

ОПТИЧЕСКИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.391

А. Г. ПОЛЕЩУК
(Новосибирск)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУТОНОВОЙ И ФОТОРАСТРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЙ

Введение. Успехи в развитии техники синтеза микроизображений, фотолитографии и прецизионной лучевой обработки поверхности позволили создать ряд элементов, демонстрирующих уникальные возможности дифракционной оптики [1, 2]. Однако дифракционные оптические элементы (ДОЭ) смогут конкурировать с традиционными лишь в том случае, если потери света в них соизмеримы, а технология изготовления достаточно проста.

Точность выполнения микрорельефа определяет дифракционную эффективность и, следовательно, практическую пригодность ДОЭ. Методом фотолитографии удается изготовить ДОЭ с дифракционной эффективностью свыше 80 % и хорошим отношением сигнал/шум [3]. Однако технологические трудности ограничивают возможности многошаговой фотолитографии при синтезе ДОЭ с размерами зон в единицы микрон. Поэтому поиск и исследования альтернативных методов синтеза ДОЭ являются актуальной задачей. В настоящей работе приводятся результаты исследования нового фотолитографического метода [4] изготовления высокоэффективных ДОЭ, основанного на применении только одного фотошаблона с двумя градациями пропускания. Анализируется зависимость дифракционной эффективности ДОЭ от параметров фотошаблона, методов бинаризации и погрешностей изготовления.

1. Фазовый профиль ДОЭ. Синтез ДОЭ включает два основных этапа: расчет фазовой функции пропускания (топологии) элемента и изготовление фазовой пластины с функцией пропускания, максимально приближающейся к расчетной.

В результате расчета определяется комплексная функция пропускания

$$\dot{a}(x) = \exp[i\varphi(x)], \quad (1)$$

а затем модулирующая функция $\bar{\varphi}(x)$ путем кодирования по модулю 2π фазы $\varphi(x)$.

Для простейших типов ДОЭ (решетки с «блеском», киноформные линзы, корректоры аберраций и т. и.) фазовая модулирующая функция, по крайней мере на некотором участке, имеет вид пики, а ее спектр

$$G(u) = \mathcal{F}[\dot{a}(x)] \quad (2)$$

является точечным сигналом $I(u) = [G(u)]^2 = \delta(u)$. Оператор \mathcal{F} обозначает преобразование Фурье.

Дифракционная эффективность таких ДОЭ, определяемая как

$$\eta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [\dot{G}(u)]^2 du}{\int_{-\infty}^{\infty} [G(u)]^2 du} 100 \% \quad (3)$$

(s — область задания исходного изображения), равна 100 %, т. е. весь световой поток концентрируется в полезном точечном изображении, а паразитные дифракционные порядки отсутствуют.

При синтезе ДОЭ, восстанавливающих изображение сложной формы, вид модулирующей фазовой функции может быть произвольным. Дифракционная эффективность таких ДОЭ всегда меньше 100 % и снижается с ростом сложности восстанавливаемого изображения [5]. Поэтому одним из основных параметров, в особенности для элементов, формирующих осевое изображение, является отношение сигнал/шум, определяемое как

$$SN = \frac{\int_s |S(u)|^2 du}{\int_s [|S(u)| - M|\hat{G}(u)|]^2 du}, \quad (4)$$

где $S(u)$ — исходное изображение, заданное в области s ; M — масштабный коэффициент, определяемый из условия минимизации знаменателя (4):

$$M = \frac{\int_s |S(u)| du}{\int_s |\hat{G}(u)| du}.$$

2. Методы изготовления микрорельефа ДОЭ. Технология фотолитографии позволяет достаточно просто создавать ДОЭ лишь с бинарным фазовым профилем. Получение микрорельефа с плавно изменяющейся глубиной в пределах одной зоны требует изготовления комплекта фотошаблонов, топология которых путем последовательных травлений переводится в виде отдельных ступенек в материал подложки [6]. Однако ограниченная реальным оборудованием точность совмещения шаблонов (0,1–0,2 мкм) и разброс глубины травления ступенек не позволяют получить достаточную (более 80 %) дифракционную эффективность оптических элементов с периодом зон менее 3–5 мкм.

Известен также способ [7] изготовления ДОЭ, основанный на использовании единственного «полутонного» фотошаблона с функцией пропускания, пропорциональной модулирующей функции

$$t(x) = k\bar{\varphi}(x), \quad (5)$$

где k — коэффициент пропорциональности (для простоты будем рассматривать одномерный случай). Изображение такого фотошаблона формируется контактным методом или проекционной оптической системой в плоскости подложки, покрытой фоторезистом (рис. 1). После экспонирования и проявления в слое фоторезиста образуется рельеф с глубиной, пропорциональной функции пропускания фотошаблона $t(x)$. Методом ионного травления этот рельеф может быть затем перенесен в материал подложки (стекло, кремний и т. д.).

Этот способ значительно упрощает процесс создания ДОЭ, однако требует изготовления фотошаблона с функцией пропускания, плавно изменяющейся при переходе от одной зоны к другой. Изготовление такого фотошаблона является достаточно сложной технической проблемой. Один из путей ее решения — использование техники бинаризации полутонных изображений [8], позволяющей применить обычные фотошаблоны с двухградационным пропусканием. Дискретизация первоначальной полутонной функции пропускания фотошаблона обеспечивается растриванием, а проекционная оптическая система (аналогичная изображенной на рис. 1), выполняющая роль фильтра нижних пространственных частот, восстанавливает в плоскости регистрирующей среды распределение интенсивности, пропорциональное первоначальной полутонной функции [9]. После экспонирования и проявления в слое фоторезиста образуется фазовый рельеф ДОЭ.

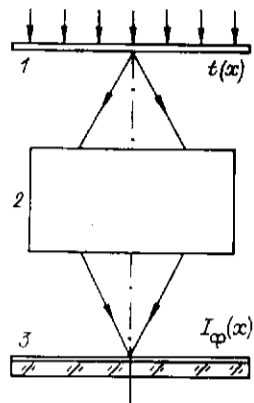


Рис. 1. Схема метода проекционного экспонирования:
1 — фотошаблон; 2 — проекционная оптическая система; 3 — покрытая фоторезистом подложка

3. Методы бинаризации. Бинаризация изображения — это процесс преобразования пространственного полутонового распределения интенсивности $I(x)$ в двухуровневое (бинарное) изображение $B(x)$. Характеристики восстановленного изображения (отношение сигнал/шум, пространственное разрешение, динамический диапазон и т. д.) зависят от вида процедуры кодирования, так как на практике формы отсчетов отличаются от δ -функций и представляют собой прозрачные участки конечной ширины на непрозрачном фоне. Для кодирования полутонового изображения наиболее часто используют частотно-импульсную (ЧИМ) и широтно-импульсную (ШИМ) модуляции пропускания.

3.1. Частотно-импульсная модуляция. При частотно-импульсной модуляции длительность импульсов постоянна, а частота следования F меняется в зависимости от величины полутоновой функции $t(x)$. В простейшем случае информация о полутоне кодируется пространственной плотностью импульсов, не зависящей от плотности импульсов на соседних участках изображения:

$$F = F_{\max} \{0,5 + P_m [t(x) - 0,5]\}, \quad (6)$$

где F_{\max} — максимальная пространственная частота следования импульсов; P_m — глубина модуляции.

Использование более сложных алгоритмов кодирования позволяет точнее передать некоторые особенности полутонового изображения. Примером такого алгоритма является алгоритм «рассеяния ошибок» Флойда и Стэйлберга [10]. Этот алгоритм адаптивный, так как соотношение прозрачных и непрозрачных участков бинарной картины зависит от распределения уже сформированной части. Метод сочетает высокое разрешение при передаче как полутонов, так и градиентов исходного изображения.

3.2. Широтно-импульсная модуляция. В этом типе модуляции частота следования импульсов постоянна, а длительность l_i (в двумерном случае — площадь) пропорциональна значению кодируемой функции в точках i дискретизации:

$$l_i = T_d \{0,5 + P_m [t(x - iT_d) - 0,5]\}. \quad (7)$$

Здесь $T_d = 1/F_d$ — период дискретизации, $i = 1, 2, 3, \dots$; $P_m = (l_{\max} - l_{\min}) / (l_{\max} + l_{\min})$ — глубина модуляции; l_{\max} и l_{\min} — максимальная и минимальная ширина импульсов на периоде функции $t(x)$.

Иногда бывает удобнее преобразовывать функцию $t(x)$ в ШИМ путем сравнения с периодической несущей $T(x)$, импульсы которой имеют, например, треугольную форму:

$$B(x) = Y[(t(x) - T(x))], \quad (8)$$

где $Y = \begin{cases} 1, & \text{если } t(x) \geq T(x); \\ 0, & \text{если } t(x) < T(x). \end{cases}$

Если функция $t(x)$ изменяется достаточно медленно, то результаты, полученные обоими методами, одинаковы.

4. Исследование фотолитографических методов изготовления ДОЭ. Изготовление ДОЭ начинается расчетом фазовой функции $\bar{\varphi}(x)$ и заканчивается формированием микрорельефа $h(x)$ в регистрирующем материале. Для удобства исследования этот процесс можно разделить на три последовательных и независимых друг от друга этапа.

А. Изготовление фотошаблона. Функция пропускания шаблона $t(x)$ связана с фазовой функцией $\bar{\varphi}(x)$ соотношением

$$t(x) = U[\bar{\varphi}(x)], \quad (9)$$

где U определяет правила, согласно которым выполняются необходимые преобразования исходной фазовой функции $\bar{\varphi}(x)$, например, равенство (5) или одна из описанных выше процедур бинаризации (6)–(8).

Б. Формирование изображения фотошаблона. В оптической фотолитографии наибольшее распространение получили проекционные методы формирования изображений с использованием некогерентных источников освещения фотошаблона [11]. Функция распределения интенсивности $I_{\Phi}(x)$ в изображении объекта (фотошаблона) определяется соотношением

$$I_{\Phi}(x) = I_0 t(x) \otimes O(x), \quad (10)$$

где $O(x) = \mathcal{F}[H(f_x)]$ — импульсный отклик некогерентной оптической системы, связанный с оптической передаточной функцией (ОПФ) $H(f_x)$ преобразованием Фурье; I_0 — распределение интенсивности светового потока, освещающего фотошаблон.

В. Формирование микрорельефа. Скорость растворения позитивных фоторезистов определяется интенсивностью экспонирующего излучения $I_{\Phi}(x)$ и временем t экспозиции. Этот процесс является нелинейным. Однако если глубина модуляции $I_{\Phi}(x)$ невелика (0,4–0,6), то зависимость скорости растворения от величины экспозиции линейна [12]. При этом глубина рельефа в фоторезисте равна

$$h(x) = d_0 - I_{\Phi}(x)t \quad (11)$$

(d_0 — толщина пленки резиста).

И наконец, функция пропускания изготовленного ДОЭ имеет вид

$$a(x) = \exp[-j2\pi\alpha h'(x)], \quad (12)$$

где $h'(x) = (n-1)tI_{\Phi}(x)/\lambda$ — оптическая глубина рельефа ДОЭ, нормированная к длине волны λ ; α — постоянный коэффициент; n — коэффициент преломления фоторезиста.

Критерием для оценки различных технологий формирования рельефа ДОЭ может быть отличие от расчетных как формы полученного рельефа $h(x)$, так и пространственно-частотного спектра функции пропускания (12). Конечной целью рассматриваемого процесса является создание оптического элемента, трансформирующего оптическое излучение, поэтому целесообразно в качестве критерия сравнения использовать интегральные параметры его пространственно-частотного спектра — дифракционную эффективность и отношение сигнал/шум, а в качестве исходной фазовой функции брать простейшую — пилообразную.

В предлагаемой работе процесс изготовления ДОЭ моделировался с помощью ЭВМ. Исходная модулирующая функция $\bar{\varphi}(x)$ помещалась на дискретное поле, состоящее из 2048 точек. Период этой функции выбирался равным 512 точкам. Для вычисления распределения светового потока в плоскости резиста (10) и пространственно-частотного спектра готового элемента (2) использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье.

4.1. Полутонная технология. С помощью полутонной технологии можно изготавливать ДОЭ с дифракционной эффективностью, приближающейся к 100%. Однако практически это неосуществимо. Это обусловлено тем, что ОПФ проекционной системы всегда ограничена, в то время как спектр пространственных частот объекта — полутонного шаблона — неограничен. Это означает, что профиль в фоторезисте будет всегда отличаться от исходной функции, а световое распределение, формируемое ДОЭ, не будет в точности соответствовать заданному.

Рассмотрим влияние частоты среза F_c ОПФ проекционного объектива (см. рис. 1) на процесс формирования рельефа и его дифракционную

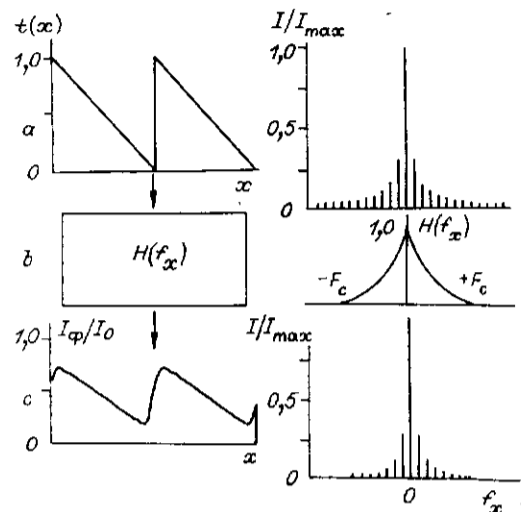


Рис. 2. Процесс формирования изображения фотоматрицы с полутоновой функцией пропускания проекционной оптической системой

эффективности. Будем считать, что функция пропускания полутонового фотоматрицы точно соответствует фазовой функции (в выражении (9) оператор U выполняет линейное преобразование), а экспонирование резиста осуществляется на линейном участке его характеристической кривой. На рис. 2 приведены результаты численного моделирования на ЭВМ (в соответствии с (10)) процесса формирования изображения простейшего типа — решетки с «блеском». На рис. 2, а показан фрагмент (два периода) функции $t(x)$ и ее нормированный пространственный спектр интенсивности. Компоненты этого спектра проходят фильтр пространственных частот (b) — проекционный объектив с ОПФ [13]:

$$H(f_x) = \left(1 - \frac{|f_x|}{2F_c}\right) \text{sinc} \left[\frac{4Wf_x}{\lambda F_c} \left(1 - \frac{|f_x|}{2F_c}\right) \right], \quad (13)$$

где $W = \epsilon L/8$ — величина ошибки фокусировки; L — световой диаметр объектива; ϵ — волновая aberrация. Световой поток, прошедший объектив (сумма спектральных составляющих функции $t(x)$), формирует изображение полутонового фотоматрицы в плоскости подложки, покрытой слоем фоторезиста. Распределение светового потока в этой плоскости и его нормированный пространственно-частотный спектр интенсивности показаны на рис. 2, с. Из приведенных графиков видно, как ОПФ объектива, воздействуя на спектр оптического сигнала, искажает форму выходного светового распределения.

В слое фоторезиста после экспонирования и проявления формируется рельеф решетки с функцией пропускания (12). Распределение интенсивности светового потока по дифракционным порядкам и дифракционную эффективность можно найти, используя соотношения (2) — (4). На рис. 3 показаны профили решеток и соответствующие нормированные распределения интенсивности светового потока по дифракционным порядкам в зависимости от отношения частоты среза F_c ОПФ проекционного объектива и частоты F_0 следования функции $t(x)$. Видно, что при $F_c/F_0 = 16$ форма профиля решетки приближается к пилообразной, а световой поток почти полностью концентрируется в 1-м дифракционном порядке. Зависимость дифракционной эффективности такой решетки от соотношения F_c/F_0 показана на рис. 4, а.

Анализ зависимости дифракционной эффективности решетки от глубины и формы профиля показал, что максимум дифракционной эффективности достигается при глубине всегда несколько меньше λ (при отсутствии частотных искажений глубина рельефа λ , а $\eta = 100\%$). Глубина профиля в резисте определяется величиной экспозиции или коэффициентом α в (12). На рис. 4, а одна из кривых получена для коэффициента $\alpha = 1$, а при расчете другой коэффициент α подбирался для получения максимума дифракционной эффективности. Видно, что при оптимальной величине коэффициента α значительно возрастает дифракционная эффективность ДОЭ с малым периодом зон. Зависимость оптимальной величины коэффициента α (или глубины рельефа) от отношения F_c/F_0 показана на рис. 4, б.

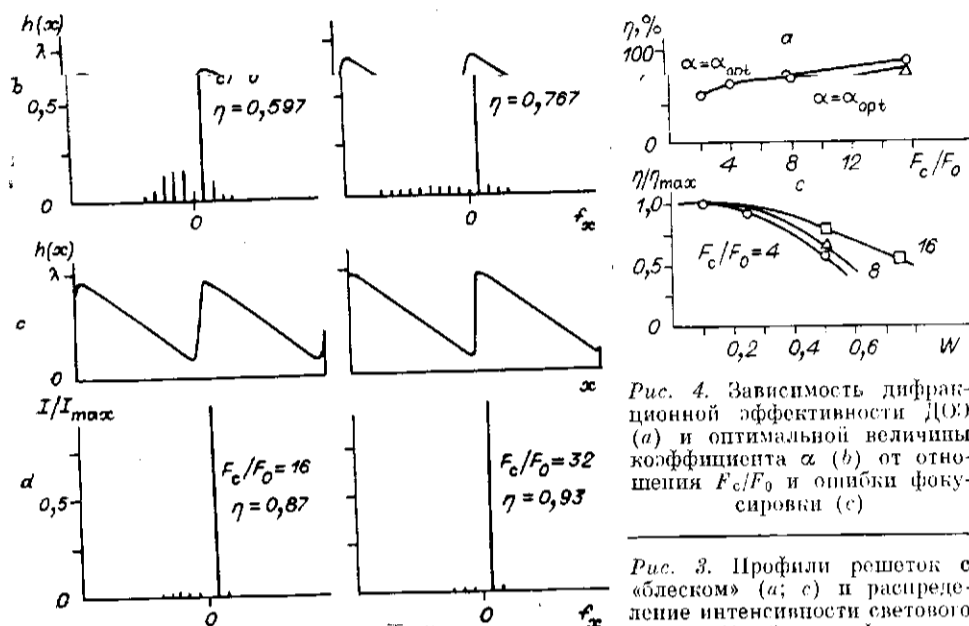


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности ДОЭ (а) и оптимальной величины коэффициента α (б) от отношения F_c/F_0 и ошибки фокусировки (с)

Рис. 3. Профили решеток с «блеском» (а; с) и распределение интенсивности светового потока (б; д) по дифракционными порядкам в зависимости от отношения F_c/F_0

Если в установке проекционной фотолитографии используется объектив с числовой апертурой $NA = 0,35$ (например, *UMWW 1:10/0,35*, «Карл Цейс», Йена) и экспонирование фоторезиста осуществляется излучением с длиной волны $\lambda = 0,436$ мкм, то частота среза ОПФ равна $F_c = 2NA/\lambda = 1600$ мм⁻¹. Изготовленные на такой установке с помощью полутонковой технологии ДОЭ будут иметь дифракционную эффективность более 80% при размере зон порядка 5–8 мкм ($F_c/F_0 = 8–10$).

Кривые, приведенные на рис. 4, а, б, получены для дифракционно-ограниченной оптической системы без aberrаций. На рис. 4, с показано влияние aberrации простейшего типа (расфокусировки) на дифракционную эффективность изготавливаемого ДОЭ. Из графика следует, что дифракционная эффективность решеток с различными пространственными частотами зависит от величины расфокусировки.

4.2. Фоторастровая технология. Основным недостатком полутонковой технологии — необходимость изготовления полутонкового шаблона — может быть преодолен бинаризацией исходной функции и изготовлением шаблона с двумя градациями пропускания. Рассмотрим особенности процесса изготовления решетки с пилообразным профилем с помощью фоторастровой технологии (рис. 5). Первый этап — преобразование полутонковой функции $t(x)$ в бинарную $B(x)$ и изготовление фотошаблона. Для этого пригодны любые алгоритмы. Однако бинаризацию периодической пилообразной функции можно проводить, используя простейшие алгоритмы ШИМ или ЧИМ. Пример бинаризации с использованием ШИМ для $F_d = 8F_0$ (F_d — частота дискретизации), а также их пространственные спектры показаны на рис. 5, а, б. Далее оптическая проекционная система фотолитографической установки (см. рис. 1) переносит изображение фотошаблона с функцией пропускания $t(x) = B(x)$ в плоскость покрытой фоторезистом пластины. Частота среза ОПФ проекционной системы с функцией пропускания $H(f_x)$ выбрана равной частоте

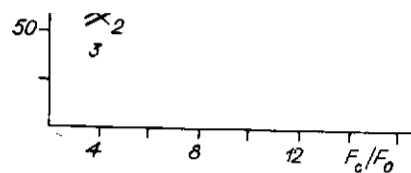
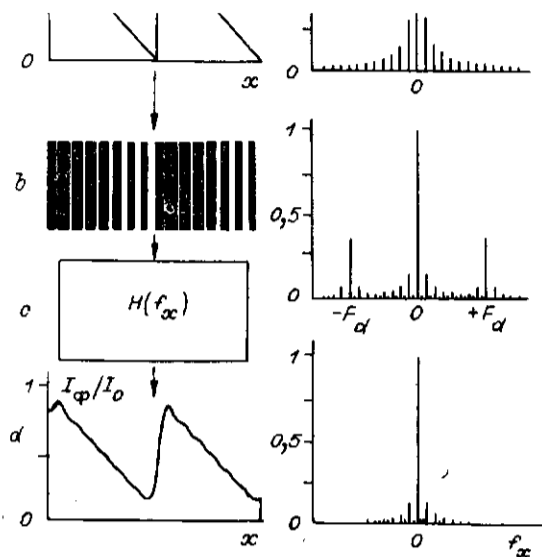


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности ДОЭ, изготовленных фоторастровым методом, от отношения F_c/F_0 :
1 — $P_m = 0,8$; 2 — $0,5$; 3 — $0,35$

Рис. 5. Процесс формирования изображения растрованного фотошаблона проекционной оптической системой

дискретизации $F_c = F_d$ и имеет тот же вид, что на рис. 2, *b*. Распределение интенсивности светового потока в выходной плоскости объектива и его пространственно-частотный спектр показаны на рис. 5, *d*. Сравнительная распределения световых потоков в этой плоскости при использовании полутонного (см. рис. 2, *c*) и бинарного (см. рис. 5, *d*) шаблонов, видно как сходство (сглаживание пилообразной функции), так и различие (появление колебаний интенсивности, кратных частоте F_d).

Параметры изготавливаемых ДОЭ (дифракционная эффективность и отношение сигнал/шум) зависят от условий бинаризации. На рис. 6 показаны результаты расчетов зависимости дифракционной эффективности ДОЭ от соотношения F_c/F_0 (при $F_c = F_d$) при трех значениях глубины модуляции P_m и оптимальном значении коэффициента α . Сравнительная кривые, приведенные на рис. 4, *a* и рис. 6, видно, что величина дифракционной эффективности элементов, изготовленных обоими методами, примерно одинакова, но для фоторастровой технологии зависит от P_m . Эту зависимость можно объяснить тем, что фильтр пространственных частот (рис. 5, *c*) проходит одновременно со спектральными компонентами полезного сигнала $t(x)$ гармоники и комбинационные составляющие ($nF_d - mF_0$, где m и n — целые числа) частоты дискретизации F_d , уровень которых определяется, в частности, глубиной модуляции P_m .

Перераспределение светового потока из основного порядка дифракции в боковые, кроме уменьшения дифракционной эффективности, приводит к возникновению оптических шумов. Это видно из рис. 7, на котором показаны фрагменты бинарных шаблонов (*a*) с соотношением F_0/F_d , равным соответственно 4, 8 и 16, форма рельефа (*b*), получаемого в фоторезисте (при оптимальном значении коэффициента α), и распределение светового потока (*c*) по дифракционным порядкам готового элемента. На рис. 8, *a* приведены результаты численного расчета (выражение (4)) отношения сигнал/шум для ДОЭ с пилообразным профилем в зависимости от глубины модуляции. Сигнал s определен в области между 0-м и +2-м порядками дифракции. Анализ выражений (3) и (4) показал, что максимумы дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум достигаются при различных значениях коэффициента α . Эти зависимости для решеток с различным отношением F_c/F_0 приведены на рис. 8, *b*. При необходимости оптимизации ДОЭ по величине дифракционной эффективности или отношению сигнал/шум необходимо выби-

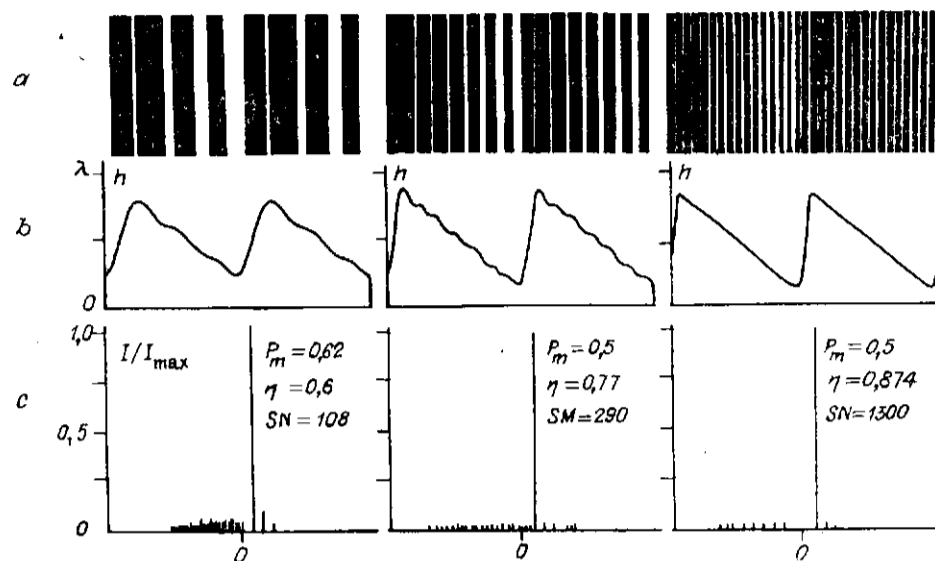


Рис. 7. Фрагменты растрованных фотошаблонов (а), форма рельефа (б), получаемая в фоторезисте, и распределение интенсивности светового потока (с) по дифракционным порядкам изготовленного элемента

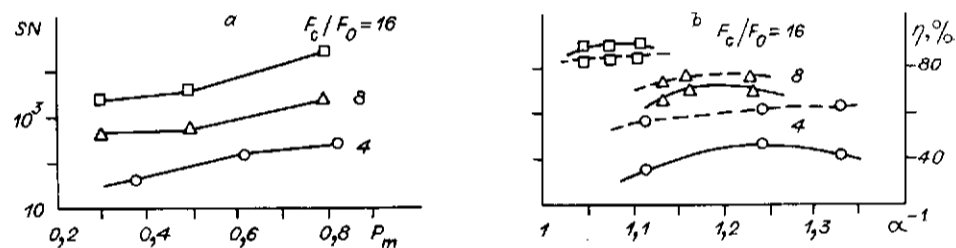


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/шум SN от глубины модуляции P_m (а) и величины коэффициента α (б): штриховая линия (б) — зависимость дифракционной эффективности ДОЭ от величины коэффициента α

рать соответствующее значение коэффициента α , величина которого пропорциональна времени экспонирования резиста.

Из рис. 6 следует, что дифракционная эффективность элементов, изготавливаемых фоторастровым методом, растет с увеличением отношения F_c/F_0 (или числа линий раstra на периоде полупериодной функции), стремясь к 100%. Однако на практике существует ряд факторов, ограничивающих этот рост. Одним из них является точность выполнения топологии фотошаблона. Из выражения (7) следует, что минимальная ширина линий раstra равна $l_{\min} = 0,5F_c(1 - P_m)$. При $P_m = 0,6$, $F_c = 1600 \text{ мм}^{-1}$ и масштабе изготавливаемого шаблона 10:1 $l_{\min} = 1,2 \text{ мкм}$. Фотопостроители [9, 11], используемые для изготовления фотошаблонов ДОЭ, имеют точность выполнения границ элементов топологии порядка 0,1–0,2 мкм. Покажем, что эта погрешность и определяет верхний предел дифракционной эффективности оптических элементов, изготавливаемых фоторастровым методом. Для этого выражение, описывающее бинарную функцию пропускания шаблона, например (8), запишем в виде

$$B(x) = Y[t(x) - T(x) + u(x)], \quad (14)$$

где $u(x)$ — случайная функция, изменяющаяся в пределах $0 \pm U_{\max}$. Одна из реализаций функции $u(x)$ показана на рис. 9, а. Ниже (б–е) приведены результаты численного моделирования фазового профиля ДОЭ при случайных колебаниях ширины элементов топологии фотошаб-

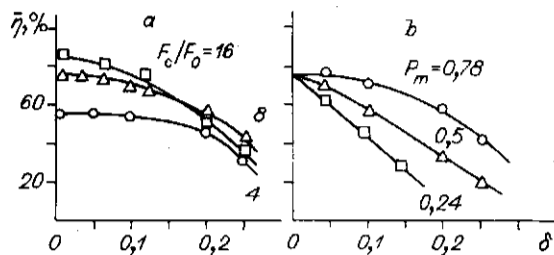
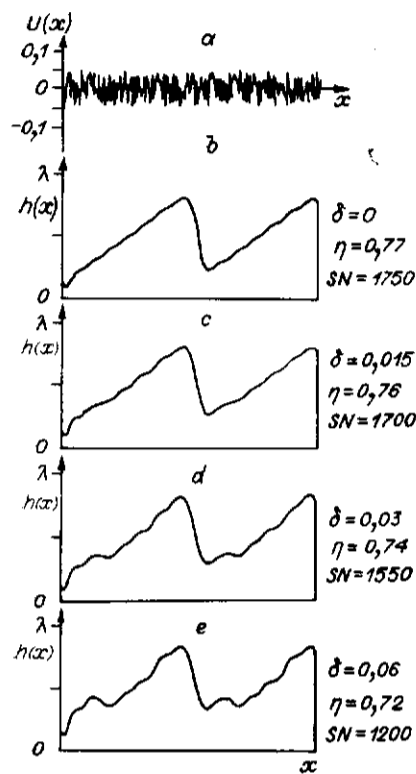


Рис. 10. Зависимость усредненной дифракционной эффективности ДОО от величины погрешности изготовления границ раstra для $F_c/F_0 = 4,8$ и 16 (а) и глубины модуляции ИИМ $P_m = 0,24, 0,5$ и $0,78$ (б)

Рис. 9. Результаты моделирования воздействия случайных колебаний (а) границ элементов раstra фотонаблona на фазовый профиль ДОО (б — е)

лона, равных $\delta = U_{\max}/T_d$, соответственно $\delta = 0; 0,015; 0,03$ и $0,06$. Видно, что при $\delta > 0,03$ (это соответствует погрешности выполнения границ $0,15$ мкм при периоде дискретизации $T_d = 5$ мкм) форма профиля решетки значительно искажается. Это приводит к уменьшению дифракционной эффективности и увеличению оптических шумов.

На рис. 10, а, б 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 раstra дифракционная эффективность падает и при больших значениях δ не зависит от соотношения F_c/F_0 . Причем чем больше это соотношение, тем значительнее падение дифракционной эффективности. На рис. 10, б показано, что для улучшения характеристик ДОО необходимо выбирать как можно большую величину коэффициента P_m (это также следует из графиков рис. 8, а).

5. Экспериментальные результаты. Экспериментально исследовалось формирование рельефа кифоформных линз с помощью фоторастровой технологии. Фазовый профиль этих элементов представляет собой коль-

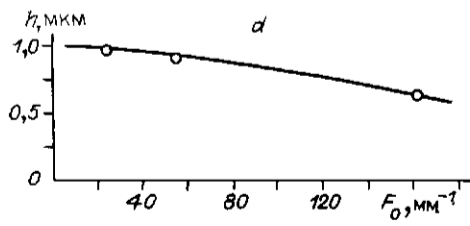
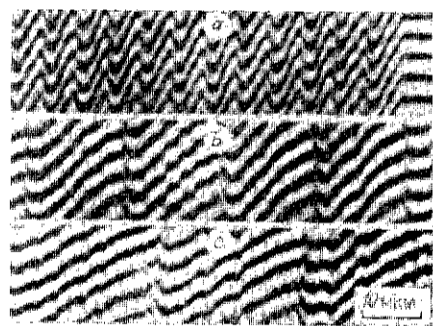


Рис. 11. Микроинтерферограммы трех участков (а — с) поверхности кифоформной линзы, изготовленной фоторастровым методом, и зависимость глубины рельефа от пространственной частоты структуры (д)

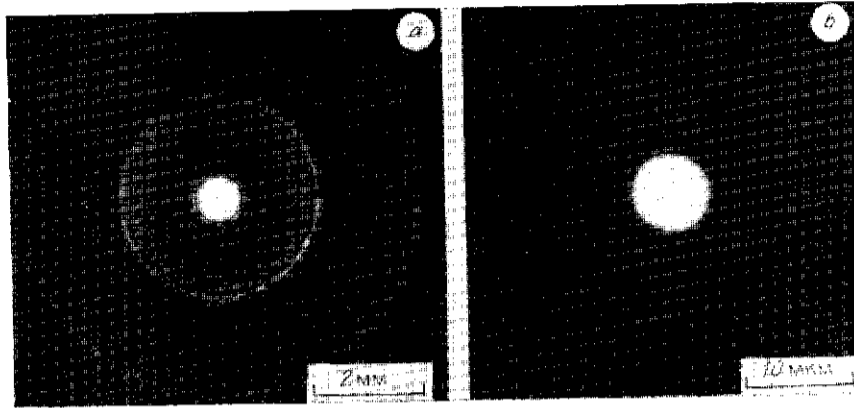


Рис. 12. Распределение света в фокальной плоскости изготовленной киноформной линзы

цевую решетку с пилообразным профилем и переменным периодом. Для биаризации исходной функции использован алгоритм ШИМ (7). Хромовый фотошаблон с кольцевой структурой изготавливался на специализированном лазерном фотоустройстве [9] в увеличенном масштабе (10:1). Период дискретизации был выбран $T_d = 6$, $l_{\min} = 1.2$, $l_{\max} = 4.8$ мкм. Фотоувеличитель (UER, «Карл Цейс», Йена, проекционный объектив 1:10/0,35) уменьшал в 10 раз и мультиплицировал изображение фотошаблона. Толщина слоя d_0 фоторезиста AZ-1450 равнялась 1,5–1,8 мкм. Процесс проявления стандартный.

Дифракционная эффективность изготовленных линз (диаметр 5 мм, фокусное расстояние 25 мм при $\lambda = 0,63$ мкм) находилась в пределах от 50 до 80 % из-за изменения времени экспозиции, которое преднамеренно варьировалось в пределах ± 20 % от оптимальной величины при переходе от линзы к линзе. Эффективность, равная 85 %, — это теоретический предел для $F_0/F_0 = 16$ (см. рис. 6), и она не может быть увеличена из-за погрешности изготовления границ биарного раstra, которая составляет приблизительно 0,2 мкм.

На рис. 11 показаны микроинтерферограммы фазового профиля линзы, полученные на ее различных участках: с краю (а), в середине (b) и близко от центра (c). На рис. 11, d приведена зависимость глубины рельефа линзы от пространственной частоты колец. Эта зависимость соответствует кривой на рис. 4, b для оптимального значения коэффициента α . Отклонение от пилообразного профиля киноформной линзы обусловлено нелинейностью характеристической кривой фоторезиста и случайными ошибками при изготовлении топологии фотошаблона.

Искажения формы рельефа линзы приводят к появлению паразитных дифракционных порядков и к снижению общей дифракционной эффективности, но практически не влияют на качество точечного изображения. На рис. 12 показаны типичная картина распределения света в фокальной плоскости (a) киноформной линзы (участок диаметром 10 мм) и ее центральная часть (100 мкм) (b). Видно, что качество точечного изображения достаточно высокое несмотря на наличие рассеянного света.

ВЫВОДЫ

Фоторастровая технология, использующая только один шаблон, позволяет изготавливать ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью и отношением сигнал/шум в сформированном изображении.

Если функция глубины $h(x)$ рельефа ДОЭ имеет ограниченный по частоте спектр, то максимум дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум достигается при глубине рельефа, меньшей λ .

Предел дифракционной эффективности ДОЭ, изготовленных по фоторастровой технологии, определяется точностью выполнения границ топологии шаблона.

Автор благодарит проф. О. Брингдала и д-ра Ф. Вировского (университет г. Эссена, ФРГ) за полезное обсуждение и помощь в проведении численных экспериментов, проф. В. П. Коронкевича за внимание и поддержку в работе, Е. Г. Чурина за помощь в изготовлении фотошаблонов, В. П. Чернухина и В. И. Григорову за проведение фотолитографических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee W. H. Computer-generated holograms: techniques and application // Progress in Optics/Ed. E. Wolf.— North—Holland, Amsterdam, 1978.— P. 119.
2. Goto K., Mori K., Hatakoshi G. et al. Spherical grating objective lenses for optical disk pick-up // Jap. J. Appl. Phys.— 1987.— 26.— Suppl. 26-4.— P. 135.
3. Swanson G. I., Weldkamp W. B. Diffractive optical elements for use in infrared systems // Opt. Eng.— 1989.— 28, N 6.— P. 605.
4. Poleshchuk A. G. Fabrication of high efficient elements for diffractive and integrated optics by photorastered technology // The 5-th National Conf. on Optics and Laser Engineering, May 18—20.— Varna, Bulgaria, 1989.— P. 7.
5. Wyrowski F., Bryngdahl O. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography // JOSA.— 1988.— 5, N 7.— P. 1058.
6. Auria L., Huignard L. P., Boy A. M., Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses // Opt. Comm.— 1972.— 5, N 4.— P. 232.
7. Коронкевич В. И., Ремесник В. Г., Фатеев В. А., Цукерман В. Г. Киноформные оптические элементы в пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников // Автометрия.— 1976.— № 5.
8. Bastians M. J. A generalized sampling theorem with application to computer-generated transparencies. // JOSA.— 1978.— 68.— P. 1658.
9. Коронкевич В. И., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия.— 1985.— № 1.
10. Floyd P. W., Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial grayscale // Proc. SID.— 1976.— 17.— P. 78.
11. Котлепов Б. И. Микроизображения. Оптические методы получения и контроля.— Л.: Машиностроение, 1985.
12. Фотолитография и оптика/Под ред. Я. А. Федорова и Г. Поля.— М.: Сов. радио, 1974.
13. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 16 апреля 1990 г.

УДК 681.327.68 : 621.373.826

И. Б. РУДАКОВ, И. Ш. ШТЕЙНБЕРГ, Ю. А. ЩЕПЕТКИН

(Новосибирск)

МЕТОД МНОГОСЛОЙНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Оптическая побитовая запись на плоском (поверхностном) носителе довольно быстро достигла предельной плотности, обусловленной дифракционным ограничением минимального размера сфокусированного лазерного пучка. Требование повышения объема регистрируемой информации существенно стимулирует исследования в этом направлении.

В данной работе рассматривается многослойная запись в объемной (толстой) среде как метод повышения плотности оптической регистрации двоичной информации. Способ основан на селекции объемной зоны записи при гетеродинном считывании информации [1, 2].

На рис. 1 приведена блок-схема устройства, предназначенного для многослойной оптической записи.

Луч света полупроводникового лазера 1 оптической схемой 2, 3 формируется в виде перетяжки в зоне акустооптического взаимодействия