

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ ФОТОНИКИ

УДК 621.315.592 : 772.99

**В. П. КОРОЛЬКОВ, В. П. КОРОНКЕВИЧ, И. А. МИХАЛЬЦОВА,
И. Г. ПАЛЬЧИКОВА, А. Г. ПОЛЕЩУК, А. Г. СЕДУХИН,
А. П. СОКОЛОВ, Е. Г. ЧУРИН, Ю. П. ЮРЛОВ**
(Новосибирск)

КИНОФОРМЫ: ТЕХНОЛОГИИ, НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ *

Первые результаты исследований новой фототехнологии синтеза киноформных оптических элементов представлены в работе [1]. Для записи дифракционной структуры применяется сфокусированный до размеров длины волны лазерный пучок как основной «инструмент» прецизионного фотопостроителя, управляемого компьютером. Такой способ получения элемента напоминает приемы художников-пуанталистов. Структуру рисунка образуют переналоженные друг на друга точки и дуги окружностей. Пространственная частота «картины» может достигать 1500 мм^{-1} и выше. Приемлемую для практики скорость записи удается получить при работе в полярной системе координат. Разработанный нами фотопостроитель [2—4] позволяет изготавливать амплитудную маску элемента (шаблон), топология которой затем переводится в стекло фотолитографическим путем.

В предлагаемой работе представлены новые методы и приемы получения киноформных элементов произвольной топологии и профиля, а также результаты исследования новых материалов для получения маскирующих покрытий шаблонов. Особое внимание уделяется обобщенным зонным пластинкам [5, 6], у которых продольный и поперечный размеры каустики вблизи фокуса связаны не столь жестко, как у хорошо коррелированного объектива. В микроскопах совмещения [7], устройствах вывода изображений из ЭВМ [8] и лазерных технологических установках необходимы элементы, удлиняющие каустику при сохранении проективных свойств оптической системы.

В дисковых устройствах записи и воспроизведения данных [9], датчиках перемещений, работающих по принципу триангуляции [10], и устройствах для создания опорной световой линии [1] требуются элементы, изображающие световую точку на входе в виде отрезка прямой, расположенной вдоль оптической оси, причем осуществление проективных преобразований в этих случаях обязательно. Традиционные оптические элементы далеко не всегда позволяют эффективно управлять каустикой, поэтому решение можно найти путем сочетания киноформных и классических элементов.

Синтезирован ряд новых оптических элементов, имеющих преобразованную каустику. Среди них аксикон, совмещенный с линзой или пластинкой Сименса, линза с повышенной глубиной фокусировки, растровые шкалы с дифракционными градациями, позволяющие осуществить перекрестные оптические связи. Эти элементы совмещают функции сра-

* Продолжение статьи см. в следующем номере.

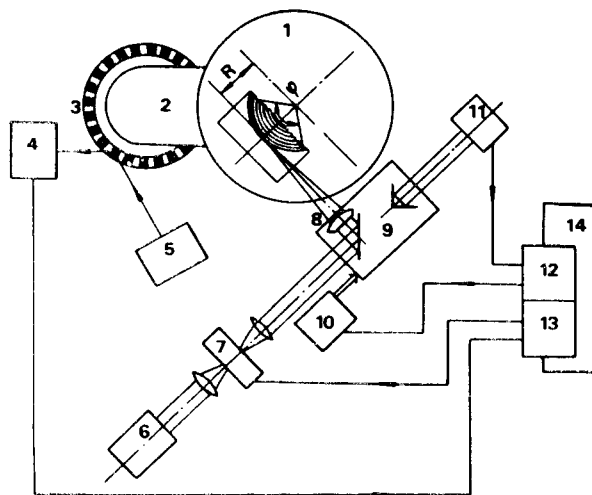


Рис. 1. Блок-схема лазерного фотопостроителя

зу двух или нескольких компонентов и дают возможность существенно упростить схему оптического прибора. В практической части работы представлены результаты исследования нескольких схем новых приборов с дифракционными элементами.

1. Новые технологии.

Формирование изображений произвольной топологии. Обратимся к схеме на рис. 1. Здесь в

упрощенном виде изображены основные блоки лазерного фотопостроителя, работающего в полярной системе координат. Изображение строится сфокусированным лазерным пучком на подложке 1 со светочувствительной пленкой. Подложка закреплена на планшайбе в шпинделе 2. Угловое положение подложки при ее вращении двигателем фиксируется по круговой шкале 3 фотоэлектрическими датчиками 4 и 5. Дискретность определения углового положения составляет $1''$.

Оптическая схема установки включает аргоновый лазер 6, модулятор 7 и фокусирующий микрообъектив 8. Микрообъектив закреплен на подвижной каретке 9, которая перемещается вдоль радиуса линейным двигателем 10. Контроль перемещения осуществляется лазерным интерферометром 11. Линейный двигатель и интерферометр связаны с электронным блоком 12, в котором вырабатываются сигналы управления перемещением. Наименьший шаг перемещения равен $\lambda/8$ ($\approx 0,079$ мкм). Запись по углу можно реализовать подачей сигналов (включения и выключения) на акустооптический модулятор 7 от блока управления 13. Информация об угловом положении подложки поступает в 13 от датчика угол-код 3—5. Управление и контроль за работой всех блоков осуществляет ЭВМ 14.

В [1] показано, что фотопостроитель особенно удобен для записи круговых структур типа зонных пластинок, когда запись является непрерывной по азимуту и дискретной в радиальном направлении. При записи управляющая ЭВМ на время одного оборота шпинделя включает модулятор и лазерный пучок с заданной мощностью экспонирует на светочувствительном материале окружность. Далее по команде ЭВМ каретка с микрообъективом перемещается и процесс записи повторяется.

При синтезе произвольных изображений необходимо вести дискретную запись и по азимуту. На рис. 1 схематично показаны следы лазерного пучка при построении квадрата, расположенного несимметрично относительно оси вращения подложки. Поле изображения заполняется дугами окружностей. Для изображений с высокой пространственной частотой дуги сокращаются до точек.

Пространственное разрешение фотопостроителя лежит в пределах $0,7-1$ мкм и определяется размером фокального пятна и свойствами светочувствительного материала. Неровности края синтезируемого изображения зависят от степени перекрытия дорожек, размера светового пятна и формы фрагмента изображения. На рис. 2, а—в представлена зависимость неровности края $\varepsilon = DR(1 - \sqrt{2\xi(1 - \xi/2)})$ от радиуса пятна DR и относительного перекрытия $\xi = \kappa/(2DR)$. Здесь κ — абсолютное перекрытие дорожек. Допустимая величина неровности определяется требованиями к качеству изображения.

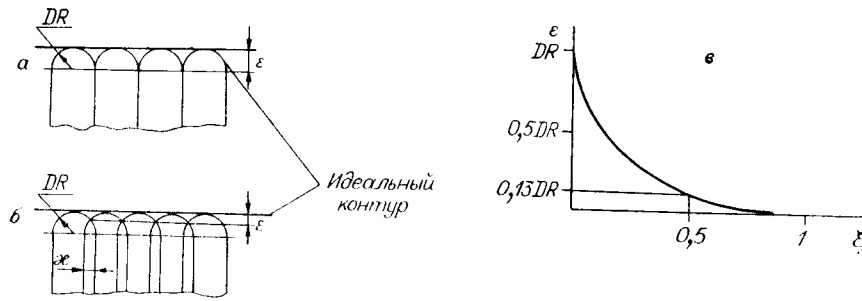


Рис. 2. Следы лазерного пучка на материале:
 а — изображение без перекрытия; б — с перекрытием, равным ξ ; в — зависимость не-
 ровности края ε от степени перекрытия ξ

Процесс формирования изображений на фотопостроителе состоит из двух этапов: подготовки данных и построения собственно изображения. Разделение на два этапа позволяет уменьшить температурные, механические и электрические дрейфы системы.

При подготовке данных решается задача нахождения точек пересечения окружностью радиуса R контура синтезируемого изображения. Определяются угловые координаты, соответствующие концам дуги окружности, вдоль которой осуществляется экспонирование. При диаметре ячтя, равном 1 мкм , и дискретности по азимуту в $1''$ для построения решетки размером $1 \times 1 \text{ см}^2$, состоящей из 1000 прямоугольников, требуемый объем исходных данных составляет 50 Мбайт . Подготовка данных сопряжена с большими затратами времени и поэтому вынесена в отдельную операцию, предшествующую синтезу изображения. При изготовлении элемента решается задача чтения, передачи и обработки данных об угловой и радиальной координатах и управления в реальном времени перемещением каретки и модулятором лазерного пучка. В качестве примера на рис. 3 представлены фрагменты синтезированных изображений.

В первом фрагменте (рис. 3, а) представлена топология амплитудного шаблона нового элемента, совмещающего в себе отражающее зеркало и фокусирующий объектив. Зеркало устанавливается к падающему пучку под углом 45° . Объем памяти для подготовки данных записи эллипсов 20 Мбайт . Для их вычисления потребовалось 10 ч машинного

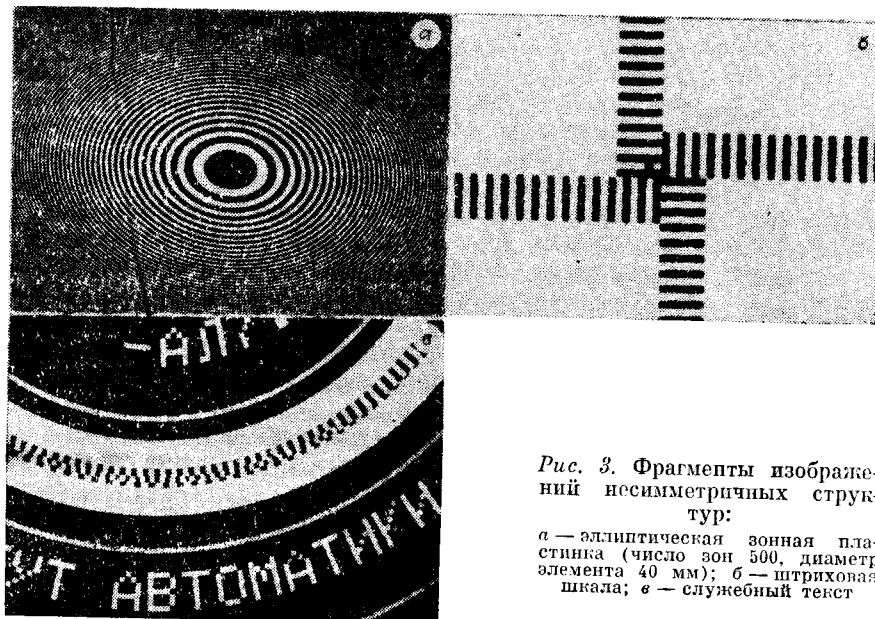


Рис. 3. Фрагменты изображений
 несимметричных структур:

а — эллиптическая зонная пластинка (число зон 500 , диаметр элемента 40 мм); б — штриховая шкала; в — служебный текст

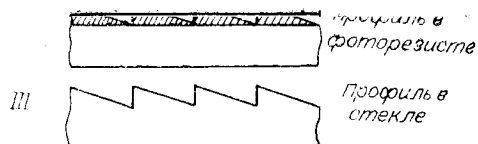


Рис. 4. Технология получения фазового профиля с помощью полутонного фотошаблона:

I — изготовление фотошаблона; II — экспонирование и проявление фоторезиста; III — «сухое» травление стекла

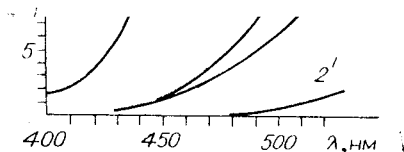


Рис. 5. Спектры пропускания T для кремниевых пленок

времени ЭВМ «Электроника 79». Время изготовления шаблона достигло 5 ч (управляющая ЭВМ СМ-4).

На рис. 3, б представлена специальная шкала. Цена деления 10 мкм, ширина штриха 5 мкм, длина штриха 30 мкм, общая длина шкалы 5 мм. Шкалу пересекают пять концентрических окружностей, расположенных через 1 мм, и шесть окружностей — через 2,5 мм. Погрешности шкалы лежат в пределах 1 мкм. На рис. 3, в показаны фрагменты служебного текста, который обычно сопровождает синтезируемый рисунок шаблона.

Методы получения микрорельефа поверхности. Киноформные оптические элементы с требуемой модуляционной фазовой функцией могут изготавливаться путем изменения глубины рельефа поверхности или коэффициента преломления материала подложки [1].

Технология получения фазового рельефа, основанная на методах фотолитографии, требует изготовления комплекта фотошаблонов, рисунок которых последовательно переводится в виде отдельных ступенек в материал подложки. Однако ограниченная реальным технологическим оборудованием разрешающая способность (1—2,5 мкм) и точность совмещения шаблонов (0,5—1 мкм) не позволяют изготавливать линзы с большими апертурами и высокой (70—80 %) дифракционной эффективностью [11]. Фазовый профиль киноформа можно получить также с помощью только одного «полутонного» фотошаблона. После экспонирования и проявления в слое фоторезиста образуется рельеф, глубина которого пропорциональна функции пропускания шаблона. Далее этот рельеф путем ионного травления переносится в материал подложки. Основные этапы такого технологического процесса показаны на рис. 4.

С одной стороны, этот способ значительно упрощает процесс изготовления, поскольку отпадает необходимость в совмещении комплекта фотошаблонов и многократном травлении материала подложки, но с другой — требует изготовления шаблона с заданным пропусканием, изменяющимся по пилообразному или другому, более сложному закону. Использование для этих целей фотоэмульсий возможно только при изготовлении киноформных элементов с зонами шириной не менее 50—100 мкм. Нелинейность γ -характеристики, значительная толщина слоя (несколько микрометров), наличие зерен не позволяют изготавливать эмульсионные полутонные фотошаблоны достаточно светосильных киноформов. Ниже предложены два способа получения микрорельефа поверхности, свободные от указанных недостатков.

1. Полутонная запись в материале шаблона. Перспективным материалом для изготовления маскирующего покрытия фотошаблонов является аморфный кремний a — Si. На тонких пленках кремния (~ 100 нм) могут быть получены полутонные и бинарные микроизображения с высоким пространственным разрешением.

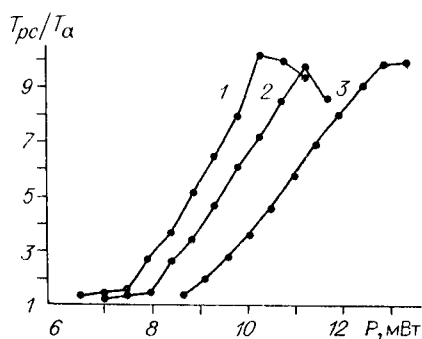


Рис. 6. Зависимость контраста записи T_{pc}/T_a от мощности лазерного пучка при скоростях сканирования 49 (1), 82 (2), 140 см/с (3)

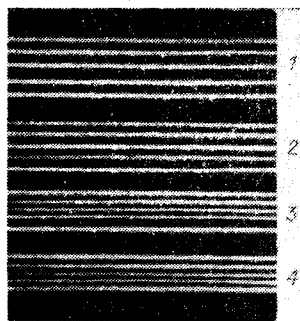


Рис. 7. Микрофотография групп линий, записанных с периодом (мкм): 1 — 1, 2 — 0,79, 3 — 0,63, 4 — 0,48

В основе оптической записи на пленках α — Si лежит твердофазный переход из аморфного состояния в поликристаллическое, реализующийся при локальном нагреве лазерным лучом [12]. Этот переход сопровождается уменьшением коэффициента поглощения α и ростом коэффициента пропускания T . Под действием излучения пленка просветляется. Рисунок фотошаблона получается непосредственно в процессе записи без какой-либо последующей химической обработки.

На рис. 5 показано изменение спектра пропускания T для пленок толщиной 100 (1, 1') и 200 (2, 2') нм (1' и 2' — спектры до облучения лазером, 1 и 2 — после облучения). Поскольку микроизображение фотошаблона при последующих операциях переводится на фоторезист, то наибольший интерес представляет для нас спектральный диапазон 400—450 нм, где фоторезист наиболее чувствителен к свету. На длине волны 440 нм достаточно высоки как чувствительность резиста, так и пропускание T_{pc} облученных поликристаллических участков фотошаблона. Поскольку контраст изображения (отношение T_{pc}/T_a , где T_a — пропускание необлученной пленки) растет с увеличением толщины пленки, а пропускание T_{pc} падает, то для бинарных шаблонов толщина пленки в 100 нм является оптимальной. При этом контраст равен 10, а коэффициент пропускания $T_{pc} = 9\%$ (см. рис. 5). На рис. 6 приведена зависимость контраста от мощности записывающего пучка при различных скоростях сканирования. В целом контраст изображения изменяется достаточно линейно. Таким образом, в некотором диапазоне изменений мощности возможна полутонная оптическая запись. При копировании полутонных фотошаблонов необходимо работать на линейном участке характеристической кривой фоторезиста, поэтому максимальный контраст должен лежать в пределах 4—10. Следовательно, для полутонных фотошаблонов можно снизить толщину пленки до 60—80 нм, чтобы повысить пропускание просветленной части.

Оптическую запись на пленках кремния отличает высокое пространственное разрешение. На рис. 7 представлена микрофотография групп линий, записанных лазерным пучком диаметром 0,8 мкм при скорости сканирования 100 см/с. Расстояние между линиями (период) лежит в пределах 0,48—1 мкм. Ширина формируемых дорожек достигает 0,25—0,3 мкм при скоростях сканирования выше 10 см/с и мощности пучка ниже порога плавления P_0 . При мощности пучка $P > P_0$ ширина возрастает до 0,6—0,8 мкм. При понижении скорости до 10^{-2} см/с ширина дорожек монотонно увеличивается до 0,4—0,5 мкм. Получение высокого пространственного разрешения в широком диапазоне скоростей сканирования, по-видимому, обусловлено несколькими причинами, связанными с термическим характером процесса записи. Во-первых, существует сильная нелинейная зависимость процесса кристаллизации от температуры; во-вторых, пленки аморфного кремния имеют низкую теплопро-

водность ($\sim 2 \cdot 10^{-2}$ Вт/см · К); в-третьих, из-за просветления пленки при толщинах ~ 100 нм происходит значительное уменьшение поглощения энергии в центральной части гауссова пучка, что ведет к локализации структурных изменений в малой области.

Расчеты оптических констант по пропусканию и отражению пленок показывают, что коэффициент поглощения α монотонно уменьшается с ростом мощности пучка. Исследование структурных изменений, проводившееся методом спектроскопии комбинационного рассеяния, подтвердило, что под действием лазерного излучения происходит кристаллизация пленки. Эффект полутонной записи связан с накоплением общего объема микрокристаллов в образце и слабо зависит от их размера.

Отметим основные особенности фотошаблонов с кремниевым маскирующим покрытием:

получение микроизображения на маскирующем покрытии происходит за счет просветления пленки при облучении сфокусированным лазерным пучком; последующей химической обработки шаблона не требуется;

материал покрытия позволяет получать высокое пространственное разрешение, достигающее 0,25—0,30 мкм; даже при малых скоростях записи оно составляет 1000 лин/мм;

аморфное и поликристаллическое состояния кремния стабильны во времени и гарантируют воспроизводимость при тиражировании.

К недостаткам следует отнести низкое пропускание просветленных участков пленки в области чувствительности фоторезистов (< 450 нм), что приводит к большим экспозициям при переносе рисунка шаблона в фоторезист.

2. Фоторастровый метод получения микро рельефа. Технологический процесс, показанный на рис. 4, может быть реализован и с использованием обычных маскирующих покрытий на основе хрома или окиси железа, обеспечивающих только двухградационное пропускание [13]. Дискретизация первоначальной полутонной функции пропускания $S(x)$ фотошаблона обеспечивается растриванием, а проекционная оптическая система, выполняющая роль фильтра пространственных частот (рис. 8, а), восстанавливает в плоскости регистрирующего материала распределение интенсивности, пропорциональное первоначальной полутонной функции (рис. 8, б). После экспонирования и проявления в слое фоторезиста образуется рельеф, который путем ионного травления переносится с заданным масштабом в материал подложки.

Период растривания шаблона выбирается из условия $t_p < 2\pi/\omega_{\max}$, где ω_{\max} — максимальная пространственная частота пропускания оптической системы (предел разрешения). Ширина линий растра $l = t_p S(x)$. Если исходная полутонная функция пропускания (с периодом t) представлена в виде ряда Фурье $S(x) = A_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin k\Omega x$ (где для пилообразного профиля $A_0 = 1$, $b_k = 2/\pi k$), то можно показать, что распределение интенсивности света, прошедшего шаблон, в плоскости фоторезиста имеет вид

$$I_{\Phi}(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^K b_k M\left(\frac{k\Omega}{\omega_{\max}}\right) \sin k\Omega x + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n} J_m[\pi n b_k (-1)^{k+1}] \times \\ \times [(-1)^{k+1} - (-1)^{k+m+n+1}] M\left(\frac{kM\Omega + n\omega_0}{\omega_{\max}}\right) \sin\left[(kM\Omega + n\omega_0)x + A_0 n \frac{\pi}{2}\right].$$

Здесь $\Omega = 2\pi/t$, $\omega = 2\pi/t_p$, а $M(\omega/\omega_{\max})$ — оптическая передаточная функция (ОПФ) проекционной системы. Кроме исходной функции (первые два члена), в распределении содержатся шумовые комбинационные составляющие, обусловленные растриванием. Соответствующий выбор величин t_p , ω_{\max} , $M(\omega/\omega_{\max})$ и глубины модуляции $S(x)$ позволяет сни-

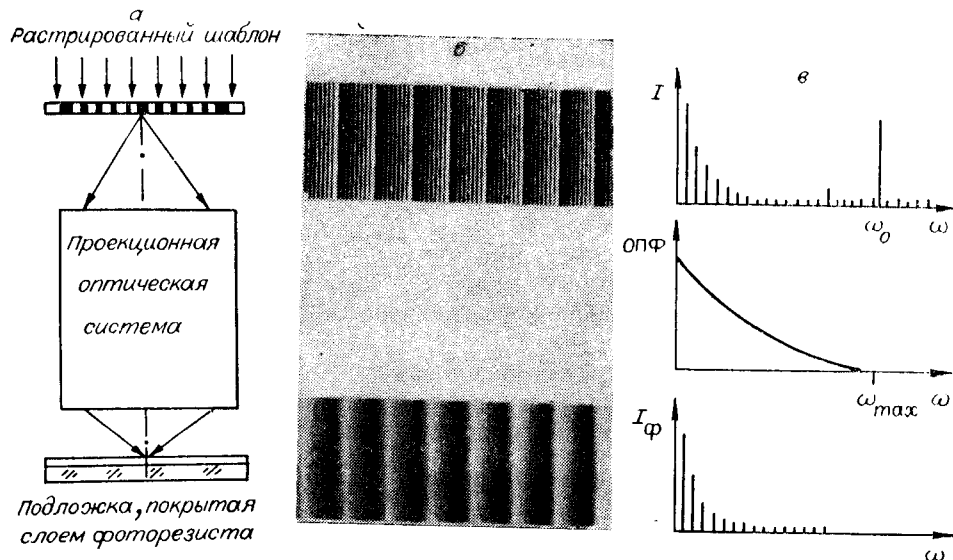


Рис. 8. Фоторастровый способ получения микрорельефа поверхности киноформных элементов.

Реализация предложенного способа с помощью устройства проекционной фотолитографии (а); фрагмент растрированного фотошаблона ($t_p = 6$, $l_{\min} = 1,2$ мкм) и распределение интенсивности, восстановленное в плоскости фоторезиста (б); спектр пространственных частот шаблона ($t = 10$, $t_p = 0,6$ мкм) и результат фильтрации оптической системой фотоповторителя (в)

зять уровень этих составляющих до приемлемой величины, как показано на рис. 8, в.

Дифракционная эффективность η синтезированных по данному способу киноформов определяется в основном величиной экспозиции и числом $K = \omega_{\max}/\Omega - 1$ пространственных гармоник, формирующих распределение интенсивности в плоскости фоторезиста. Величина η изменяется от 0,33 (при $K = 1$) до 1 (при $K \rightarrow \infty$). На рис. 9 показано изменение дифракционной эффективности киноформа, синтезированного с помощью растровой технологии (а), в зависимости от числа гармоник и для сравнения по известной технологии (б) в зависимости от числа ступенек. Кривая б рассчитана для идеального случая, когда отсутствуют технологические ошибки выполнения структуры (ошибки совмещения, выполнения ширины и глубины ступенек, клина травления и т. п.). На практике для элементов с размером зон порядка 10 мкм и менее величина η значительно ниже. В фоторастровом методе этот источник погрешностей отсутствует. Поэтому при использовании проекционной системы обычного фотоповторителя (например, объектив УМВВ 1:10/0,35 фирмы «Карл Цейсс» имеет пространственное разрешение свыше 1500 мм^{-1}) легко получить дифракционную эффективность киноформов порядка 80 % для размера зон 5–8 мкм (в этом случае $K = 8-10$).

Экспериментально исследовалась возможность получения киноформных линз и корректоров aberrаций. Формировался рельеф с периодической линейно нарастающей и параболической формами, имеющий максимальную глубину 1,2 мкм и минимальный период 5 мкм. Фотошаблоны (увеличение 10 раз, $t_p = 6$ мкм, $l = 1 \dots 8$ мкм) изготавливались в пленках хрома по термохимической технологии. Экспонирование слоя фоторезиста (AZ-1450) проводилось на установке проекционной фотолитографии с уменьшением в 10 раз. Дифракционная эффективность некоторых образцов изготовленных линз (фокусное расстояние 25 мм, диаметр 5 мм) достигала 0,85, что приближается к теоретическому пределу для $K = 8-9$. На одной пластине $102 \times 102 \times 2,5$ мм изготавливалось до 50 одинаковых элементов. Дифракционная эффективность корректоров лежала в пределах 0,5–0,85 и определялась величиной экспозиции,

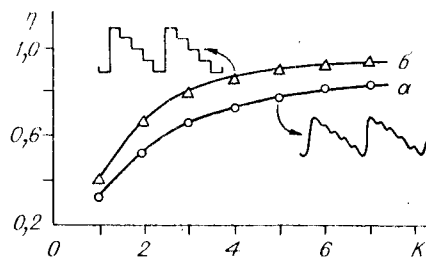


Рис. 9. Дифракционная эффективность киноформов, синтезированных по фоторастровой (а) и фотолитографической (б) технологии

которая намеренно варьировалась в диапазоне $\pm 20\%$ в сравнении с оптимальной.

Проведенное исследование показало, что:

использование принципа растривания для передачи полутоновых изображений позволяет применять стандартные фотонаблонь с хромовым покрытием;

предложенный метод дает возможность изготавливать на фотолитографическом оборудовании высокоэффективные элементы плоской оптики — киноформные линзы и корректоры aberrаций;

фоторастровый метод имеет наибольшие преимущества при изготовлении элементов с размером зон менее 10—20 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия.— 1985.— № 1.
2. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Kokoulin F. I. e. a. Fabricatin of kinoform optical elements // Optik.—1984.— 67, N 3.— S. 257.
3. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Прецизионный фотоцелостроитель для синтеза оптических элементов // Автометрия.— 1981.— № 3.
4. Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Корольков В. П. и др. Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков.— Новосибирск, 1986.— (Препр./СО АН СССР. ИАиЭ; 319).
5. Bryngdahl O. Computer-generated holograms as generalized optical components // Opt. Eng.— 1975.— 14, N 5.— P. 426.
6. Слюсарев Г. Г. Оптические системы с фазовыми слоями // ДАН СССР.— 1957.— 113, № 4.
7. Koronkevich V. P., Nagorni V. N., Palchikova I. G., Poleshchuk A. G. Bifocus microscope // Optik.— 1988.— 78, N 2.— S. 64.
8. Pat. 4099829 USA. Flat field optical scanning system/R. J. Straayer.— Опубл. 11.07.78.
9. Brenden B. B., Russell J. T. Optical playback apparatus focusing system for producing a prescribed energy distribution along an axial focal zone // Appl. Opt.— 1984.— 23, N 19.— P. 3250.
10. Bickel G., Häusler G., Maul M. Triangulation with expanded range of depth // Opt. Eng.— 1985.— 24.— P. 975.
11. Котлецов Б. И. Микроизображения: оптические методы получения и контроля.— Л.: Машиностроение, 1985.
12. Lee Ming-Chin, Tseng Chau-Jern, Huang Chien-Rong, Huang Tzer-Hsiang. A feasibility study on the use of amorphous silicon as optical recording medium // Jap. J. Appl. Phys.— 1987.— Pt. 1, N 2.— P. 193.
13. Полещук А. Г. Фоторастровый метод синтеза киноформов для лазерной техники // V Всесоюз. конф. «Оптика лазеров».— Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1986.

Поступила в редакцию 2 января 1989 г.