

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

УДК 535.4 : 621.317

**В. П. Корольков, А. И. Малышев, В. Г. Никитин, А. Г. Полещук,
А. А. Харисов, В. В. Черкашин, Ч. Ву**

(Новосибирск, Россия – Сан-Диего, США)

ПОЛУТОНОВЫЕ ФОТОШАБЛОНЫ НА ОСНОВЕ LDW-СТЕКЛОЛ

Описаны результаты исследования оптических свойств LDW-стекол под действием сфокусированного лазерного излучения в широком диапазоне скоростей сканирования пучка. Рассмотрены особенности изготовления полутонных фотошаблонов на лазерной записывающей системе с круговым сканированием. Обсуждаются результаты применения полутонных фотошаблонов для изготовления высокоэффективных дифракционных линз. Показана возможность воспроизводимого изготовления кварцевых линз с минимальной шириной зон ~ 8 мкм и дифракционной эффективностью 80–82 %.

Введение. В настоящее время одной из проблем, сдерживающих массовое применение дифракционной оптики, является разработка простого и дешевого метода получения непрерывного фазового профиля с высоким пространственным разрешением. Стандартная фотолитографическая технология на основе комплекта совмещаемых фотошаблонов не позволяет изготавливать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с высокой числовой апертурой ($NA > 0,2$) и большой глубиной фазового профиля (до 3–10λ в видимой части спектра). Методы прямой лазерной или электронно-лучевой записи на пленках фоторезистов позволяют создавать высокоэффективные и высококачественные ДОЭ, но только в единичных экземплярах. Многообещающей альтернативой этим методам является полутонная технология, в основе которой лежит применение полутонных фотошаблонов (ПФ) на основе материалов с коэффициентом поглощения, изменяющимся под воздействием лазерного или электронного пучка [1–5]. Полутонная технология позволяет применить как многократный контактный перенос структуры на поверхность оптических подложек, покрытых фоторезистом, так и проекционную фотолитографию с уменьшением. В этом случае она может успешно конкурировать с фоторастровой технологией изготовления ДОЭ [6]. Рельеф, полученный на поверхности пленки фоторезиста, может использоваться для переноса в материал подложки с помощью сухого травления или для изготовления матрицы с применением гальванопластики. Через ПФ можно экспонировать толстые (до нескольких десятков микрометров) слои фоторезистов и таким образом решить задачу изготовления высокопорядковых ДОЭ с

глубиной рельефа до нескольких десятков длин волн [7]. Ожидается, что такие оптические элементы позволят создать ахроматические и полихроматические оптические системы для массовых применений.

Наиболее простым и доступным материалом, который может быть применен для изготовления ПФ, является фотографическая эмульсия [8]. Однако пространственное разрешение и механическая прочность фотоэмульсии низкие, а явление усадки (вследствие «мокрого» процесса проявления и закрепления изображения) снижает точность выполнения ПФ.

Негидрогенизированный аморфный кремний (a-Si) стал одним из первых регистрирующих материалов, которые были лишены указанных выше недостатков. Впервые уменьшение оптического поглощения пленок a-Si под действием лазерного излучения описано в [9]. В дальнейшем было доказано, что это явление связано с кристаллизацией пленок и имеет непороговый характер. В [2] показана возможность полутонковой оптической записи сканирующим лазерным пучком на пленках a-Si с высоким пространственным разрешением. Однако реальным поворотным моментом в реализации идеи полутонковых фотошаблонов стало появление стандартизованных промышленно изготавливаемых HEBS- (HEBS – high energy beam sensitive) и LDW-стекло (LDW – laser direct writing), производимых фирмой "Canyon Materials" (США) [3–5, 10]. HEBS-стекла уже достаточно хорошо исследованы и применяются для изготовления полутонковых фотошаблонов на электронно-лучевых генераторах изображений. Но поскольку электронно-лучевые генераторы изображений имеют низкое быстродействие, запись на них фотошаблонов большого размера – весьма дорогостоящий процесс. Поэтому применение LDW-стекла и быстродействующих лазерных записывающих систем экономически более выгодно.

Целью настоящей работы является исследование поведения LDW-стекло в широком диапазоне скоростей сканирования лазерного пучка и особенностей изготовления фотошаблонов на круговой лазерной записывающей системе, а также обсуждение результатов применения ПФ для изготовления фазовых дифракционных линз.

1. LDW- и HEBS-стекла. В основе технологии производства LDW-стекло лежит явление ионного обмена, широко применяемого в настоящее время при изготовлении градиентных линз, линзовых матриц и оптических волноводов [11, 12]. При ионном обмене ионы натрия, входящие в состав силикатных стекол, замещаются ионами серебра в результате обработки поверхности стекла в расплавах или перегретых водных растворах солей серебра при температуре 300–350 °С [4]. Это приводит, в частности, к возникновению градиента показателя преломления в поверхностном слое глубиной до 10 мкм, который используется при создании градиентной оптики. Кроме того, обнаружено, что облучение таких стекол электронным пучком с энергией порядка 20–30 кэВ приводит к уменьшению концентрации ионов серебра и образованию металлических коллоидов серебра в структуре стекла [4]. В результате коэффициент поглощения поверхностного слоя резко возрастает. На этом эффекте основана технология изготовления полутонковых фотошаблонов сфокусированным электронным пучком на HEBS-стеклах, которые производятся из силикатного стекла со специальными добавками (оксиды переходных металлов) и после ионно-обменной обработки остаются прозрачными. LDW-стекла получают из HEBS-стекло путем поверхностной обработки электронным пучком с энергией 20–30 кэВ и плотностью

заряда до 400 мкК/см^2 . При нагревании лазерным пучком или в печи (свыше $200 \text{ }^\circ\text{C}$) коэффициент поглощения может быть снова уменьшен за счет того, что металлическое серебро вступает в химическую реакцию с образованием ионов серебра.

В зависимости от времени и условий модифицирования глубина слоя, в котором происходят преобразования, может варьироваться от 1 до 3 мкм, а пропускание неэкспонированных лазером стекол – от 0,1 до 10 % на длине волны 436 нм. В настоящее время выпускаются стекла двух классов: LDW-IR, ориентированные на запись инфракрасным лазером ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$), и LDW-HR, ориентированные на запись излучением в видимой области спектра. Каждый из этих классов подразделяется в свою очередь на три типа в зависимости от оптической плотности на $\lambda = 436 \text{ нм}$ (LDW-IR: тип I – D1,2, II – D1,8, III – D2,6; LDW-HR: тип I – D1,4, II – D2,4, III – D3,0).

В [5] описаны первые эксперименты по применению LDW-стекла для записи на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300 в Исследовательском центре «Фиат» (Италия). Однако применение системы, предназначенной для записи бинарных элементов и не оснащенной средствами контроля оптического пропускания, не позволило реализовать в полной мере потенциал LDW-стекол.

2. Исследование воздействия сканирующего лазерного пучка на LDW-стекла. Детальное исследование воздействия сфокусированного излучения аргонового лазера на LDW-стекла проводилось нами на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в ИАиЭ СО РАН [13] и специально модернизированной для записи на LDW-стеклах. Запись велась лазерным пучком диаметром 1 мкм при скорости вращения подложки $10\text{--}12 \text{ с}^{-1}$. В диапазоне радиусов записи 0,2–15 мм линейная скорость движения сфокусированного пучка изменялась от 15 до 1100 мм/с. Пропускание экспонированного стекла после записи измерялось прецизионным однокоординатным фотометром, в котором ослабленное излучение аргонового лазера фокусировалось на поверхности измеряемой структуры в пятно диаметром 1,5–2 мкм и прошедший через структуру свет собирался объективом на поверхности фотодиода. Так как полутонные фотошаблоны обычно используются для экспонирования фоторезиста на длине волны 436 нм, то необходимо получить заданную функцию пропускания именно на этой длине волны. По результатам измерения на спектрофотометре больших экспонированных участков LDW-стекла было получено соотношение оптических плотностей на длинах волн 436 и 514 нм. Пример такой зависимости для стекла типа II показан на рис. 1. При облучении лазерным пучком пропускание может быть увеличено до 70–80 %. На рис. 2 показана экспериментальная кривая изменения пропускания LDW-стекла типа I, измеренная на $\lambda = 514 \text{ нм}$ и пересчитанная на $\lambda = 436 \text{ нм}$, в зависимости от мощности записывающего лазерного пучка ($\lambda = 514 \text{ нм}$). Для получения рельефа ДОО в пленках фоторезистов достаточно иметь контраст (отношение максимального пропускания к минимальному) полутонного фотошаблона от 1:3 до 1:15 в зависимости от типа фоторезиста, его толщины и проявителя. LDW-стекла позволяют легко получить необходимый контраст в этом диапазоне.

* В настоящей работе рассматриваются LDW-стекла только класса LDW-HR.



Рис. 1. Соотношение оптических плотностей на длинах волн 436 и 514 нм для LDW-стекла типа II

3. Проблемы изготовления полутонных фотошаблонов на LDW-стеклах. В основе технологии изготовления полутонных фотошаблонов на LDW-стеклах лежит зависимость оптических свойств модифицированного поверхностного слоя от плотности поглощенной энергии лазерного пучка. Однако при этом происходит обратное воздействие измененных оптических свойств на дальнейшее поглощение энергии записывающего пучка, проявляющееся, в частности, в проблеме «первого трека». Она заключается в том, что при прохождении луча по неэкспонированной поверхности поглощение значительно выше, чем при последующих проходах луча по частично экспонированной поверхности. Связано это с уменьшением поглощения энергии из-за частичного прохождения светового пятна по участку пленки с увеличившимся пропусканием. Подобное поведение наблюдается и при лазерной записи на пленках a-Si. В лазерных записывающих системах с круговым сканированием для устранения этого эффекта необходимо уменьшать мощность пучка для первого трека в кольцевой дифракционной зоне, если она начинает записываться со стороны максимального пропускания. Возможен и другой путь устранения этой проблемы: при изготовлении осесимметричного ДОЭ запись необходимо начинать от центра при увеличении коэффициента пропускания в направлении внешнего края дифракционных зон или с

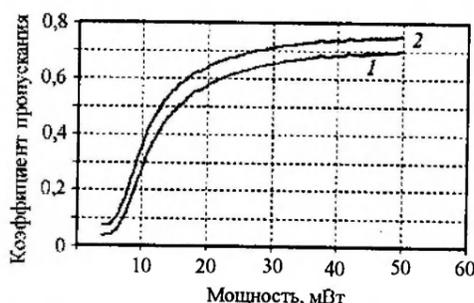


Рис. 2. Пример зависимости пропускания на длинах волн 514 (кривая 1) и 436 нм (кривая 2) от мощности лазерного пучка для LDW-стекла типа I. Скорость сканирования записывающего пучка 150 мм/с

максимального радиуса – при его уменьшении. Несколько сложнее ситуация при изменении мощности в направлении углового сканирования: здесь играет существенную роль время остывания стекла, особенно при высоких скоростях сканирования. Поэтому можно ожидать, что кривая зависимости пропускания от мощности пучка будет различной для углового и радиального направлений.

При записи полутонковых фотошаблонов с произвольной функцией пропускания задача усложняется тем, что во время одного кольцевого прохода записывающий луч может пересекать много дифракционных зон с противоположными наклонами. В результате зоны, наклоненные в противоположные стороны, могут иметь разную форму, а зоны, экспонирование которых начинается с максимальной мощности, – чрезмерно осветленную границу.

Проблему можно решить программным путем – коррекцией мощности записывающего луча в зависимости от наклона трехмерной поверхности дифракционной зоны по отношению к направлению движения луча. Но для произвольной структуры этот путь слишком сложен. Другой, более простой путь решения этой проблемы заключается в уменьшении влияния эффекта изменения коэффициента пропускания, индуцируемого записывающим пучком, на поглощение световой энергии. Идеальным материалом с этой точки зрения являются HEBS-стекла, при использовании которых изменение оптического поглощения пленок не сказывается на взаимодействии электронного пучка со стеклом. Для LDW-стекла возможны два способа ослабления влияния этого эффекта: уменьшение максимального контраста фотошаблона до уровня не более 3–5 и применение для записи полутонковых фотошаблонов излучения длинноволновой (0,6–1 мкм) части спектра, где поглощение пленок достаточно низкое. Последнее предпочтительнее, так как позволяет получать при необходимости большой контраст, а также потому, что поглощение световой энергии происходит более равномерно по глубине светочувствительного слоя, уменьшая лимитирующее влияние теплопроводности на процесс записи при больших линейных скоростях сканирования. Но поскольку поглощение поверхностного слоя в этой области спектра ниже, то для достижения необходимой температуры в слое нужна большая мощность лазерного пучка. При выборе типа лазера для записывающей системы с высоким пространственным разрешением остается практически единственная возможность: использовать лазер с длиной волны в диапазоне 600–700 нм.

4. Пространственное разрешение. Толщина модифицированного поверхностного слоя LDW-стекла должна быть не менее 1 мкм, так как концентрация серебра слишком низкая, чтобы обеспечить высокую исходную оптическую плотность в тонком слое. Это накладывает ограничение на пространственное разрешение записываемых структур. Однако низкая теплопроводность стекла и в особенности эффект локализации термохимических изменений в слое позволяют получить достаточно высокое пространственное разрешение.

Эффект локализации связан с резким понижением поглощения энергии в центре гауссова распределения интенсивности записывающего пучка, если интенсивность в центре достаточна для сквозного осветления слоя. При изготовлении полутонковых фотошаблонов важна не столько минимальная ширина записываемой линии, сколько минимально достижимая ширина края зоны (область обратного спада пропускания), где должен происходить скачок фазы в дифракционном элементе (рис. 3). Размер этой области при-

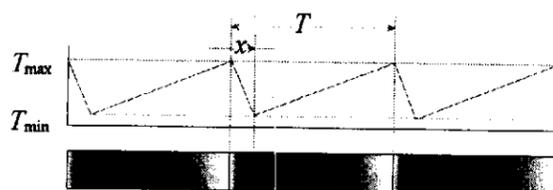


Рис. 3. Неидеальный полутонный фотошаблон

близительно равен половине ширины d дорожки с максимальным пропусканием (для позитивного материала).

Для оценки качества полутонного шаблона можно ввести фактор качества по аналогии с фактором качества фазовой структуры [14, 15]:

$$Q = 1 - x/T = 1 - d/(2T), \quad (1)$$

где x – ширина края зоны; T – ширина зон (см. рис. 3). Определяя величину дифракционной эффективности (ДЭ) как

$$\eta = Q^2, \quad (2)$$

можно получить оценку величины S полутонного пространственного разрешения для заданного η :

$$S = 1/T = \frac{2(1 - \sqrt{\eta})}{d}. \quad (3)$$

Фактически величина S определяет максимальное количество пилообразных дифракционных зон (зон Френеля) на 1 мм. Однако при использовании этого соотношения на практике необходимо учитывать, что d зависит от мощности записывающего пучка и индуцированного им изменения пропускания светочувствительного слоя. На рис. 4 приведена зависимость ширины записанной дорожки и пропускания LDW-стекла типа I от мощности записывающего лазерного пучка (длина волны 514 нм) при скорости сканирования 200 мм/с.

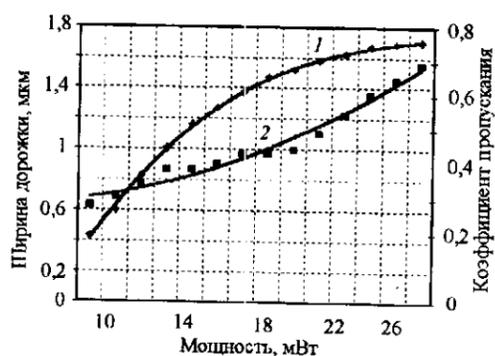


Рис. 4. Зависимость ширины записанной дорожки и пропускания LDW-стекла типа I от мощности лазерного пучка при скорости сканирования 200 мм/с: кривая 1 – пропускание, кривая 2 – ширина дорожки

Размер записывающего пятна составлял 0,8 мкм на уровне e^{-1} . Из графика видно, что при пропускании ниже 60–65 % (до наступления насыщения) ширина линии не превышает 1 мкм. Таким образом, из выражения (3) следует, что пространственное разрешение составляет 200 дифракционных зон на 1 мм для допустимой ДЭ ~ 80 %.

5. Скорость сканирования и метод записи. Изготовление полутонковых фотошаблонов на круговых записывающих системах требует определения с большой точностью зависимости пропускания LDW-стекла от мощности записывающего пучка в большом диапазоне скоростей сканирования [5]. Получение этой зависимости наиболее сложно при записи вблизи центра (0–1 мм), когда вариация скорости движения записывающего пятна очень велика. Для решения этой проблемы нами был применен способ импульсной записи, заключающийся в экспонировании кольцевых дорожек серией коротких импульсов лазерного излучения с постоянной длительностью, но переменным периодом, обратно пропорциональным радиусу записываемой дорожки. Период следования световых импульсов выбирается из условия постоянности величины переналожения соседних экспонируемых пятен. Если поверхность регистрирующего материала успевает остыть за время между импульсами, то мощность пучка, необходимая для записи, не будет зависеть от скорости сканирования и весь процесс записи будет производиться при одинаковых параметрах.

Проведенные нами исследования показали, что из-за низкой теплопроводности LDW-стекла и малого размера записывающего пятна облучаемая область не успевает полностью остыть за время между соседними импульсами (менее 10 мкс). Поэтому полностью избавиться от влияния скорости сканирования не удастся. На рис. 5, *a* и *b* показаны зависимости необходимой мощности пучка от радиальной координаты при импульсном способе записи (длительность импульсов 1 мкс, линейное расстояние между точками включения соседних импульсов 0,5 мкм) и обычном способе, полученные для длины волны 514 нм. Кривые 1 соответствуют пропусканию 33 %, кривые 2 – 6 %. Видно, что зависимости мощности пучка от радиуса для импульсного и обычного (непрерывное экспонирование) способов записи имеют противоположный наклон. Объясняется это тем, что при импульсном способе записи расстояние между импульсами уменьшается с ростом скорости сканирования, в результате поверхность стекла не успевает отстыть и

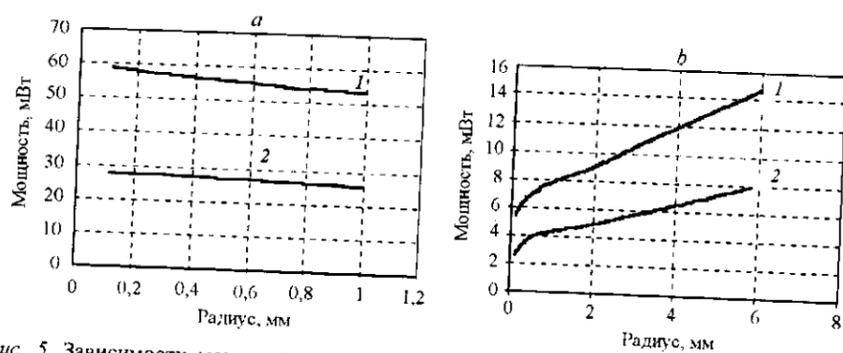


Рис. 5. Зависимости мощности пучка от радиальной координаты при импульсном (*a*) и обычном (*b*) способах записи для получения двух значений пропускания на длине волны 514 нм: кривая 1 – для 33 %, кривая 2 – для 6 %

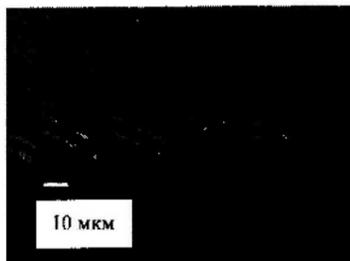


Рис. 6. Микроинтерферограмма участка поверхности фазовой дифракционной линзы в фоторезисте

для записи требуется меньшая мощность. Из рис. 5, *b* также следует, что применение импульсной записи эффективно в области с радиусом порядка 1 мм (скорость сканирования 75 мм/с). Для обычного способа записи при больших ради-

усах мощность изменяется практически линейно. Это значительно облегчает тестирование материала перед изготовлением фотошаблона.

6. Изготовление фазовых ДОЭ с помощью полутонных фотошаблонов. Технология получения фазовых ДОЭ была нами апробирована при изготовлении серии фазовых линз Френеля диаметром от 10 до 28 мм и фокусным расстоянием соответственно от 75 до 200 мм для $\lambda = 560$ нм. Линзы изготавливались в два этапа.

На первом этапе структура полутонного фотошаблона (LDW-стекло, тип I) методом контактной фотолитографии переносилась в слой фоторезиста S1400 (толщина около 2 мкм, коэффициент преломления $n = 1,6$), нанесенный на подложку из кварцевого стекла. Микроинтерферограмма участка поверхности линзы после проявления фоторезиста (полученная с помощью микроинтерферометра МИИ-4) показана на рис. 6.

Границы дифракционных зон, видимые как темные полосы (обратные скаты профиля), имеют ширину 1,2–1,5 мкм, в то время как те же границы зон на полутонном фотошаблоне имели ширину не более 1 мкм. Увеличение размеров границ связано с дифракцией экспонирующего излучения в поглощающем слое ПФ (1–1,5 мкм) и с рассеянием света в слое фоторезиста (2 мкм).

Глубина дифракционной структуры в фоторезисте составляла 0,9 мкм. Эта глубина была оптимальной для получения максимальной ДЭ на заданной длине волны. На рис. 7 показана зависимость ДЭ линзы в фоторезисте (кривая 1) от ширины зон. Величина ДЭ достигала 95 % в центре линзы и уменьшалась до 80 % для зон с шириной порядка 8 мкм. При этом ДЭ всей линзы составляла около 85 %.

На втором этапе перенос рельефа из фоторезиста в кварцевую подложку осуществлялся методом реактивного ионно-плазменного травления. Обра-

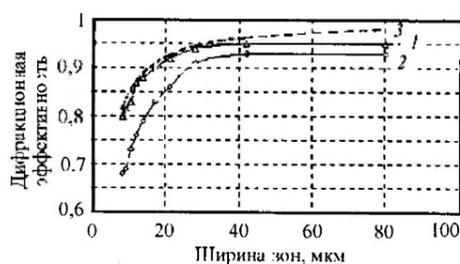


Рис. 7. Дифракционная эффективность, измеренная на различных участках линз: в фоторезисте – кривая 1 и в кварце – кривая 2. Теоретическая оценка ДЭ – кривая 3

ботка подложек с фоторезистом выполнялась на вакуумной установке с диодной ВЧ-системой (частота 13,56 МГц, давление рабочего газа (CF_4) около 0,6 Па, диаметр мишени 120 мм, межэлектродное расстояние около 40 мм, напряжение 400–600 В). Экспериментально установлено, что отношение скоростей травления плавленного кварца и фоторезиста составляет 1,3 : 1, а скорость травления – около 16 нм/мин. Процесс травления заканчивался после полного удаления слоя фоторезиста. В этих условиях максимальная глубина рельефа в кварцевой подложке достигала 1,25 мкм. Этап травления приводил к появлению незначительных искажений поверхности ДОО из-за частичек пыли и воды на внешней и внутренней сторонах слоя фоторезиста и как следствие к уменьшению ДЭ (около 80 % в кварце в сравнении с 85 % для линз в слое фоторезиста). Типичная зависимость ДЭ линзы в кварце от ширины зон приведена на рис. 7 (кривая 2).

Падение ДЭ на краю линзы может быть связано как с уменьшением глубины травления малых зон, так и с потерями света на обратных скатах, величина которых остается по всей линзе постоянной. Уменьшение глубины травления учитывалось нами при записи ПФ путем увеличения контраста ПФ на соответствующих участках линзы. Для разделения этих факторов было проведено измерение ДЭ всей линзы диаметром 20 мм (кривая 1) и центральных зон в поле диаметром 10 мм (кривая 2) в зависимости от длины волны (см. рис. 7). Результаты измерений приведены на рис. 8. Видно, что параметры дифракционной структуры центральной части линзы оптимальны для расчетной длины волны (560 нм), в то время как ДЭ периферийных зон максимальна для длины волны 625 нм. Это означает, что глубина зон на краю линзы была даже немного больше, чем в центре. Следовательно, падение ДЭ в основном обусловлено потерями световой энергии на обратных скатах дифракционной структуры. Величину ДЭ для такой структуры можно оценить [14, 15], используя соотношение $\eta = (1 - x/T)^2$, где x – величина обратного ската, T – ширина дифракционных зон. Эта предельная оценка ДЭ приведена на рис. 7 (кривая 3) для $x = 0,8$ мкм. Видно, что изготовленная нами структура в фоторезисте имеет ДЭ близкую к теоретической.

Описанная выше технология изготовления дифракционных элементов с помощью ПФ была нами апробирована при изготовлении серии дифракционных линз на подложках из плавленного кварца. В таблице представлены параметры изготовленных нами оптических элементов. Из таблицы видно,

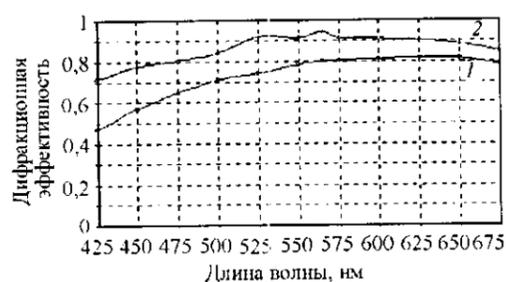


Рис. 8. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны для всей площади линзы (кривая 1) и для центральных зон (кривая 2)

$D = 10 \text{ мм}$, $f = 75 \text{ мм}$	ДЭ, %	$D = 14 \text{ мм}$, $f = 100 \text{ мм}$	ДЭ, %	$D = 20 \text{ мм}$, $f = 150 \text{ мм}$	ДЭ, %	$D = 28 \text{ мм}$, $f = 200 \text{ мм}$	ДЭ, %
Образец 1	79,9	Образец 1	77,7	Образец 1	80	Образец 1	82
2	80	2	81	2	80	2	80,5
3	81	3	81,4	3	82	3	77
4	81	4	81,5	4	82,3	4	67

что количество ДЭ с эффективностью менее 80 % составляет не более 25 % от общего числа элементов.

Заключение. Исследована возможность применения LDW-стекол для изготовления полутонных фотошаблонов дифракционных оптических элементов.

Получены зависимости пропускания LDW-стекол от мощности записывающего пучка в широком диапазоне скоростей сканирования. Рассмотрены особенности изготовления фотошаблонов на круговой лазерной записывающей системе.

Предложен импульсный способ записи, позволяющий эффективно решить проблемы точного формирования структуры полутонного фотошаблона вблизи центра вращения заготовки. Проведены измерения ДЭ тестовых структур в зависимости от ширины дифракционных зон, показавшие возможность получения дифракционной эффективности порядка 80 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольков В. П., Чернухин В. П. Оптическая запись на пленках аморфного кремния с субмикронным разрешением // ЖТФ. 1989. 59, вып. 6. С. 131.
2. Gotchiyaev V. Z., Korolkov V. P., Sokolov A. P., Chernukhin V. P. High resolution optical recording on a-Si films // J. Non-Cryst. Sol. 1991. 137-138. P. 1297.
3. Pat. 5285517 USA. High energy beam sensitive glasses /C. Wu, C. Kuang. 1994.
4. Daschner W., Long P., Stein R. et al. Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray scale mask on high-energy beam-sensitive glass // Appl. Opt. 1997. 36, N 20. P. 4675.
5. Перло П., Синези С., Рипетто М., Успенцев Г. В. Использование круговой лазерной записывающей системы для изготовления полутонных шаблонов дифракционных оптических элементов на основе DLW glass пластинок // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 85.
6. Полещук А. Г. Изготовление элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий // Автометрия. 1991. № 6. С. 66.
7. Korolkov V. P., Koronkevich V. P., Malyshev A. I., Nikitin V. G. New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief // Proc. SPIE. 1997. 3010. P. 180.
8. Anderson H., Ekberg M., Hard S. et al. Single photomask multilevel kinoforms in quartz and photoresist: manufacture and evaluation // Appl. Opt. 1990. 29, N 28. P. 4259.
9. Janai M., Moser F. // J. Appl. Phys. 1982. 53, N 3. P. 1385.
10. LDW-glass photomask blanks // CMI Product Information N 95-08.

11. **Houde-Walter S. N.** Gradient index optics and miniature optics // Proc. SPIE. 1988. **935**. P. 2.
12. **Salmio R. P., Saarinen J., Turunen J., Tervonen A.** Graded-index diffractive elements by thermal ion exchange in glass // Appl. Phys. Lett. 1995. **66(8)**. P. 917.
13. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korol'kov V. P. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOE's on chromium films // Proc. SPIE. 1997. **3010**. P. 168.
14. **Suleski T. J., O'Shea D. C.** Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: 1. Commercial slide imagers // Appl. Opt. 1995. **34**, N 32. P. 7507.
15. **Poleshchuk A. G.** Fabrication of phase structures with continuous and multilevel profile for diffraction optics // Proc. SPIE. 1991. **1574**. P. 89.

Поступила в редакцию 15 сентября 1998 г.

Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!