

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ДОЭ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУТОНОВЫХ ФОТОШАБЛОНОВ НА ОСНОВЕ LDW-СТЕКЛОЛ

*В.П. Корольков *, А.И. Малышев *, В.Г. Никитин **

*А.Г. Полецук *, А.А. Харисов *, В.В. Черкашин *, Ву Чак ***

**- Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия*

*** - CANYON MATERIALS Inc., San Diego, CA 92121, USA*

Аннотация

Описаны результаты исследования поведения LDW стекол в широком диапазоне скоростей сканирования записывающего лазерного пучка. Рассмотрены особенности изготовления полутоновых фотошаблонов на лазерной записывающей системе с круговым сканированием. Обсуждаются результаты применения полутоновых фотошаблонов для изготовления высокоэффективных дифракционных линз.

Введение

В настоящее время одной из проблем сдерживающей 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 шаблонов не позволяет изготавливать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с большой числовой апертурой ($NA > 0.2$) и глубиной фазового профиля (до $3-10\lambda$, 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 фоторастровым методом изготовления ДОЭ [6]. Полученный рельеф на поверхности пленки фоторезиста может переноситься как в материал подложки с помощью сухого травления, так и тиражироваться методами гальванопластики. Через ПФ можно экспонировать и толстые (до нескольких десятков микрометров) слои фоторезистов и решить задачу создания 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 фотоземли - 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 лишены указанных выше недостатков. Впервые уменьшение оптического поглощения пленок a-Si под действием лазерного излучения описано в работе [9]. В дальнейшем было доказано, что это явление связано с кристаллизацией пленок и имеет не пороговый характер. В работе [2] показана возможность полутонной оптической записи сканирующим лазерным пучком на пленках a-Si с высоким пространственным разрешением.

Однако реальным поворотным моментом в реализации идеи полутонных фотошаблонов стало

появление стандартизованных промышленно изготавливаемых HEBS (HEBS - high energy beam sensitive) и LDW стекол (LDW - Laser Direct Writing), производимых фирмой CANYON MATERIALS, Inc [3-5, 10]. HEBS стекла уже достаточно хорошо исследованы и применяются для изготовления полутонных фотошаблонов на электронно-лучевых генераторах изображений. Однако запись фотошаблонов большого размера этим методом весьма дорогостоящий процесс, поэтому LDW стекла для лазерной записи имеют большие перспективы. Целью настоящей работы является исследование поведения LDW стекол в широком диапазоне скоростей сканирования лазерного пучка, 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-стекол лежит явление ионного обмена, широко используемого в настоящее время при изготовлении градиентных линз и линзовых матриц оптических волноводов [11, 12]. Процесс использует явление замещения ионов натрия, входящих в состав силикатных стекол на ионы серебра при обработке поверхности стекла в расплавах или перегретых водных растворах солей серебра при температуре $300-350^\circ\text{C}$ [4]. Это приводит, в частности, к изменению градиента показателя преломления в поверхностном слое глубиной до 10 мкм, который используется для создания градиентной оптики. Кроме этого 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. Это эффект используется для записи полутонных фотошаблонов сфокусированным электронным пучком на так называемых HEBS-стеклах, которые изготавливаются из силикатного стекла со специальными добавками (оксиды переходных металлов) и после ионно-обменной обработки прозрачны. LDW-стекла получают из HEBS-стекол обработкой всей поверхности электронным пучком с энергией 20-30 кэВ и плотностью заряда до 400 мкК/см^2 . При нагревании лазерным пучком или в печи (свыше 200°C) коэффициент поглощения может быть снова уменьшен за счет, того что металлическое серебро вступает в химические реакции с образованием ионов серебра. Таким образом, процесс записи на LDW стеклах может быть отнесен к классу термохимических процессов.

В зависимости от времени и условий модифицирования глубина слоя, в котором происходят преобразования, может варьироваться от 1 до 3 микрон, а пропускание неэкспонированных лазером стекол - от 0.1 до 10% на длине волны 436 нм. В

настоящее время выпускается несколько типов стекол: LDW-IR- ориентированные на запись пучком инфракрасного лазера (1.06 микрона); LDW-NR – ориентированные на запись пучком в видимой области спектра.

В работе [5] описаны первые эксперименты по применению LDW-стекла для записи на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300 в Исследовательском Центре ФИАТ. Однако, применение системы, предназначенной для записи бинарных элементов и не оснащенной средствами контроля оптического пропускания не позволило реализовать в полной мере потенциал LDW-стекла.

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 пучком диаметром 1 мкм при скорости вращения подложки 10-12 об/сек. 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 полутоновые фотошаблоны обычно используются для экспонирования фоторезиста на длине волны 436 нм, то необходимо получать заданную функцию пропускания именно на этой длине волны. По результатам измерения на спектрофотометре больших экспонированных участков LDW-стекла была получена связь оптических плотностей на длинах волн 436 и 514 нм. Пример такой зависимости для стекла типа II показан на рис. 1.

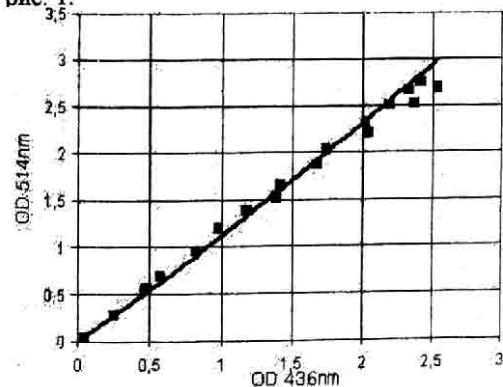


Рис. 1. Связь оптической плотности на длинах волн 436 и 514 нм для LDW-стекла типа II

При облучении лазерным пучком пропускание может быть поднято до 70 - 80%. На рис. 2 показана

экспериментальная кривая изменения пропускания LDW-стекла типа I, измеренная на 514 нм и пересчитанная на 436 нм в зависимости от мощности записывающего лазерного пучка (длина волны 514 нм). Для получения рельефа ДОО в пленках фоторезистов достаточно иметь контраст (отношение максимального пропускания к минимальному) полутонового фотошаблона от 1:3 до 1:15 в зависимости от типа фоторезиста, его толщины и проявителя. LDW-стекла позволяют легко получить контраст в этом диапазоне.

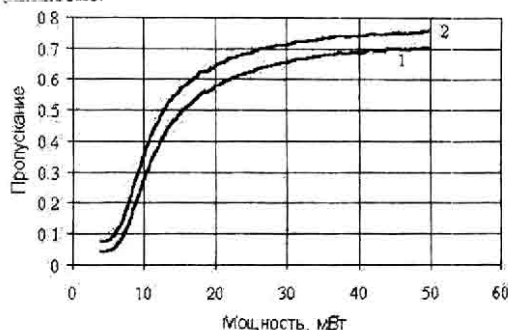


Рис. 2. Пример зависимости пропускания на длинах волн 514 (1) и 436 (2) нм от мощности лазерного пучка для LDW-стекла I типа. Скорость сканирования записывающего пучка – 150 мм/сек

3. Особенности использования LDW-стекла для изготовления полутоновых фотошаблонов

В основе технологии изготовления полутоновых 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. Это связано 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 сканирующих лазерных записывающих системах для устранения этого эффекта необходимо уменьшать мощность первого трека в кольцевой дифракционной зоне, если она начинает записываться с края максимального пропускания. Возможен и другой путь устранения этой проблемы: при записи кольцевой дифракционной структуры начинать запись из центра, в случае увеличения пропускания к внешнему краю зоны, а в противоположном случае – начинать с последней внешней зоны. Несколько сложнее ситуация при изменении мощности в направлении углового сканирования, здесь играет роль время остывания стекла, в особенности при высоких

скоростях сканирования. Поэтому можно ожидать, что кривая зависимости пропускания от мощности пучка будет различной для углового и радиального направления.

При записи полутонных фотошаблонов с произвольной функцией пропускания, задача усложняется тем, что во время одного прохода, записывающий луч может пересекать много дифракционных зон с противоположными наклонами. В результате может возникать разница в форме зон, наклоненных в противоположные стороны, а так же оконтуривание дифракционных зон, экспонирование которых начинается с максимальной мощности.

Проблему можно решить программным путем - коррекцией мощности записывающего луча в зависимости от наклона трехмерной поверхности дифракционной зоны по отношению к направлению движения луча. Но в общем случае для произвольной структуры этот путь слишком сложен. Другой путь решения этой проблемы, физический - заключается в уменьшении влияния индуцированного записывающим пучком изменения пропускания на поглощение энергии. Например, при записи электронным пучком на HEBS стеклах изменение оптического поглощения пленок не сказывается на взаимодействии электронного пучка со стеклом. Для LDW-стекол возможны два пути:

- уменьшение максимального контраста фотошаблона до уровня не более 3-5;
- использование для записи излучения длинноволновой (0,6-1 мкм) части спектра, где поглощение пленок достаточно низкое.

Последний путь предпочтительнее, так как позволяет получать при необходимости и большой контраст, а также из-за того, что поглощение световой энергии происходит на всей глубине светочувствительного слоя. Тем самым уменьшается лимитирующее влияние теплопроводности на процесс при больших линейных скоростях сканирования. Но поскольку поглощение приповерхностного слоя ниже, то для достижения необходимой температуры в слое нужна большая мощность лазерного пучка. Таким образом, в этом случае при выборе типа лазера для записывающей системы с высоким пространственным разрешением остается практически единственной возможной: 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 просветления слоя. Для изготовления полутонных фотошаблонов важна не столько минимальная ширина записываемой линии, сколько минимально достижимая ширина края зоны (обратного ската), где должен происходить скачок фазы в дифракционном элементе (рис. 3). Размер обратного ската структуры приблизительно равен половине ширины d дорожки с максимальным пропусканием (для позитивного материала).

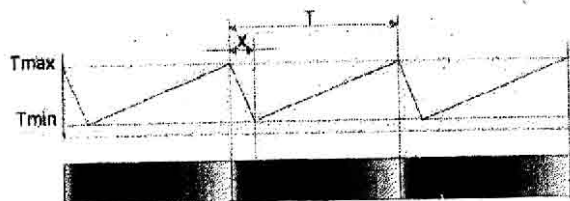


Рис. 3. Неидеальный полутонный фотошаблон

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

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

где x - ширина края зоны, T - период зоны (рис. 3). Определяя дифракционную эффективность как:

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

можно получить оценку величины S полутонного пространственного разрешения для получения дифракционной эффективности η :

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

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 20 мм/сек. Размер записываемого 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 дифракционной эффективности 80%.

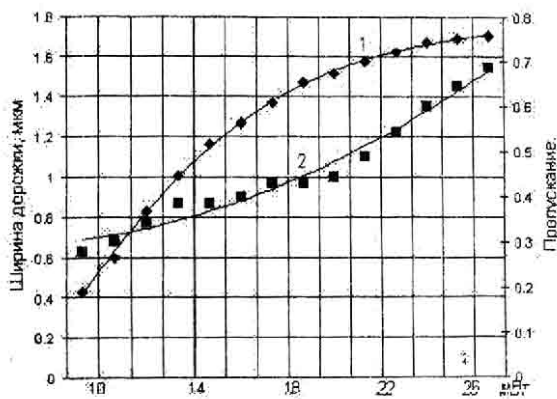


Рис. 4. Зависимость ширины записанной дорожки и пропускания LDW стекла типа I от мощности лазерного пучка при скорости сканирования 200 мм/сек. Кривая 1 — пропускание, кривая 2 — ширина дорожки

5. Скорость сканирования и метод записи

Использование LDW-стекол в качестве регистрирующих сред для записывающих систем с круговым сканированием требует определения с большой точностью зависимости пропускания ПФ от мощности записи 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 сериями коротких импульсов лазерного излучения с постоянной длительностью, но переменным периодом, обратно пропорциональным радиусу записываемой дорожки. Период следования импульсов записи выбирается из условия постоянной величины переналожения соседних экспонируемых пятен. Если поверхность регистрирующего материала успевает остыть за время между импульсами, то мощность, требуемая для записи, не будет зависеть от скорости сканирования и весь процесс записи производится при одинаковых параметрах.

Проведенные нами исследования показали, что из-за низкой теплопроводности LDW стекла и малого размера записываемого пятна, область записи не успевает полностью остыть за время (менее 10 мкс) между соседними импульсами. Поэтому полностью избавиться от зависимости от скорости сканирования не удается. На рис. 5 показаны зависимости пропускания от мощности для нескольких радиусов при импульсном способе записи (длительность импульсов 1 мкс, линейное расстояние между точками включения соседних импульсов — 0.5 мкм) и обычном способе записи (соответственно 5(а) и 5(б)). Кривые 1 на каждом графике соответствуют пропусканию 33% на длине волны 514 нм, кривые 2 — пропусканию 6%. Видно, что зависимости мощности записи от радиуса для импульсного и обычного способов записи имеет противоположный наклон.

Это объясняется тем, что поверхность стекла не успевает остыть между соседними импульсами и при больших скоростях сканирования, когда расстояние между импульсами уменьшается и увеличивается влияние предварительного подогрева, требуется меньшая мощность для записи.

Из рис. 5 (б) также следует, что применение импульсной записи эффективно до радиуса 1 мм (скорость сканирования — 75 мм/сек), а при больших радиусах мощность изменяется практически линейно для обычного способа записи, и он дает хорошую точность.

6. Изготовление фазовых ДОЭ с помощью полутонных фотошаблонов

Технология получения фазовых ДОЭ была нами апробирована на примере изготовления линзы Френеля диаметром 10.6 мм с фокусным расстоянием 82 мм для длины волны света 514 нм. Структура полутонного фотошаблона, записанного на LDW стекле типа I была методом контактной фотолитографии перенесена в фоторезист S1400. Микроинтерферограмма участка поверхности фазовой линзы, полученная с помощью микроинтерферометра МИИ-4, показана на рисунке 6. Границы зон (рис. 6б), видимые как темные полосы (обратные скаты), имеют ширину 2.5-3 микрона, в то время как те же границы зон на шаблоне имели ширину не более 1 микрона. По нашему мнению, увеличение размеров границ связано с дифракцией экспонирующего излучения в слое ПФ (1-1.5 мкм) и рассеянием света в слое фотонезиста (1.5-2 мкм).

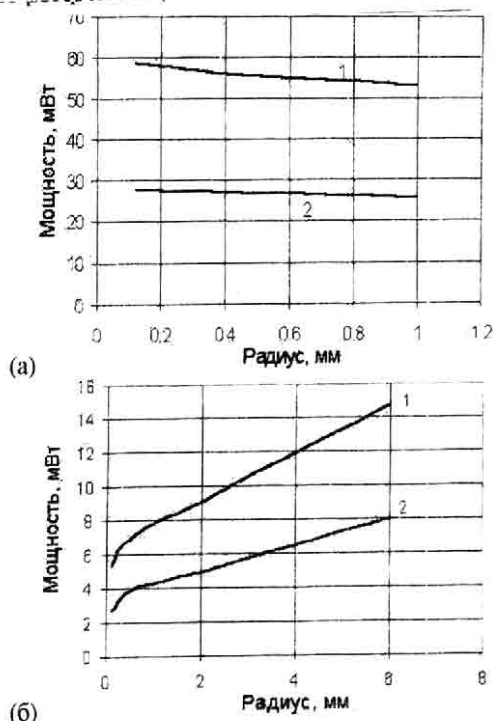


Рис. 5. Зависимости пропускания от мощности для нескольких радиусов при импульсном (а) и обычном (б) способах записи. 1 — 33%, 2 — 6% пропускание на длине волны 514 нм

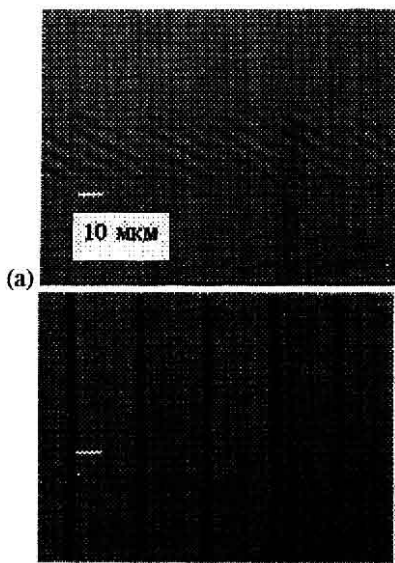


Рис. 6. Участок поверхности фазовой дифракционной линзы: – микроинтерферограмма в белом свете (а), микрофотография этого же участка на отражение

На рис. 7 показан график зависимости дифракционной эффективности от радиуса и периода зон. Видно, что дифракционная эффективность достигает 98% в центре и падает до 80% на зонах с размером около 8 мкм. Общая дифракционная эффективность линзы превышала 85%.

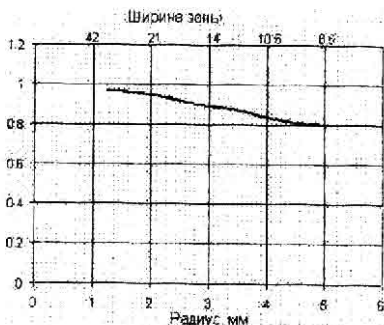


Рис. 7. Зависимость дифракционной эффективности линзы от радиуса и среднего периода зон в этом участке

7. Заключение

Проведенные исследования показали перспективность применения LDW-стекол в качестве полутонных фотошаблонов для изготовления дифракционных оптических элементов.

Исследованы зависимости пропускания LDW-стекла 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 шаблона вблизи центра вращения заготовки фотошаблона. Проведены изме-

рения дифракционной эффективности тестовых структур в зависимости от периода дифракционных зон, показавшие возможность получения 80% эффективности для структур с периодом до 8 мкм.

Литература.

1. В.П.Корольков, В.П.Чернухин – Оптическая запись на пленках аморфного кремния с субмикронным разрешением. ЖТФ, т. 59, вып.6, 1989, стр. 131-133.
2. V.Z.Gotchiyayev, V.P.Korolkov, A.P.Sokolov, V.P.Chernukhin – High resolution optical recording on a-Si films, Jour. Non-Crystalline Solids, v.137&138, 1991, pp.1297-1300.
3. C. Wu, Che-Kuang. Патент США N 5285517. C03C 15/00, 1994.
4. W.Daschner, P.Long, R.Stein, C.Wu, S.H.Lee – 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., v.36, N20, 1997, pp.4675-4680.
5. П. Перло, С. Синези, М. Рипетто, Г.В. Успенъев. Использование круговой лазерной записывающей системы для изготовления полутонных шаблонов дифракционных оптических элементов на основе DLW glass пластинок. //Компьютерная оптика, №17, 1997, 85-93.
6. А.Г.Полещук. – Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий, Атометрия – 1991, №6.
7. V.P.Korolkov, V.P.Kooronkevich, A.I.Malyshv, V.G.Nikitin - New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief, Proc. SPIE, v.3010, 1997, pp.180-191.
8. H.Anderson, M. Ekberg, S. Hard, S. Jacobsson, M. Larsson, T. Nilsson. - Single photomask, multilevel kinoforms in quartz and photoresist: manufacture and evaluation, Appl. Opt., v.29, N 28, pp.4259.
9. M.Janai, F.Moser – J. Appl. Phys., v.53, N3, 1982, pp.1385-1386.
10. CMI Product information No. 95-08. LDW-glass photomask blanks.
11. S.N.Hounde-Walter, – Gradient Index Optics and Miniature Optics, Proc. SPIE, v. 935, 1988, p.2.
12. R.-P.Salmio, J.Saarinen, J.Turunen, A.Tervonen – Graded-index diffractive elements by thermal ion exchange in glass, Appl.Phys.Lett. v.66 (8), 20, (1995), pp. 917-919.
13. V.V.Cherkashin, E.G.Churin, V.P.Korol'kov, V.P.Kooronkevich, A.A.Kharissov, A.G.Poleshchuk, J.H.Burge - Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films. Proc. SPIE, v. 3010, 1997, pp. 168-179.
14. T.J.Suleski, D.C. O'shea – Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers, Appl. Opt., v.34, N 32, 1995, pp.7507-7517.

Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs

V.P.Korolkov¹, A.I.Malyshev¹, V.G.Nikitin¹, A.G. Poleshchuk¹, A.A. Kharissov¹, V.V. Cherkashin¹, C. Wu²

¹Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk)

²CANYON MATERIALS Inc., San Diego, CA 92121, USA

Abstract

The paper describes the results of investigating the behavior of LDW glasses in a wide range of scanning speeds of the writing laser beam. The article considers the peculiarities of production of halftone photomasks on a laser recording system with circular scanning. The authors discuss the results of application of halftone photomasks for fabrication of high-performance diffractive lenses.

Citation: Korolkov VP, Malyshev AI, Nikitin VG, Poleshchuk AG, Kharissov AA, Cherkashin VV, Wu C. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs. *Computer Optics* 1998; 18: 121-126.

References

- [1] Korolkov VP, Chernukhin VP. Optical-recording in amorphous-silicon films with sub-micron resolution [In Russian]. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 1989; 59(6): 131-133.
- [2] Gotchiyaev VZ, Korolkov VP, Sokolov AP, Chernukhin VP. High resolution optical recording on a-Si films. *J Non Cryst Solids* 1991; 137-138(2): 1297-1300.
- [3] Wu C-K. High energy beam sensitive glasses. Pat USA 5285517 of February 8, 1994.
- [4] Däschner W, Long P, Stein R, Wu C, Lee SH. 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(20): 4675-4680.
- [5] Perlo P, Sinesi S, Ripetto M, Uspleniev G. The use of a circle laser writing system for the manufacture of halftone patterns of diffractive optical elements based on DLW glass plates [In Russian]. *Computer Optics* 1997; 17: 85-90.
- [6] Poleshchuk AG. Fabrication of high efficiency diffractive optical elements using halftone and photorastered technologies [In Russian]. *Avtometriya* 1991; 3: 66-76.
- [7] Korolkov VP, Koronkevich VP, Malyshev AI, Nikitin VG. New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief. *Proc SPIE* 1997; 3010: 180-191.
- [8] Anderson H, Ekberg M, Hård S, Jacobsson S, Larsson M, Nilsson T. Single photomask, multilevel kinoforms in quartz and photoresist: manufacture and evaluation. *Appl Opt* 1990; 29(28): 4259-4267.
- [9] Janai M, Moser F. Optical recording in amorphous silicon films. *J Appl Phys* 1982; 53(3): 1385-1386.
- [10] LDW-glass photomask blanks. CMI Product information No 95-08. Source: http://www.canyonmaterials.com/prop_hebs14.html.
- [11] Hounde-Walter SN. Gradient index optics and miniature optics. *Proc SPIE* 1988; 935: 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): 917-919.
- [13] Cherkashin VV, Churin EG, Korol'kov VP, Koronkevich VP, Kharissov AA, Poleshchuk AG, Burge JH. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films. *Proc SPIE* 1997; 3010: 168-179.
- [14] Suleski TJ, O'Shea DC. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers. *Appl Opt* 1995; 34(32): 7507-7517.