

Прикладная оптика

УДК 621.382

А.В. Волков

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ДЛЯ СИНТЕЗА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проанализированы способы изготовления поверхностного рельефа. Определены требования к микрорельефу, исходя из фазовой функции дифракционных оптических элементов. Рассмотрены методы формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов.

В истории физики дифракционные решетки выступают как один из самых незаменимых инструментов. До изобретения Майкельмоном интерферометра (1891г.), названного его именем, дифракционные решетки были единственным инструментом, с помощью которого измерялись характеристические длины волн атомных спектров.

Дифракционные решетки, как известно, были изобретены американским астрономом Девидом Риттенхаузом примерно в 1785г. и несколькими годами позже независимо Йозефом фон Фраунгофером, который опубликовал свои оригинальные исследования лишь в 1819г. В ранних конструкциях дифракционная решетка представляла собой ряд очень тонких проволочек или нитей, навитых на два параллельных винта, которые выполняли роль распорок. Эта конструкция представляла собой как бы многократно повторенную в пространстве щель, на которой модуляция падающего волнового фронта осуществляется при помощи чередующихся прозрачных и непрозрачных участков.

Более распространенными являются решетки, выполненные путем нанесения алмазным резцом тончайших канавок на поверхность стекла для пропускающих решеток или на зеркальные металлические поверхности для отражательных решеток.

Большой прогресс в производстве дифракционных решеток произошел после изобретения Роуландом в 1882г. [1] специальной гравировальной машины, которая наносила периодические штрихи с ошибкой, не превышающей одной трехсоттысячной доли дюйма. В настоящее время при изготовлении дифракционных решеток с помощью гравировальной машины достигнуты значительные успехи. Так, например, Харрисоном в Массачусетском технологическом институте получены решетки длиной до 26 см и полезной площадью до 360 см². Однако производство гравировальных решеток достаточно сложно и требует значительных затрат времени. Из-за трудностей, связанных с механическим изготовлением решеток, рассматривалось много других методов их изготовления.

В 1927г. Майкельсон впервые предложил использовать в производстве дифракционных решеток фотографический метод. В 1962г. Денисюк рассмотрел возможность получения дифракционных решеток с помощью записи интерференционных полос [1]. Современная технология позволяет получать периодическое гофрирование с помощью так называемого голографического метода. Рельеф решетки в этом методе создается путем интерферометрической экспозиции и обработки фоторезиста. Затем с помощью ионной бомбардировки или химического травления решетка переносится на подложку. Первые голографические решетки для спектроскопических исследований были изготовлены в 1967г. Шмалем и Рудольфом в оптической лаборатории Геттингенской обсерватории и в 1961г. Лабейри и Фламаном в Париже. С тех пор созданы решетки для видимого, УФ и мягкого рентгеновского диапазонов. В настоящее время существует возможность изготовления решеток шириной более чем 600 мм с плотностью линий более чем 10000 штрихов на миллиметр. Голографические решетки могут быть изготовлены на искривленной поверхности. Кроме того, в принципе можно создать решетки, период которых будет изменяться по поверхности и таким образом обеспечивать возможность фокусировки дифрагированных пучков [2]. Такой элемент, представляющий собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции, именуется как дифракционный оптический элемент (ДОЭ) [3].

1. Взаимосвязь микрорельефа с фазовой функцией ДОЭ

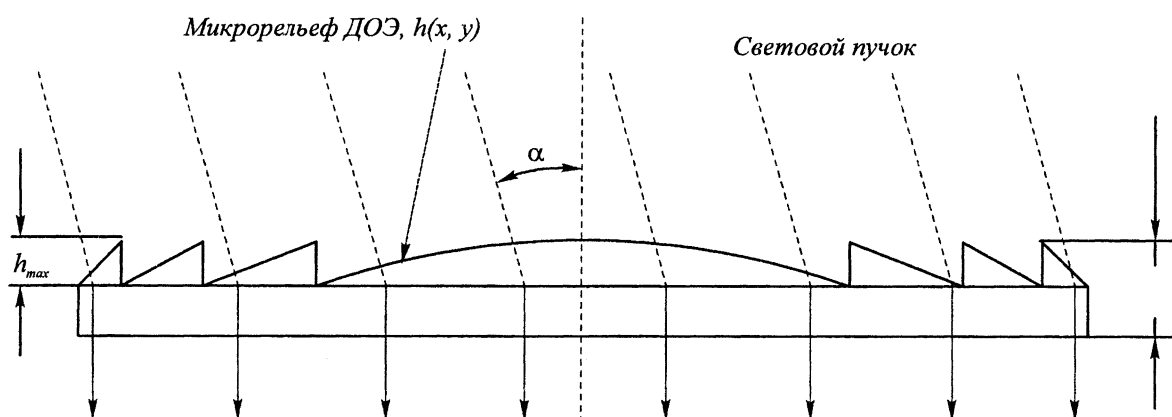
ДОЭ представляет собой зонную пластинку с дифракционным микрорельефом, отображающим фазовую функцию. На этапе проектирования ДОЭ рассчитывается его фазовая функция $\varphi(x,y)$ одним из методов, изложенных в [4]. Микрорельеф $h(x,y)$ связан с фазовой функцией $\varphi(x,y)$ соотношением [5]

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi(\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha)} \text{mod}_{2\pi m}(\varphi(x \cos \alpha, y)), \quad (1)$$

а в случае отражения световой волны –

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi \cos \alpha} \text{mod}_{2\pi m}(\varphi(x \cos \alpha, y)), \quad (2)$$

где $\text{mod}_{2\pi m}(t)$ – функция, равная наименьшему положительному остатку от деления t на $2\pi m$; $m=1,2,3,\dots$ – целое число, λ – рабочая длина волны, n – показатель преломления материала подложки, образующего микрорельеф, α – угол наклона плоского ДОЭ к оптической оси (рис. 1).



Р и с. 1. Оптическая схема работы ДОЭ

Микрорельеф, полученный по формулам (1) или (2) на основе непрерывной фазовой функции $\varphi(x,y)$, называют кусочно-непрерывным или микрорельефом с «блеском» [6]. Согласно формулам (1) – (2) высота рельефа принимает максимальные значения при значениях фазовой функции $\varphi(x,y)$ кратных $2\pi m$. Максимум высоты микрорельефа получается следующим:

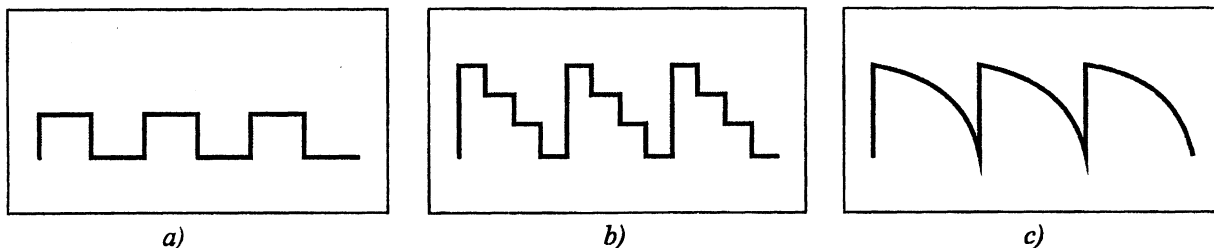
$$h_{\max} = \frac{m\lambda}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha} \quad (3)$$

или для отражающего

$$h_{\max} = \frac{m\lambda}{2 \cos \alpha}. \quad (4)$$

При этом общая толщина H реального оптического элемента обычно существенно больше h_{\max} на толщину подложки ДОЭ (см. рис. 1).

Для изготовления микрорельефа ДОЭ часто применяют технологии, которые не могут реализовать кусочно-непрерывный профиль ДОЭ. В этом случае еще на этапе проектирования решается вопрос о типе микрорельефа. Наибольшее распространение получили три типа фазового микрорельефа (рис. 2): бинарный, ступенчатый многоуровневый и кусочно-непрерывный.



Р и с. 2. Профили микрорельефов ДОЭ: а - бинарный; б - многоуровневый; в - кусочно-непрерывный

У бинарных ДОЭ высота микрорельефа принимает всего два значения в пределах одной зоны и определяется соотношением

$$h(x, y) = \begin{cases} 0, \varphi = 0; \\ h_{\max}, \varphi \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Многоуровневые ДОЭ имеют ступенчатый профиль микрорельефа в соответствии со ступенчатой аппроксимацией $\hat{\varphi}(x, y)$ фазовой функции. Функция $\hat{\varphi}(x, y)$ представляет собой квантованную фазовую функцию $\varphi(x, y)$ по M уровням с шагом $\Delta\varphi$, определяемым из соображений технологичности и эффективности ДОЭ. Для ступенчатого микрорельефа высота $h(x, y)$ определяется соотношениями (1) или (2), в которых вместо $\text{mod}_{2\pi m}(\varphi(x, y))$ используется квантованная фаза $\hat{\varphi}(x, y)$. Основной характеристикой ступенчатого рельефа ДОЭ с точки зрения технологии, является его адекватность профилю фазовой функции $\hat{\varphi}(x, y)$, т.е. наличие минимальных расхождений, обусловленных технологическими ошибками, которые приводят к снижению дифракционной эффективности ДОЭ.

Задача выбора типа микрорельефа решается еще на этапе проектирования ДОЭ. Ее решение определяется не только набором доступных разработчику технологий формирования дифракционного микрорельефа, но и требованиями к качеству работы и эффективности ДОЭ, предъявляемыми конкретной оптической схемой и функциональным назначением оптического элемента. Лучшие программные комплексы, созданные для проектирования ДОЭ, обязательно содержат средства, позволяющие оценить (например, визуально) снижение качества и энергетической эффективности работы ДОЭ при переходе от кусочно-непрерывного к многоуровневому или бинарному микрорельефу [7]. Разрабатываются специальные физико-математические методы, позволяющие повысить эффективность бинарных и многоуровневых ДОЭ [8].

Однако при любых используемых методах расчета и оптимизации фазовой функции ДОЭ качество работы оптического элемента, в конечном счете, определяется точностью формирования дифракционного микрорельефа. Существуют различные методы, реализующие запись фазовой функции на оптическую среду. Например, делительные машины позволяют непосредственно получать дифракционные решетки (в том числе с блеском), и, поскольку в данном случае границы зон представляют собой прямые линии, управление делительной машиной не требует реализации сложных алгоритмов. Существует также возможность непосредственного перевода на физическую среду радиально-симметричных и даже более сложных фазовых функций с помощью прецизионных механических станков с программным управлением [9,10]. Такая возможность реально используется для изготовления ДОЭ субмиллиметрового и дальнего ИК диапазона волн [11]. Весьма перспективен метод фотолитографии - многоступенчатое химическое травление стеклянной подложки [12], позволивший изготовить фокусаторы для $\lambda=10,6$ мкм с энергетической эффективностью около 90%. Для создания оптических элементов видимого диапазона применяют халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) [13], материалы с изменяющимся показателем преломления [14]. Перспективными методами получения кусочно-непрерывного микрорельефа являются методы, основанные на использовании жидких фотополимеризующихся композиций (ЖФПК) [15].

Особое внимание специалистов в области дифракционной оптики привлекают методы формирования микрорельефа, основанные на достижениях и оборудовании микроэлектроники [16]. Определяющими в таком выборе являются следующие факторы:

- близость геометрических размеров ДОЭ и микросхем;
- близость требуемых характеристик пространственного разрешения;
- высокий уровень автоматизации микроэлектронного оборудования и возможность реализации на нем сложных топологий зон;
- возможность получения многих градаций фазового микрорельефа;
- наличие множества технологических участков микроэлектроники и возможность аренды оборудования;
- высокая степень надежности технологических автоматов и повторяемость результатов;
- возможность использования материалов, имеющихся в микроэлектронике (субстраты, резисты и т.п.);
- наличие автоматизированных средств контроля параметров.

Высокая степень автоматизации технологических операций микроэлектроники позволяет говорить об автоматизированном проектировании дифракционного микрорельефа оптических элементов. Такое проектирование включает в себя не только выбор специальных методов, учи-

тывающих технологические ограничения, но и возможность итерационной оптимизации важнейших параметров ДОЭ на основе анализа результатов контроля качества получаемого микрорельефа и эффективности работы ДОЭ в оптической схеме.

Таким образом, задача создания ДОЭ с требуемыми свойствами состоит из следующих основных этапов:

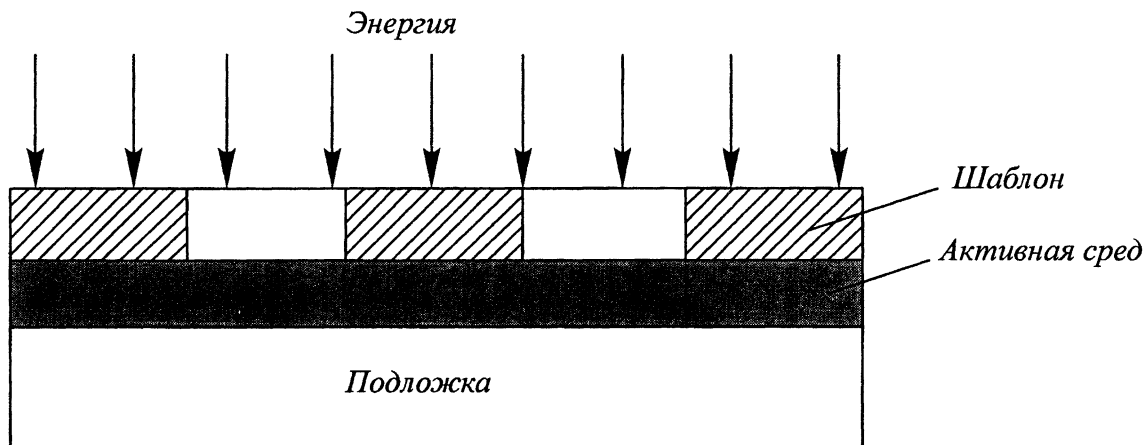
- анализ исходных данных и выбор математического обеспечения синтеза ДОЭ;
- компьютерное проектирование микрорельефа ДОЭ и метода его формирования;
- расчет и изготовление (для ряда технологий – виртуальное) на прецизионном оборудовании амплитудной маски или комплекта бинарных масок;
- формирование микрорельефа;
- экспериментальное исследование микрорельефа и тестирование ДОЭ;
- копирование микрорельефа и тиражирование оптических элементов.

При этом выбор размера, формы, используемого материала, пространственного разрешения проектируемого микрорельефа определяется как задачами, стоящими перед ДОЭ, так и оптическим диапазоном работы ДОЭ. Например, возможные границы пространственного разрешения дифракционной решетки могут лежать в пределах от 1200 мм^{-1} в УФ до $0,25 \text{ мм}^{-1}$ и грубее в ИК и субмиллиметровом диапазонах.

В связи с этим в производстве ДОЭ, исходя из индивидуальных требований, предъявляемых к микрорельефу, используется большое количество технологий и комбинации технологических операций.

2. Методы формирования ступенчатого микрорельефа ДОЭ

Модельное представление большинства метода формирования микрорельефа ДОЭ отражено на рис. 3. Изменения приведенной к рабочему интервалу $[0, 2\pi]$ фазовой функции ДОЭ представляются изменениями пропускания маски (шаблона), реально или виртуально генерируемой на одном из автоматизированных прецизионных устройств. При целенаправленном подводе энергии (засветке) через шаблон активная среда изменяет свои свойства в засвеченных участках и формирует структуру, которая либо сама является дифракционной решеткой (как в слоях ЖФПК), либо способствует созданию ее путем травления подложки.



Р и с. 3. Модельное представление процесса формирования микрорельефа

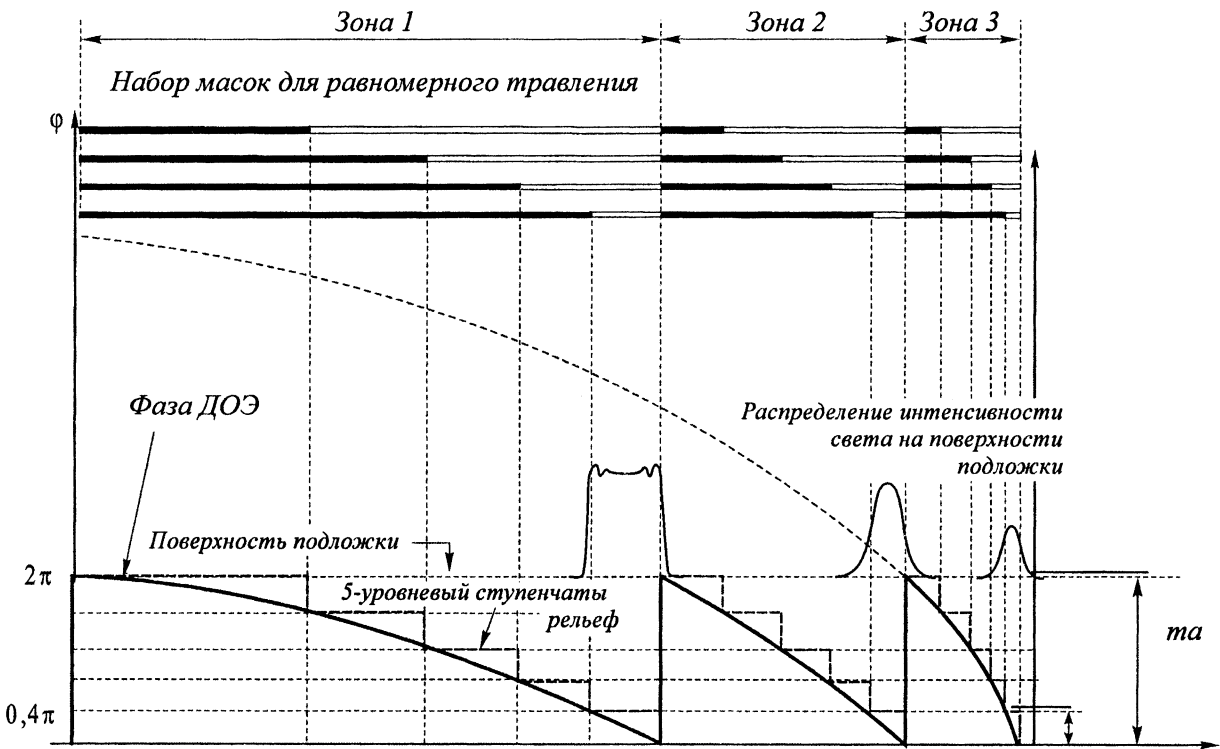
В настоящее время для формирования дифракционного микрорельефа апробировано и отлажено множество методов с использованием самых разнообразных (физически, химически, механически) активных сред: фокусируемых электронных и ионных пучков (электронная и сухая литография), газов, кислот, резистов, полимерных композиций, алмазных резцов. При этом разные технологии требуют создания разных шаблонов: наборов бинарных фотомасок для фоторезистов и фотолитографии, полутонковых фотошаблонов для ЖФПК и отбеливания желатины, тонкомембранной пленки для рентгеновской литографии или маски-графарета для использования ионно-лучевой литографии. При использовании полутонковых шаблонов и соответствующих технологий формирование кусочно-непрерывного микрорельефа происходит в один этап (методы формирования кусочно-непрерывного рельефа будут рассмотрены отдельно). При использовании набора бинарных шаблонов и соответствующих «бинарно-активных» сред для получения многоуровневого рельефа процесс, показанный на рис. 3, приходится повторять не-

сколько раз, перебирая по очереди все шаблоны из набора. Для ряда современных методов (электронно-лучевая литография, станки с ЧПУ) реального изготовления физического существующего шаблона (или набора шаблонов) не происходит: в этих случаях формирование микро-рельефа происходит на основе программно - рассчитанного виртуального шаблона.

3. Формирование микро-рельефа с использованием метода фотолитографии

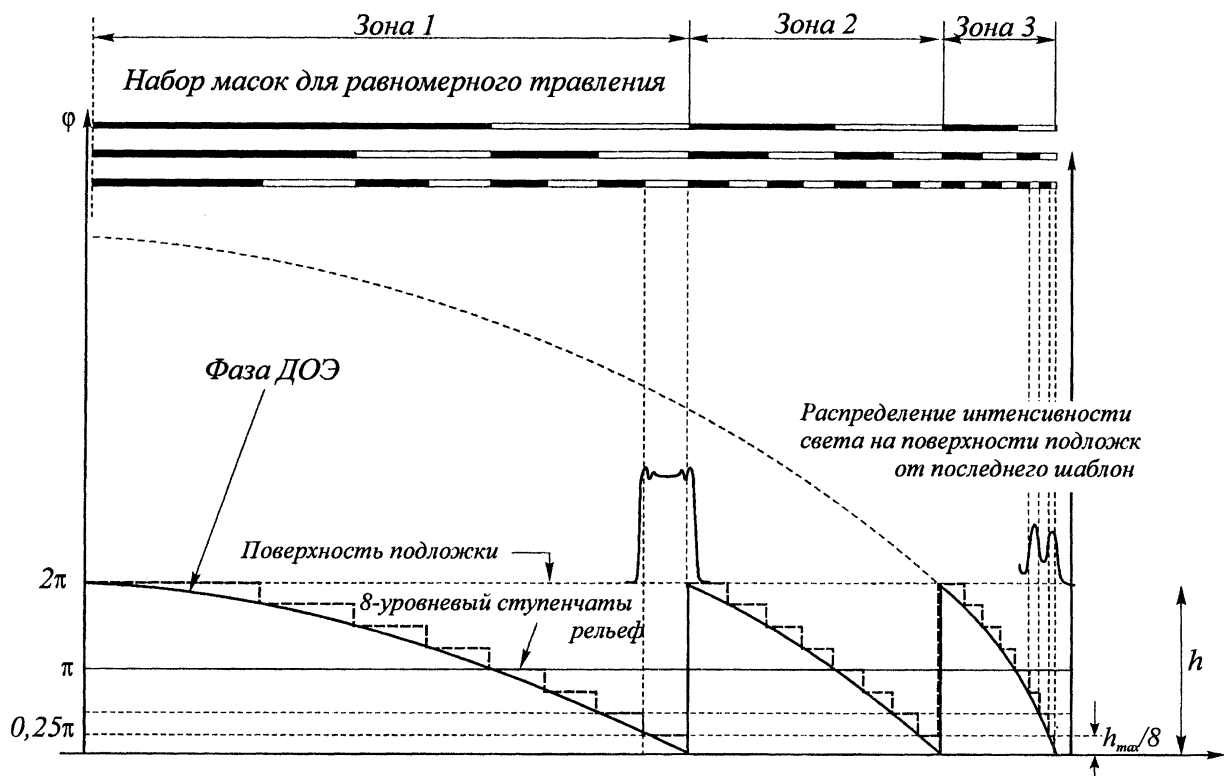
Наибольшее распространение среди методов формирования многоуровневого рельефа получила фотолитография. При анализе особенностей формирования многоуровневого микро-рельефа используются получившие широкое распространение методы, терминология и оборудование фотолитографии.

Для получения ступенчатого многоуровневого микро-рельефа ДОО методами фотолитографии используют наборы фотомасок, сгенерированных одним из двух способов: линейный – для равномерного травления субстрата подложки [17]; дихотомический – для неравномерного (ступенчатого) травления [18]. Линейный способ создания ступенчатого микро-рельефа характеризуется тем, что все уровни рельефа получаются травлением субстрата подложки на одну величину: $h_s = h_{max}/M$. Количество масок в наборе определяется количеством уровней квантования фазы M , но, поскольку первый уровень соответствует нетронутой плоскости субстрата подложки (рис. 4), количество масок получается на одну меньше, чем число уровней фазы, т.е. равно $M-1$.



Р и с. 4. Метод равномерного травления

Суть формирования микро-рельефа ДОО неравномерным травлением заключается в том, что на каждом последующем шаге литографии субстрат подложки травится до глубины ровно в два раза меньшей, чем предыдущий. При этом на первом этапе получают бинарный микро-рельеф с глубиной травления $h_{max}/2$, где h_{max} определяется по формулам (3), (4). Дихотомический метод определяет не только глубину травления микро-рельефа на каждом шаге, но и принцип синтеза фотомасок ДОО, который характеризуется двукратным увеличением числа линий в пределах одной зоны (рис. 5) при переходе к каждому следующему фотошаблону. При выбранном числе уровней квантования M минимальная ширина линии на последнем шаблоне, используемом при дихотомическом методе, совпадает с минимальной толщиной линии (порядка Z_{min}/M) на последнем шаблоне для равномерного травления. Количество необходимых шаблонов в первом случае значительно меньше (в $(M-1)/\log_2 M$ раз), а количество линий внутри зоны на последнем шаблоне в $M/2$ раз больше, чем при равномерном травлении.



Р и с. 5. Метод неравномерного травления микрорельефа ДОО

При неравномерном травлении количество уровней квантования фазы находится в степенной зависимости от количества масок в наборе:

$$M = 2^N, \quad (6)$$

где N - количество фотомасок.

Таким образом, с помощью трех масок можно изготовить восьми уровневый микрорельеф ДОО, причем на каждом шаге мы получаем работоспособный элемент, а все последующие этапы увеличивают его энергетическую эффективность. Существенным недостатком метода можно считать большую чувствительность метода к ошибке совмещения и искажениям ширины линий, например, вследствие ошибок режимов экспонирования – проявления и/или генерации фотомасок на записывающем устройстве.

Чередующиеся темные и светлые линии на фотошаблоне в крайних зонах ДОО вместе ведут себя как квазипериодическая дифракционная решетка, и чем выше пространственное разрешение фотошаблона, тем сильнее различие при экспонировании между амплитудой и профилем интенсивности излучения на поверхности подложки в центре и на краю ДОО.

С точки зрения оценки реализуемости ДОО с использованием метода фотолитографии существует несколько параметров, характеризующих как сам ДОО, так и процесс его синтеза.

Одним из самых важных характеристических параметров ДОО является ширина наименьшей (обычно крайней) зоны, которую для дифракционной линзы в параксиальном приближении можно оценить выражением

$$Z_{\min} = \frac{\lambda f}{a}, \quad (7)$$

где f – фокусное расстояние, a - радиус апертуры ДОО.

Также необходимо принимать в расчет и то, что для каждой фотомаски с номером $i=1,2,3,\dots$ минимальная ширина линии в экстремальной зоне ДОО будет существенно меньше и, например, при неравномерном травлении, равна

$$Z_{\min}^i = \frac{Z_{\min}}{2^i}, \quad (8)$$

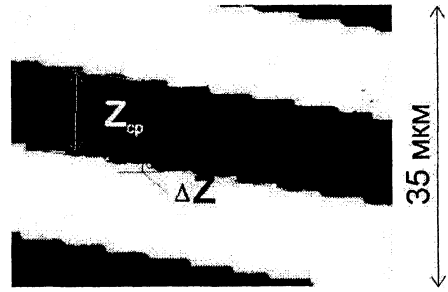
благодаря чему ширина линии может уменьшиться до значений, практически не воспроизводимых оборудованием. В этом случае необходимо выбирать параметры ДОО в соответствии с возможностями технологии.

Параметры ДОО выбирают с таким расчетом, чтобы выполнялся принцип реализуемости и, желательно, максимальной эффективности ДОО. О ДОО, созданных с помощью пленочных фотошаблонов, можно сказать, что неровность края и отношение шероховатости края к толщине

не линии сильно влияют на эффективность, которая после всего процесса изготовления может оказаться в пределах 60%.

Микролитография нарушает лежащий в основе прецизионной инженерии принцип, когда отношение шероховатости края линии к ее ширине $\Delta Z / Z$ (рис. 6) должно быть выдержано порядка 1:10000.

Для концентрических ДОЭ это означает, что ширина линии должна быть как минимум в десять тысяч раз больше, чем разрешающая способность записывающего устройства. С учетом количества уровней фазы M допустимая для реализации ширина наименьшей зоны становится чрезвычайно большой, что ограничивает применимость ДОЭ. Поэтому заведомо идут на нарушение этого принципа в угоду уменьшению отношения фокусного расстояния к диаметру апертуры d :



Р и с. 6. Неровность края линии металлизированного фотошаблона ДОЭ

$$F\# = \frac{f}{d} \quad (9)$$

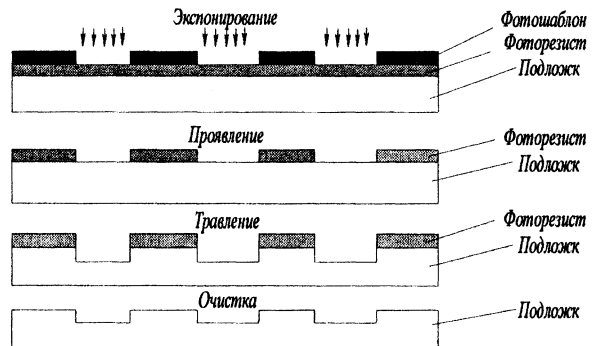
На практике можно считать уже приемлемым отношение $\Delta Z / Z = 1:10$. Благодаря этому фотомаски ДОЭ для среднего ИК диапазона ($\lambda = 10,6$ мкм) можно выводить с погрешностью около 10% относительно шероховатости края линии. Например, для ДОЭ с $F\#/5$ (что означает отношение $f/d=5$) ширина крайней зоны может быть равна 5λ , тогда при 8 уровнях ступенчатого рельефа минимальная ширина линии порядка $5\lambda/8$, т.е. для $\lambda = 10,6$ мкм - около 6 мкм. Изготовить такой рельеф возможно с использованием фотоуменьшительной техники, высокоразрешающих записывающих устройств или на основе принципиально других методов формирования микрорельефа. Однако и в рамках обычной контактной фотолитографии это выполнимо, если принять во внимание, что изогнутую линию крайней зоны ДОЭ можно корректно отобразить только линией, чья ширина превышает размер сфокусированного записывающего пятна spot вместе с минимальным шагом перемещения каретки записывающего устройства $\Delta step$. Поэтому в оценке параметров записываемого ДОЭ следует учитывать следующее соотношение:

$$(spot + \Delta step) \leq \frac{f\lambda}{a} \frac{1}{M} = \Delta r \quad (10)$$

Например, для $spot = 10$ мкм, $\Delta step = 10$ мкм, $\lambda = 0,5$ мкм и восьми уровневого ступенчатого микрорельефа минимальное реализуемое соотношение фокусного расстояния к диаметру апертуры становится равным $F\#/320$, т.е. для линзы с апертурой 10 мм фокусное расстояние не может быть меньше, чем 1600 мм. Ясно, что при таких условиях без дополнительных мер, например, фотоуменьшения масок, создать ДОЭ видимого диапазона практически невозможно. Однако для фокусаторов среднего ИК диапазона ($\lambda = 10,6$ мкм) фокальное число $F\#$ уже становится порядка 16 – 20, т.е. для апертуры 40 мм фокусное расстояние может быть равным 400 мм.

Перенос рисунка фотошаблона в поверхностный слой субстрата методом фотолитографии происходит в четыре стадии (рис. 7): экспонирование слоя фоторезиста через шаблон и образование скрытого изображения; проявление и задубливание рисунка, т.е. формирование защитной маски; травление поверхностного слоя субстрата на незащищенных участках; очистка поверхности подложки от остатков фоторезиста [19,20].

На каждой из стадий процесса действуют факторы, искажающие исходный рисунок фотошаблона. Так, при экспонировании имеют место явления дифракции, преломления и отражения света, приводящие к изменению размеров элементов рисунка и размытости их краев. На этапе проявления и задубливания искажения размеров обусловлены набуханием слоя фоторезиста и

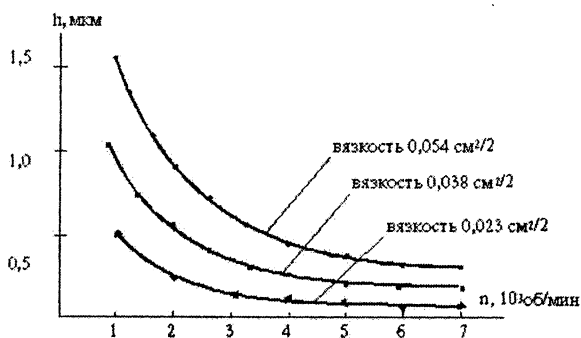


Р и с. 7. Процесс формирования микрорельефа в подложке

усадкой фотомаски при тепловой обработке. При травлении главным фактором является боковое подтравливание под маску. Условия, в которых происходит обработка на разных стадиях, изменяются как от пластины к пластине, так и в пределах одной пластины. Это приводит к разбросу размеров элемента и его параметров, что следует учитывать при выборе методов формирования микрорельефа ДОО.

4. Формирование дифракционного микрорельефа послойным наращиванием фоторезиста

Особенность метода состоит в том, что ступенчатый рельеф формируется путем многократного нанесения фоторезистивных слоев (слой на слой), прошедших этапы засветки через соответствующий фотошаблон и все процессы обработки [21].

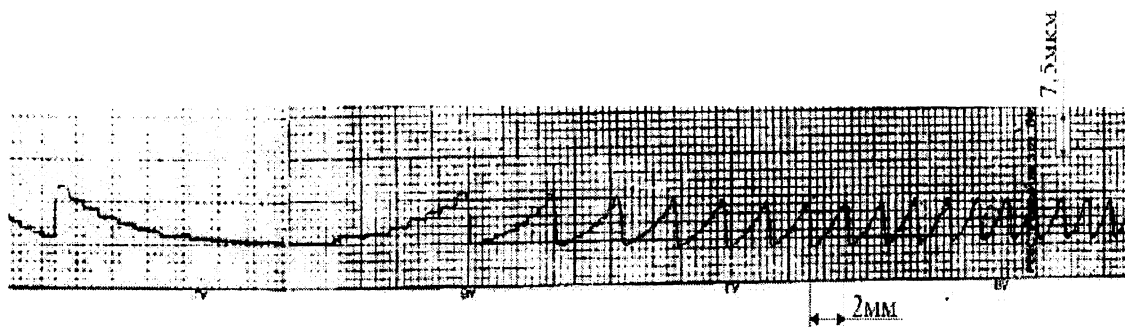


Р и с. 8. Зависимость толщины пленки от числа оборотов центрифуги для разных типов вязкости фоторезиста

Фоторезист (на основе нафтохинондиазидов) наносится методом центрифугирования на стеклянную подложку с плоскостностью 1-4 кольца Ньютона по всей поверхности. Определяющим фактором в данном процессе является толщина фоторезистивного слоя. Для стандартного фоторезиста ФП-051 отработаны технологические режимы получения слоев определенной толщины во взаимосвязи вязкости и скорости вращения центрифуги (рис. 8).

Стабильность толщины наращиваемого слоя обеспечивается оптимизацией процессов с фиксированием вязкости фоторезиста и стабилизацией скоростных характеристик

центрифуги [23]. Профилограмма фокусатора лазерного излучения в «отрезок» представлена на рис. 9.



Р и с. 9. Фрагмент профилограммы фокусатора в «отрезок»

Профилограмма свидетельствует о высоком качестве микрорельефа при сравнительно простой технологии его изготовления.

5. Формирование микрорельефа ДОО с использованием электронно-лучевой литографии

Принципиальным отличием электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) от традиционной оптической (фотолитографии) является использование в качестве инициаторов физико-химических процессов в резисте высокоэнергетических электронов [24]. Учитывая дифракционные ограничения фотолитографии в сочетании с известными квантово-механическими представлениями о свободном движении микрочастиц, можно утверждать о существенных преимуществах ЭЛЛ в части разрешающей способности при формировании микрорельефа.

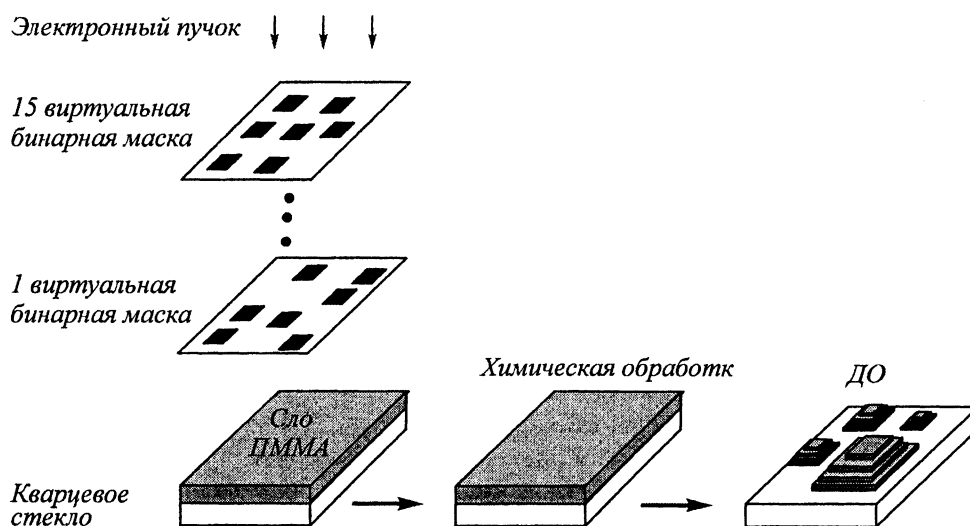
ЭЛЛ на подложке особенно необходима, когда важны гибкость и достижение высокой разрешающей способности. Существующие типы установок ЭЛЛ [25] могут быть с успехом использованы в мелко- и среднесерийном производстве структур, таких как ДОО. Учитывая современный опыт использования ЭЛЛ, по прогнозам специалистов можно ожидать увеличение

производительности электронно-лучевых установок до уровня рентабельности широкого промышленного использования при изготовлении ДОЭ.

Следует отметить, что при существующих требованиях к разрешающей способности ДОЭ не исключается возможность использования эталонных шаблонов, полученных ЭЛЛ. Последние имеют то преимущество, что при использовании достижений оптической литографии обеспечивают более короткий рабочий цикл мелкосерийного производства ДОЭ с сохранением приемлемого уровня качества.

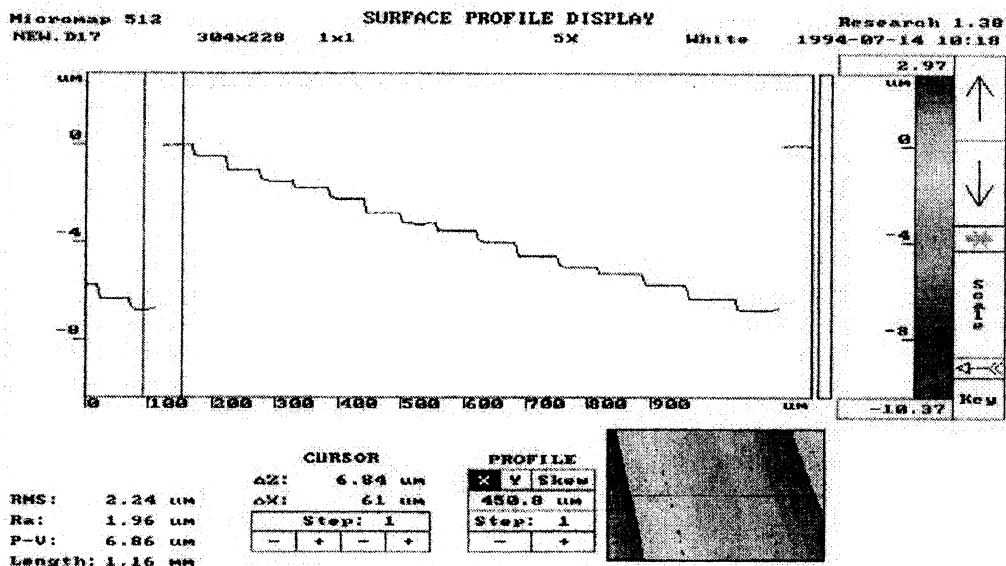
Реализация элементов с заданным числом уровней квантования фазы (обычно 2-16 уровней) для работы в видимом диапазоне с использованием пошагового процесса литографического травления резиста на основе полиметилметакрилата (ПММА), нанесенного на кварцевое стекло, представлена в [26,27]. По рассчитанной полутонковой фазовой маске элемента составляется комплект бинарных файлов (виртуальных бинарных масок), определяющих пошаговый процесс литографического травления резиста. Значения фазовой функции, лежащие в промежутке $[0, 2\pi)$, трансформируются в соответствующее значение толщины микрорельефа пропускающего элемента с учетом показателя преломления резиста.

Количество бинарных файлов виртуальных бинарных масок на единицу меньше количества уровней квантования. Схематичное изображение процесса изготовления элемента представлено на рис. 10. М-уровневый микрорельеф формируется с помощью (M-1)-кратного электронного травления с помощью электронного литографа ZVA 23N Jenoptik GmbH по соответствующим виртуальным бинарным маскам. Разогрев резиста, возникающий из-за попикселевой процедуры травления, может привести к отклонениям от заданного микрорельефа. Для уменьшения этого отрицательного влияния на параметры микрорельефа рекомендуется сначала осуществлять травление лишь на 80% расчетной глубины, замерить реально полученную глубину травления оптическим профилометром и завершить процедуру травления одним или несколькими дополнительными циклами «травление – профилометрия». С целью увеличения эффективности этой процедуры для замера глубины протрава может использоваться регулярная тестовая структура вместо нерегулярного сложного дифракционного профиля. Обычно такая тестовая структура размещается на подложке вне апертуры ДОЭ, чтобы не нарушать функцию комплексного пропускания ДОЭ.



Р и с. 10. Последовательность операций формирования многоуровневой структуры

Для контроля сформированного микрорельефа использовался интерферометрический микропрофилометр MICROMAP-512 с разрешением 3 мкм. На рис. 11 представлен результат профилометрического исследования фрагментов микрорельефа фокусатора в прямоугольник, изготовленного шестнадцатилетним травлением кварцевого стекла.



Р и с. 11. Профилограмма микрорельефа

Представленная профилограмма позволяет говорить о высоком качестве проработки микрорельефа, а исследования показали хорошее соответствие полученных результатов параметрам итерационно рассчитанного элемента.

6. Методы формирования микрорельефа с непрерывным профилем зон

Для ДОО, с точки зрения одностадийной технологии и приближения физической реализации к расчетным значениям фазовой функции (как отмечалось ранее), наиболее оправдано создание рабочих зон с непрерывным профилем микрорельефа. В настоящее время существует довольно большое количество методов, позволяющих получать микрорельеф с непрерывным профилем различной высоты и разрешения:

- отбеливание фотоматериалов;
- проявка полутонного фоторезиста;
- вымывание задубленной желатины или материала “целлофот”;
- использование массопереноса в полимерных средах;
- лазерно-стимулированное травление;
- травление полимерных материалов жестким УФ – излучением.

Все они характеризуются своими особенностями и проблемами. Универсального метода, позволяющего создавать непрерывный профиль микрорельефа со сложным рисунком на поверхности и высотой от долей до десятков мкм для разных областей спектра оптического диапазона, в настоящее время нет.

Наиболее известны и доступны способы получения непрерывного рельефа на желатиновых слоях [28-30]. Особенность использования желатина в качестве рельефообразующего материала заключается в необходимости сильного задубливания его в тех местах, где должна быть большая высота рельефа, с последующим вымыванием в горячей воде менее задубленного слоя. Существует по крайней мере три хорошо известных способа селективного задубливания желатина:

- метод дубящего проявления;
- дубящее отбеливание фотографических слоев с галогенидами серебра;
- световое дубление бихромированного желатина.

Для достижения высоких пространственных частот (свыше 1000 мм^{-1}) при высотах рельефа порядка 0.1 - 0.3 мкм используются сложные способы проявления, включая термодубление и обработку в растворе серной кислоты. Однако при высотах рельефа порядка нескольких микрон резко падает пространственное разрешение и вследствие разной задубленности при изготовлении пластинок максимально достижимая высота рельефа может отличаться в 2 - 3 раза.

Еще недавно широко использовался метод формирования микрорельефа с использованием бихромированного желатина (БХЖ). На начальном этапе освоения производства ДОО эта желатиновая технология дала определенные положительные результаты. Однако относительно простой метод формирования микрорельефа на основе БХЖ не нашел широкого применения в

производстве ДОЭ, главным образом, из-за шероховатости поверхности микрорельефа, снижающей его эффективность и не превышающей 60%, и ограниченной разрешающей способностью, не позволяющей выполнять элементы с числовой апертурой выше 0.1.

Светорассеяние присуще всем технологиям, основанным на вымывании полимерных материалов с различной степенью полимеризации или задубленности, что обусловлено интенсивным растворением материала в жидком проявляющем растворе. Поэтому изготовление качественных элементов представляет определенную трудность.

7. Формирование микрорельефа в слоях ЖФПК

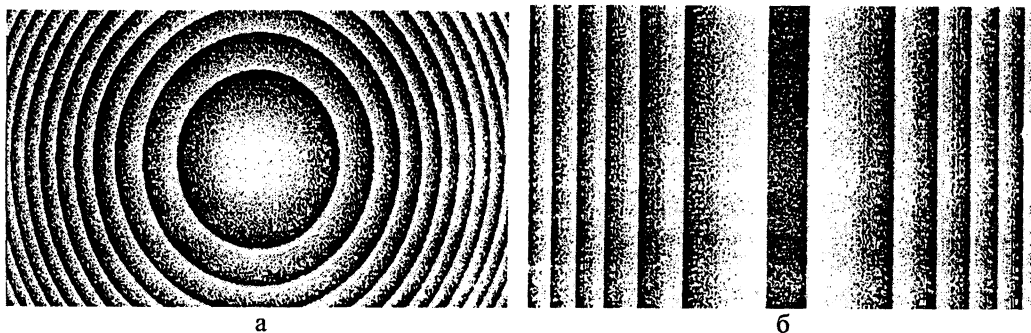
Несколько подробнее следует остановиться на рассмотрении метода, основанного на применении ЖФПК [31-33]. ЖФПК - это композиции на основе олигомеров и мономеров органической природы, имеющие в своем составе фотоинициатор, позволяющий производить отверждение в результате реакции радикальной полимеризации под действием актиничного светового излучения. Наибольшее распространение в голографии нашли композиции на основе олигомеров уретановой природы [34]. Это недорогие доступные материалы, допускающие химический синтез с высокой чистотой состава и воспроизводимостью параметров. При отверждении они образуют сетчатые полимеры в стеклообразном или эластичном состоянии, обладающие высокой лучевой прочностью 500 Мвт/см² для излучения наносекундной длительности и имеющие окно прозрачности 0,35 - 2 мкм [35].

Для описания физики процесса записи микрорельефа, исходя из термодинамических представлений о трехмерной полимеризации [36], можно ограничиться рассмотрением элементарной ячейки, представленной в виде контактирующих между собой областей узла и пучности светового поля, и возможностью диффузионного обмена частицами между ними.

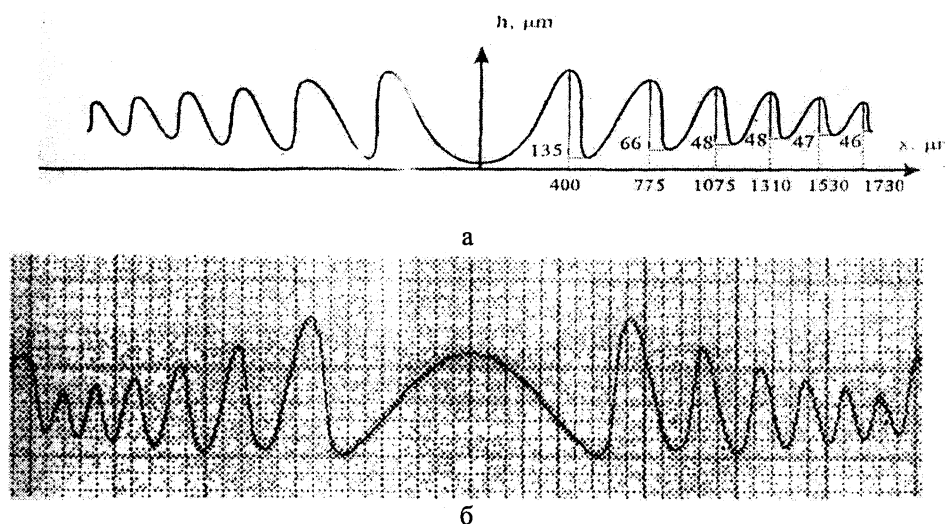
Инициирование полимеризации в пучности поля приводит к снижению количества молекул олигомера и возрастанию молекул полимера, что вызовет появление полимерного геля и возникновение растущего градиента концентрации между полимерным гелем и остающимся олигомером. После гелеобразования в пучности поля подвижность молекул полимера оказывается ограниченной, происходит как бы пространственная фиксация образовавшегося полимера на ограничивающих слой поверхностях. При этом начинается процесс взаимодиффузии олигомера и полимера между узлом и пучностью. Установление термодинамического равновесия оказывается возможным лишь при диффузии олигомера в гель. Направление диффузии определяется знаком изменения химического потенциала олигомера внутри геля. Если он отрицателен, олигомер диффундирует в полимер (аналогично "набуханию" полимера в собственном олигомере), если положителен - олигомер вытесняется из геля (аналогично "отбуханию" полимерного геля в растворе полимерных цепей в олигомере) и в случае взаимной компенсации всех изменений свободной энергии процесс массопереноса отсутствует, т.е. определяющим фактором является характер взаимодействия олигомера с собственным полимером, и процесс рельефообразования усиливается при использовании олигомеров с хорошим термодинамическим средством к собственным полимерам.

Таким образом, экспозиция проводится до такой степени конверсии первоначально жидкого олигомера, когда он превращается в мягкий резиноподобный слой. На поверхности этого слоя можно сразу наблюдать рельефный рисунок экспонируемого фотошаблона, высота которого составляет порядка 1/20 части от конечной максимально возможной высоты и имеет тенденцию к увеличению в темноте за счет эффекта массопереноса [37]. В свою очередь, максимально возможная высота составляет 1/3 от толщины первоначально жидкого слоя. Поэтому полученный образец помещается в темное место на время от нескольких часов до 3 суток, в зависимости от того, какую высоту рельефа необходимо получить. Это так называемое время темнового роста. Поскольку светочувствительность к видимому свету достаточно мала, это позволяет вести периодический контроль, не опасаясь засветки микрорельефа во время темнового роста. При достижении необходимой высоты производится фиксирование путем общей засветки УФ - излучением в вакууме. При этом проходит полная полимеризация, и микрорельеф приобретает свойства жесткого пластика, с которого можно снимать копии, напылять металл, переносить в подложку травлением в плазме и т.д.

На основе этой технологии были изготовлены ДОЭ видимого диапазона. На рис. 12 и 13 показаны фотошаблоны микролинз и профилограммы их микрорельефа.



Р и с. 12. Фотошаблоны микролинз: а – сферическая, б – цилиндрическая



Р и с. 13. Профилограммы рельефа микролинз соответственно (масштаб: по вертикали - 20 мкм/кл., по горизонтали – 50 мкм/кл.)

При толщине подслоя 50 мкм изображение зон ДОЭ "размывается" на величину 2 - 3 мкм. Пройдя сквозь слой ЖФПК, изображение края деградирует еще сильнее. В нижней части ЖФПК "нерезкость" края в пределах 4 мкм. Из этого можно сделать вывод, что контактный способ проекции изображения в ЖФПК в нашем случае имеет разрешающую способность порядка 200мм^{-1} .

С использованием рассмотренных методов формирования микрорельефа разработаны и изготовлены ДОЭ для ИК и видимого диапазонов, работающих как на просвет, так и на отражение.

8. Формирование микрорельефа ДОЭ с использованием полутонной маски на основе DLW стеклянных пластинок

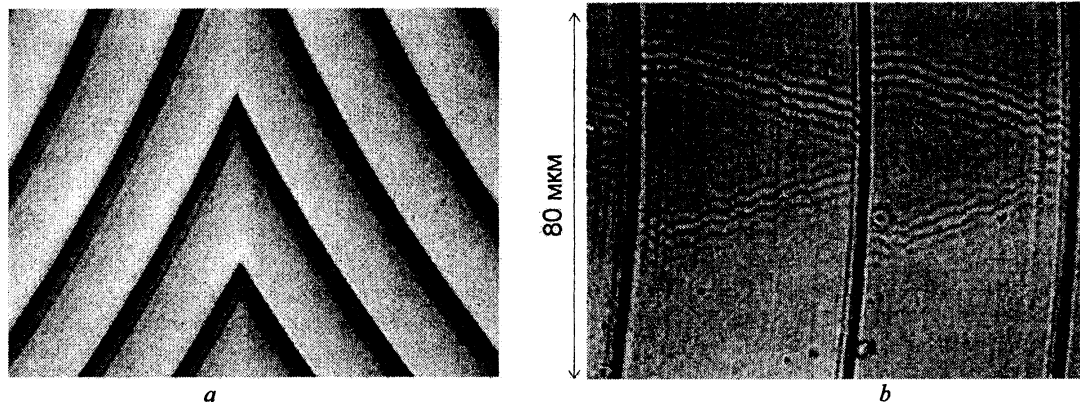
Метод, позволяющий реализовать фазовую функцию элемента в виде кусочно-непрерывного микрорельефа, описан в работах [38-40] и представляет одношаговый метод формирования микрорельефа за счет применения полутонной маски на основе (Direct Laser Write glass photoplates) DLW стеклянных пластин.

DLW стеклянные пластинки - это монолитные, химически обработанные пластины из силикатного стекла, без какого-либо покрытия, содержащие окрашенные частички серебра в слое толщиной около 1 мкм у поверхности стекла. Сфокусированный лазерный луч любой длины волны в спектральном диапазоне от ближнего УФ до инфракрасного может быть использован для обесцвечивания нагреванием этих окрашенных частичек серебра. За счет нагревания часть или все окрашенные частички серебра могут переходить в бесцветные ионы серебра. Пропускание DLW стеклянных пластинок увеличивается с увеличением плотности энергии записывающего сфокусированного лазерного пучка.

Экспозиция этой полутонной маски выполнена на лазерной записывающей установке. Это позволяет использовать существующее программное обеспечение, уже написанное для изготовления бинарных масок, для достижения прямой записи по фоторезисту при изготовлении

ДОЭ. Таким образом, сгенерированные полутонные маски могут быть использованы в оптической литографии (проекторная или контактная печать) для массового производства резистных профилей, обеспечивая отсутствие ошибок совмещения. Запись маски осуществляется за счет использования различных плотностей энергии лазерного пучка для генерации полутонов.

На рис. 14,а представлен фрагмент раstra микролинз прямоугольной формы. Фазовая функция микролинзы рассчитана с параметрами: размер 1.4 x 2 мм, фокусное расстояние – 25 мм, число уровней фазы – 8. Размещение раstra на подложке – симметричное относительно центра вращения; он содержит 9 микролинз. Запись осуществлялась многопроходным экспонированием с эффективным размером пятна 0,9 мкм. Микроинтерферограмма нескольких зон микролинзы (рис. 14,б) получена с помощью телевизионной приставки «VIKAM» к микроинтерферометру МИИ-4 с последующей обработкой данных на компьютере.



Р и с. 14. Фрагмент фотосаблона раstra микролинз (а) и микроинтерферограмма нескольких зон (б)

Симметрично расположенные полосы интерферограммы появились в результате отражения света от поверхности подложки. Субмикронное разрешение было получено в LDW-стеклянных пластинках с использованием лазерных пучков различных видимых длин волн, сфокусированных объективом с числовой апертурой $NA=0.25$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каледин Б.Ф., Мальцев М.Д., Скороходов А.И. Производство оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1981. 98 с.
2. Элементы оптоэлектронных устройств /Под ред. П.И.Госкова. Барнаул: БГУ. 1969. 153 с.
3. Сойфер В.А. Введение в дифракционную микрооптику. Самара: СГАУ. 1996. 94 с.
4. Программное обеспечение по компьютерной оптике / С.Г. Волоотовский, М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, П.Г. Серафимович, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов, А.Е. Царегородцев // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1995. № 14-15. С. 94-106.
5. Soifer V.A., Golub M.A. Diffractive micro-optical elements with non-point response // Proceedings SPIE, 1992, № 1751. P.140-154.
6. Bryndahl O. Formation of Blazed Grating. // J. Opt. Soc. Am. 1970. № 60. P. 140-145.
7. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Расчет двухпорядковых фокусаторов // Автометрия, 1993, № 1. С. 58-63.
8. Curcio M. Diamond machining of infrared optics utilizing two-axis machine technology // Proceedings SPIE. 1981. № 306. P. 105-113.
9. Clark P.P., Londono C. Production of kinoform by single point diamond machining // Optics News. 1989. № 15. P.39-40.
10. Булатов Е.Д., Гридин С.А., Даниленко А.А. Изготовление элементов плоской оптики миллиметрового и субмиллиметрового диапазона на серийных промышленных станках с числовым программным управлением // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1987. № 1. С. 167-173.
11. Sweeney D.W., Sotmargren G.E. Harmonic diffractive lenses //Applied Optics. 1995. V. 34. № 14. P. 2469-2475.
12. Бобров С.Т., Туркевич Ю.Г. Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации. Л., 1978. С.73-77.
13. Гуревич С.Б., Ильяшенко Н.И., Коломиец Б.Т. Оптические методы обработки информации. Л.: Наука, 1974. С. 117-134.
14. Гейсрух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А. Оптика градиентных и дифракционных элементов. М.: Радио и связь, 1990.136 с.
15. Грищенко В.К., Маслюк А.Ф., Гундзера С.С. Жидкие фотополимеризующиеся композиции. Киев: Наукова думка, 1985. 143 с.
16. Введение в фотолитографию / Под ред. В.П. Лаврищева. М.: Энергия, 1997. 36 с.

17. *Swanson G.J.* Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements // Technical Report 854. Lincoln Laboratory. Cambridge: Mass. Inst. of Technology, 1989. 265 p.
18. *Golub M.A., Rybakov O.E., Uspleniev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G.* The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation // Optics & Laser Technology. Vol. 27. № 4. 1995. P. 215-218.
19. *Черняев В.Н.* Технология производства интегральных микросхем. М.: Энергия, 1977. 375 с.
20. *Ефимов И.Е., Козырь И.Я.* Основы микроэлектроники. М.: Высш. школа, 1983. 384 с.
21. *Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseyev O.Yu., Soifer V.A.* A Method for the Diffractive Microrelief Formation Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering. 1998. №29. P. 281-285.
22. *Готра З.Ю.* Технология микроэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
23. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Соифер В.А.* Методы формирования дифракционного микро рельефа на основе последовательного наращивания фоторезиста // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С.12-15.
24. *Электронно-лучевая литография в изготовлении микроэлектронных приборов: Пер. с англ. Под ред. Дж. Р. Брюэра.* М.: Радио и связь, 1984. 336 с.
25. *Вебер Э., Юрке Г.* Высокопроизводительные сканирующие электронно-лучевые системы в технологии ИС // Электроника. Т.50. № 23. 1977. С. 18-24.
26. *Duparre' M., Pavelyev V. S., Luedge B., Kley E.-B.; Kowarschik R., Soifer V. A.* Iterative calculation, manufacture and investigation of DOE forming unimodal complex distributions // Proceedings SPIE. 1997. Vol. 3110. P. 5-9.
27. *Duparre' M., Pavelyev V. S., Luedge B., Kley E.-B., Kowarschik R., Soifer V. A.* Forming of selected unimodal complex amplitude distributions by means of novel DOEs of MODAN-type // Proceedings SPIE. Vol. 3134 "Optical Manufacturing and Testing II". Н. Philip Stahl, ed.. 1997. P. 357-368.
28. *Бруй Е.Б., Корешев С.Н.* Особенности использования тонких слоев фотозмульсии ПЭ-2 для получения низкочастотных рельефных голографических структур // Оптика и спектроскопия. 1989. Т.67. В.3. С. 685-688.
29. *Корешев С.Н., Гиль С.В.* О форме профиля низкочастотных голограммных структур, получаемых на тонких слоях фотозмульсии ПЭ-2 // Оптика и спектроскопия. 1990. Т.68. №.2. 422 с.
30. *Гальперн А.Д., Смаев В.П., Селявко Л.В., Шелехов Н.С.* Рельефно-фазовые голограммы на галоидо-серебряных материалах и их копирование методом термополимеризации. // Высокоэффективные среды для записи голограмм. Сб. науч. тр. ЛФТИ. Л., 1988. С.100-107.
31. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Kharitonov S.I., Uspleniev G.V.* Focusators for Laser-Dranding // Optics and Lasers in Engineering. № 15. 1991. P. 24-32.
32. *Голуб А.М., Карнеев С.В., Мурзин С.П., Овчинников К.В., Соловьев В.С., Шинкарев М.В.* Автоматизированная технология изготовления фокусаторов ИК диапазона // Оптическая запись и обработка информации: Сб. науч. тр. КуАИ. Куйбышев, 1988. С. 14-18.
33. *Арефьев Е.Ю., Гилев В.А., Голуб М.А., Казанский Н.Л., Карнеев С.В., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Соловьев В.С., Тихонов Д.Н., Уваров Г.В.* Экспериментальное исследование плоского оптического элемента, фокусирующего в кольцо. // Компьютерная оптика. № 5. М.: МЦНТИ, 1989. С. 49-54.
34. А.С. №1624864. Способ изготовления рельефно-фазовых голограмм фокусирующих элементов / В.С. Соловьев, В.А. Соифер, И.Н. Сисакян, Ю.Б. Бойко, В.М. Гранчак, И.И. Дилунг.
35. *Карнеев С.В., Соловьев В.С.* Методы получения рельефных изображений с непрерывным профилем // Компьютерная оптика. № 4. М.: МЦНТИ, 1989. С. 34-36.
36. *Соловьев В.С.* Исследование поведения слоя жидкой фотополимеризующейся композиции во время рельефообразования // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1989. № 10-11. С. 21-24.
37. *Волков А.В., Волотовский С.Г., Гранчак В.М., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Соифер В.А., Соловьев В.С., Якуненкова Д.М.* Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях // ЖТФ. Т.65. № 9. 1995. С. 181-185.
38. *Перло П, Синези С., Рипетто М., Успенев Г.В.* Использование круговой лазерной записывающей системы для изготовления полутоновых шаблонов дифракционных оптических элементов на основе DLW glass пластинок // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1997, № 17. С.85-93.
39. *Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., и др.* Полутоновые фотошаблоны на основе DLW-стекло // Автометрия. 1998. № 6. С.27-37.
40. *Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г. и др.* Изготовление высокоэффективных ДОЭ с помощью полутоновых фотошаблонов на основе DLW-стекло // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 1998. № 18. С.121-126.