа решетки от числа m прошедших объектив фотолитографической установки пространственных гармоник. Расчеты производились при тех же параметрах бинаризации, что и для ЧИМ.

Таблица 2

Операция	Источник ошибок	Вид ошибок
Изготовление растрованного фотошаблона (генератор изображения)	Ограниченная точность позиционирования луча	Случайные ошибки во взаимном положении линий раstra (или ширины, при бинаризации методом ШИМ)
	Изменения размеров луча Неравномерность слоя фоторезиста	
Экспонирование слоя фоторезиста (фотолитографическая установка)	Ошибка в фокусировке проекционного объектива	Искажение формы ОПФ
	Неправильный выбор экспозиции	Отклонение от заданной глубины и формы рельефа
	Нелинейность фоторезиста	

Таблица 3

m	$\eta, \%$	h_{opt}
1	33	0,65
3	58,5	0,75
7	75,7	0,85
15	85	0,9
31	92	0,95

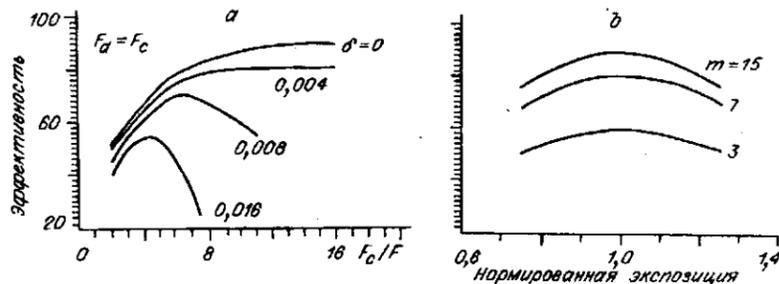


Рис. 7

Сравнивая значения, приведенные в табл. 1 и 3, видно, что величина дифракционной эффективности элементов, изготовленных обоими методами, примерно одинакова. Результаты исследования характеристик ДОЭ, изготовленных фоторастровым методом с использованием бинаризации по методу ШИМ, изложены в [8].

На рис. 8 приведены результаты численных расчетов дифракционной эффективности, усредненной по нескольким реализациям функций $u(x)$, в зависимости от величины относительной погрешности δ . Видно, что при увеличении погрешности изготовления растра дифракционная эффективность падает и при больших значениях δ не зависит от соотношения F_c/F . Причем чем больше это соотношение, тем значительнее падение дифракционной эффективности.

Многоуровневая технология. Мы показали, что фоторастровый метод позволяет создавать высокоэффективные ДОЭ с использованием одного растрованного шаблона. Такой же фазовый рельеф может быть получен и с помощью традиционной многоуровневой фотолитографической технологии. Поэтому представляет интерес сравнить оба метода в реальных условиях и дать рекомендации по их применению.

Формирование рельефа. Метод фотолитографии позволяет создавать хорошо контролируемый рельеф только с прямоугольной формой. Поэтому для получения рельефа, например, с пилообразной формой необходима его аппроксимация ступенчатой функцией с достаточной степенью точности.

Фотолитографический многоуровневый метод изготовления ДОЭ включает в себя подготовку комплекта фотошаблонов, а затем последовательный перевод их топологии в рельеф подложки путем химического, ионного, плазменного травления или напыления. Известны две разновидности этого метода. Если на каждом шаге подложка травится на одинаковую глубину (вариант I), равную $\lambda/(n-1)M$, то требуется $m = M - 1$ шаблонов с одинаковым периодом зон T_0 . Если глубина травления (вариант II) зависит от порядкового номера i фотошаблона $h_i = \lambda 2^{i-1}/(n-1)M$, а период зон изменяется по закону $T_i = T_0 2^i/M$, то требуемое число шаблонов для достижения заданного M уменьшается: $m = \log M$.

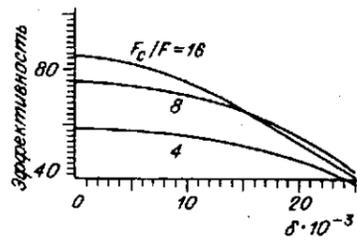


Рис. 8

Дифракционная эффективность изготовленных этими методами ДОЭ исследовалась в ряде работ. Она быстро растет с увеличением числа фотошаблонов и достигает 95 % при $m = 3$ ($M = 8$), что считается вполне приемлемым для практики. Фоторастровый метод позволяет достичь такой же эффективности только при числе гармоник (см. табл. 1 и 3) порядка 20—30. Это обусловлено тем, что в многоуровневом методе пилообразный профиль

аппроксимируется набором ступенчатых функций, в фоторастровом — синусоидальных (которые сходятся к аппроксимирующей функции более медленно). Однако если сравнить эти два метода, то видно, что многоуровневый включает значительно больше технологических шагов (циклы: нанесение резиста, совмещение фотошаблона, экспонирование и проявление резиста, а затем травление подложки на глубину h_i), каждый из которых вносит свои искажения, приводящие к ухудшению характеристик ДОЭ.

При изготовлении ДОЭ функцию, описывающую глубину рельефа, можно представить в виде

$$h(x) = D_0 - \sum_{i=1}^N h_i(x - \sigma_x, \sigma_i, \sigma_h, d_k). \quad (18)$$

Функция $h_i(x)$ соответствует изменению глубины рельефа подложки ДОЭ после обработки ее с помощью i -го фотошаблона (рис. 9). На этом рисунке 1 — идеальная и 2 — реальная формы рельефа в подложке после травления. Параметры $\sigma_x, \sigma_i, \sigma_h, d_k$ характеризуют соответственно ошибки совмещения, погрешности выполнения границ фотошаблона, глубины и клина травления. Так как ошибки, вносимые каждым фотолитографическим циклом, независимы друг от друга, то погрешности σ_x, σ_i и σ_h описываются нормальным законом распределения вероятностей, а величина клина травления d_k одинакова для всего процесса. Мы полагали, что среднеквадратичные значения ошибок изготовления, входящих в (20), одинаковы для всех N фотолитографических циклов, хотя их вклад в общее изменение ДЭ, как было показано в [12], может быть различным.

На рис. 10, a, b показаны примеры формирования рельефа обоими вариантами многоуровневого метода при наличии ошибок изготовления. Период пилообразной функции выбирался равным $T_0 = 512$ точкам с шагом между ними $0,01$ мкм, погрешности изготовления (среднеквадратичные значения) $\sigma_x = 4, \sigma_i = 4, \sigma_h = 0,05h_i$, клин травления $d_k = 2$. Сравнивая профили (a) и (b), легко видеть, что первый вариант формирования рельефа предпочтительней, поскольку при одинаковых погрешностях изготовления искажения меньше. То же самое можно сказать о ДЭ и отношении сигнал/шум. Эти количественные характеристики ДОЭ определялись численно по формулам (15) — (17) путем усреднения по 20 реализациям функции (18). В приведенном на рис. 10 примере ДЭ соответственно $\eta = 86\%$ (a) и $\eta = 72\%$ (b). Однако для второго варианта (b), несмотря на его недостаточно высокие характеристики, необходимо существенно меньшее количество шаблонов и соответственно технологических циклов, что и определило его привлекательность для практики.

Характеристики ДОЭ. Рассмотрим по отдельности влияние технологических ошибок на характеристики ДОЭ, изготовленных

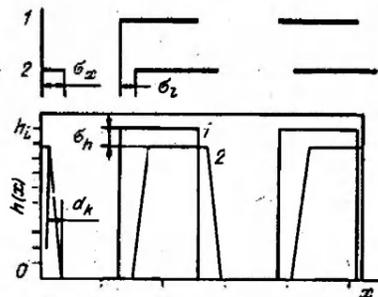


Рис. 9

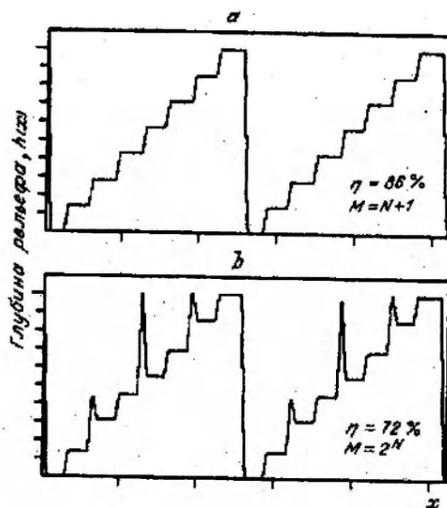


Рис. 10

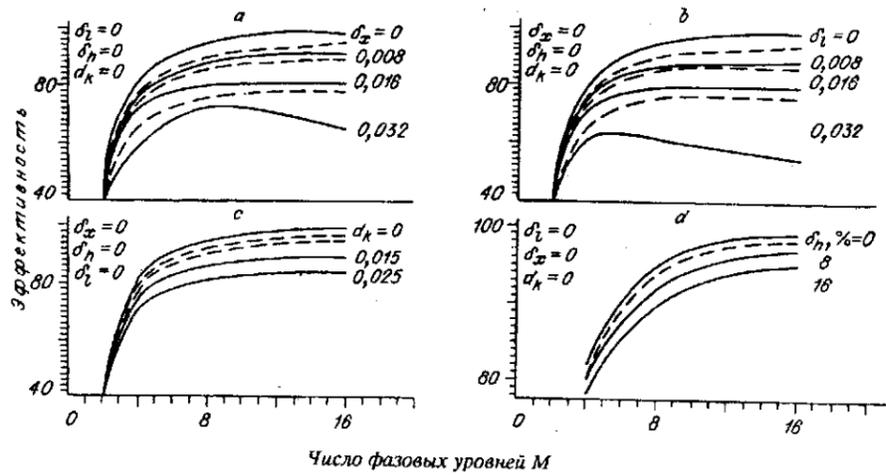


Рис. 11

обоими вариантами. Для удобства будем пользоваться нормированными к периоду T пилообразной функции безразмерными параметрами: $\delta_x = \sigma_x/T$, $\delta_l = \sigma_l/T$, $\delta_h = (\sigma_h/h_i)100\%$, $d_k = d_k/T$.

На рис. 11, *a—d* представлены результаты расчетов ДЭ в зависимости от числа M уровней квантования рельефа при различных значениях этих параметров. Видно, что второй вариант многоуровневой технологии (штриховые кривые) чувствительней ко всем видам случайных технологических ошибок. Хотя влияние ошибок совмещения (*a*) и изготовления фотошаблона (*b*) приблизительно одинаково, следует учитывать, что обычно фотошаблоны изготавливаются в увеличенном масштабе (10 : 1), а затем уменьшаются до необходимых размеров. При этом ошибки изготовления пропорционально уменьшаются и становятся незначительными.

Клин травления зависит от технологии изготовления ДОЭ. Он равен высоте h_i ступеньки (0,2 мкм для $m = 8$) при жидкостном изотропном травлении и приблизительно на порядок меньше — при ионно-лучевом [5]. Однако даже незначительная величина клина приводит к падению ДЭ (*c*). Это можно объяснить сглаживанием ступенек аппроксимирующей функцией. Влияние клина травления аналогично фильтрующему действию ОПФ проекционного объектива при изготовлении ДОЭ фоторастровым методом. Незначительное влияние на падение ДЭ оказывают случайные погрешности глубины травления ступенек. Из рис. 11, *d* следует, что вполне допустимыми являются погрешности порядка 3—5 %, которые достаточно легко выполняются на практике.

Результаты расчетов ОСШ как функции от основных величин ошибок изготовления (влияние погрешностей глубины травления ступенек на ОСШ

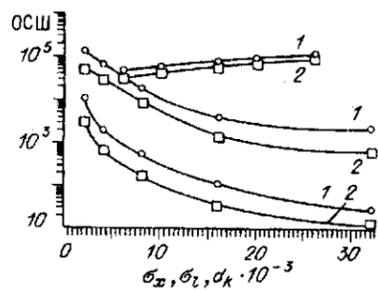


Рис. 12

оказалось незначительным, $OSШ > 10^6$) приведены на рис. 12. Из кривых следует, что наиболее сильное влияние на характеристики ДОЭ оказывают погрешности изготовления шаблонов (нижние кривые). Это можно объяснить тем, что границы всех зон фотошаблонов и соответственно ступенек сформированного рельефа искажаются по случайному закону. Происходит интенсивное рассеяние светового потока, вызывающее падение ДЭ и ОСШ. Погрешности совмещения приводят к сдвигу одновременно всех

границ зон фотошаблона и соответственно ступенек сформированного рельефа. При этом искажения рельефа имеют периодическую структуру (период T для первого (1) и $T/2$ для второго (2) вариантов многоуровневого метода) и рассеянный световой поток концентрируется в более узкой области.

Зависимость ОСШ от величины клина травления имеет обратный характер, т. е. с ростом клина травления улучшается ОСШ (верхние кривые). Такую зависимость можно объяснить сглаживанием ступенек, которыми аппроксимируется пилообразный рельеф ДОЭ.

Экспериментальное исследование. Целью экспериментального исследования было подтверждение возможности получения фоторастровым методом микрорельефа ДОЭ с заданной формой и требуемыми характеристиками.

Дифракционный элемент. В качестве объекта исследования нами были выбраны: осесимметричный дифракционный корректор aberrаций, аналогичный описанному в [13] и изготовленный с помощью многоуровневой технологии, и киноформная линза с числовой апертурой $NA = 0,1$. Дифракционный корректор являлся составной частью двухкомпонентного гибридного (рефракционная линза + дифракционный корректор) объектива ($NA = 0,55$), предназначенного для фокусировки излучения полупроводникового лазера в оптических устройствах записи-считывания информации. Фазовые функции центральной самой большой зоны корректора и линзы аппроксимировались квадратичной функцией, а остальных — линейной.

Растрированный фотошаблон. Для дискретизации полутоновой функции нами был выбран алгоритм ШИМ. Растрированный фотошаблон изготавливался в увеличенном масштабе (1 : 10) на круговом лазерном генераторе изображений (КЛГИ) по термехимической технологии [10] на стеклянной подложке, покрытой пленкой хрома. Уменьшение (10 : 1) изображения фотошаблона и его мультиплицирование (7×7) осуществлялись на стандартной установке проекционного экспонирования UER (объектив $NA = 0,35$). Минимальная ширина кольцевых зон растра фотошаблона определялась пространственным разрешением КЛГИ и технологии записи (около 1200 мм^{-1}) и была выбрана равной $l_{\text{min}} = 1,2 \text{ мкм}$. Период растривания $T_d = 6 \text{ мкм}$, глубина модуляции $P_m = 0,6$.

Микрорельеф. Микрорельеф ДОЭ формировался в слое фоторезиста ФП-051 толщиной около 2 мкм, а затем ионным травлением переносился в материал подложки. Глубина рельефа в фоторезисте определялась величиной экспозиции. Для получения необходимой глубины рельефа экспозиция в процессе мультипликации изменялась в небольших пределах при переходе от одного элемента к другому. На рис. 13 показаны профилограммы (профилограф Taylstep) центральной части (а) дифракционного корректора и его крайних зон (b), имеющих минимальные размеры порядка 7 мкм. Видно, что форма зон близка к заданной — пилообразной. На рис. 14 приведена микрофотография скола подложки с киноформной линзой, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Характеристики. Дифракционная эффективность изготовленных линз находилась в пределах 60—80 % в зависимости от времени экспозиции слоя фоторезиста. Центральные зоны ДОЭ, имеющие значительные размеры

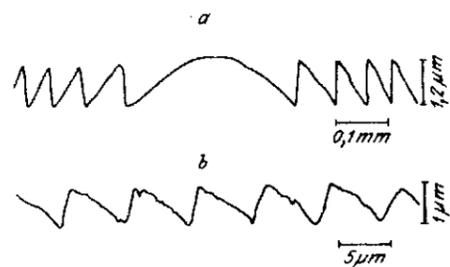


Рис. 13

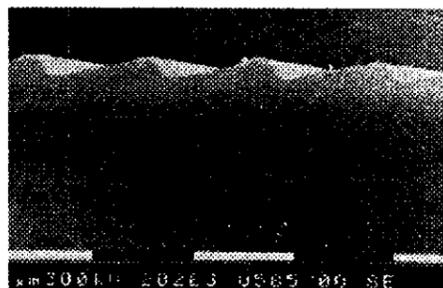


Рис. 14

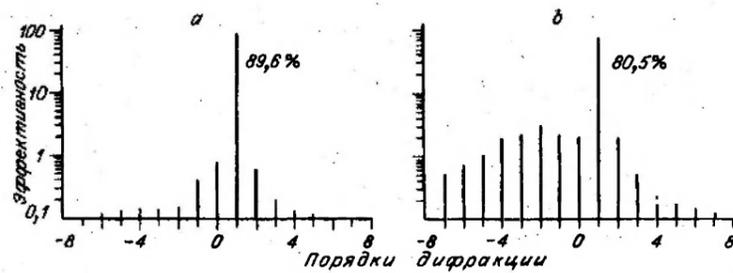


Рис. 15

(0,1—0,3 мм, см. рис. 13, *a*), имели и более высокую эффективность по сравнению с крайними зонами (см. рис. 13, *b*). На рис. 15, *a*, *b* показано нормированное распределение светового потока по дифракционным порядкам в центральной части (*a*) и на периферии (*b*) дифракционного элемента. Дифракционная эффективность крайних зон изготовленных киноформных линз, равная 81 %, близка к теоретическому пределу для $F_c/F = 16$ (см. табл. 2) и не могла быть увеличена из-за погрешностей изготовления границ бинарного раstra, которые составляли приблизительно 0,15 мкм. Предел ДЭ центральных зон (90 %) определяли только погрешности изготовления.

Заключение. Теоретически и экспериментально показано, что фоторастровая технология, использующая только один шаблон, позволяет изготавливать ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью (более 80 %) и отношением сигнал/шум в сформированном изображении.

При изготовлении ДОЭ фоторастровым методом наиболее предпочтительной является бинаризация алгоритмом ЧИМ.

Погрешности фотолитографического процесса ограничивают ДЭ ДОЭ, изготовленных как фоторастровым методом, так и многоуровневым.

Фоторастровый метод имеет преимущество по сравнению с многоуровневым при изготовлении ДОЭ с размерами зон менее 10—20 мкм и общим размером элемента менее 10—15 мм.

В заключение автор благодарит В. И. Григорову за проведение фотолитографических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feldman M. R., Guest C. C. Computer-generated holographic optical elements for optical interconnection of very large-scale integrated circuits // *Appl. Opt.*—1987.—26, N 20.—P. 4377.
2. Streibl N. Application of diffractive optical elements in optoelectronic interconnection systems // *Proc. SPIE.*—1991.—1574.
3. Swanson G. J., Veldkamp W. B. Diffractive optical elements for use in infrared system // *Opt. Eng.*—1989.—28, N 6.—P. 605.
4. Auria L., Huignard L. P., Roy A. M., Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses // *Opt. Commun.*—1972.—5, N 4.—P. 232.
5. Moreau M. *Semiconductor Lithography. Principles, Practices and Materials.*—N. Y. — L.: Plenum Press, 1988.
6. Гочияев В. З., Корольков В. П., Соколов А. П., Чернухин В. П. Полутонная оптическая запись на пленках $a\text{-Si}$ // *Квантовая электроника.*—1989.—16, № 11.
7. Poleshchuk A. G. Fabrication of high-efficient elements for diffractive and integrated optics by photorastered technology // *The 5th National Conference on Optics and Laser Engineering.*—Varna, Bulgaria, 1989.
8. Полещук А. Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий // *Автометрия.*—1991.—№ 3.
9. Bastians M. J. A generalized sampling theorem with application to computer-generated transparencies // *JOSA.*—1978.—68.—P. 1658.
10. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // *Автометрия.*—1985.—№ 1.
11. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику.*—М.: Мир, 1970.

12. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия.—1985.—№ 6.
13. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Объектив с дифракционным корректором для лазерного проигрывателя // Компьютерная оптика.—1990.—№ 7.

Поступила в редакцию 10 июля 1991 г.

УДК 681.7.023

Л. Л. Бурман, А. П. Денисенко, А. Н. Ершов, Э. Р. Павлов, В. И. Сидорко,
М. Ф. Сыроватский, З. И. Штейнгольц

(Киев — Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Изложены результаты исследований процесса микроточения оптических деталей из кристаллов Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiNbO₃ и др. Определены основные параметры, влияющие на качество обработанной поверхности. Внедрение разработанных рекомендаций по процессу точения резцами из природных алмазов позволяет обеспечить шероховатость поверхностей кристаллов Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiF в диапазоне $R_z = 0,032 \div 0,050$ мкм. Исследован характер износа резцов в зависимости от пути точения. Изучено влияние вибрации системы на показатели шероховатости обработанной поверхности. Основные выводы по работе заключаются в том, что оптические детали из кристаллов после процесса микроточения могут без последующей их полировки эффективно работать в системах ИК-техники.

В настоящее время в отечественной технологии механической обработки оптических кристаллов типа Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiF, LiNbO₃, ZnSe, CdSb и других используются только методы шлифования и полирования инструментами со связанным и свободным абразивами.

Несмотря на свою кажущуюся простоту, процесс абразивной обработки относится к сложному классу пограничных явлений. Сложность этого процесса объясняется тем, что форма поверхности инструмента, к которой притирается изделие, нестабильна во времени, в результате чего метод не является воспроизводимым. Процесс шлифования и полирования — многостадийный процесс, трудоемкий и энергоемкий. Управлять им исключительно трудно. И хотя эти процессы не требуют дорогостоящего высокоточного оборудования, обработка поверхностей современных оптических деталей является весьма длительной и зависит от большого числа факторов, в том числе от квалификации оператора.

Исследуемый нами процесс прецизионной лезвийной обработки — алмазного микроточения оптических кристаллов на станках особо высокой точности резцами из природных алмазов и синтетических сверхтвердых материалов — позволяет исключить указанные недостатки [1]. Метод алмазного микроточения базируется на широкоизвестных принципах. Полученные при точной механической обработке поверхности будут точной копией поверхности вращения, которая получается сочетанием формы обрабатываемого инструмента и траектории его движения. Основным преимуществом метода по сравнению с процессами шлифования и полирования является возможность им управлять.

Цель настоящего исследования — изучение качества плоских поверхностей деталей из оптических кристаллов, обработанных методом алмазного микроточения, и определение областей применения данного метода, обусловленных их оптическими свойствами.

При прецизионном алмазном точении оптических кристаллов точность и качество поверхности в основном определяются следующими факторами [2]: