

---

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРУГОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ШАБЛОНОВ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ DLW GLASS ПЛАСТИНОК

*П. Перло\**, *М. Рипетто\**, *С. Синези\**, *Г.В. Успенев\*\**

*\*) - Научно-исследовательский центр Фиат, Орбассано, Италия,*

*\*\*\*) - Институт систем обработки изображений РАН*

### *Аннотация.*

На круговой лазерной записывающей системе (Circle Laser Writing System - CLWS) были исследованы новые стеклянные пластинки прямой лазерной записи изображения (Direct Laser Write glass photoplates – DLW glass) для изготовления полутоновых фотошаблонов дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Были отмечены некоторые особенности записи на этих пластинках, проявившиеся при записи асимметричных ДОЭ. Высокое разрешение и качество записи полутонов было получено, используя особые свойства DLW glass пластинок. Приведены параметры и фрагменты полутоновых фотошаблонов бифокальной линзы и растра микролинз, синтезированных на CLWS

### *Введение.*

В производстве дифракционных оптических элементов с многоуровневым или непрерывным профилем микрорельефа существуют множество нестандартных технологий, использующих сложное современное оборудование и материалы. Так, в последнее время широкое применение находят лазерные генераторы изображений для синтеза различных масок ДОЭ, начиная от полутоновых фотошаблонов на основе  $\alpha$ -Si, кончая бинарными масками для фоторастровой технологии формирования непрерывного микрорельефа [1,2]. А также существуют уникальные технологии на основе нанесения тонких прозрачных пленок или применения полимерных материалов [3,4]. Мы будем рассматривать один из известных методов формирования рельефа, использующих маски с изменяющейся оптической плотностью. Основным недостатком фотошаблонов на основе фотоэмульсионных слоев является низкое разрешение и зернистость полутонового изображения. Этих недостатков не имеют фотошаблоны на основе нового, уникального материала - стеклянных пластинок прямой лазерной записи изображения (Direct Laser Writing glass plates) производства CANYON MATERIALS INC. (USA), в дальнейшем будем называть их DLW glass пластинки. Экспозиция этой DLW glass пластинки выполняется сфокусированным лазерным пучком на лазерной записывающей системе. Это позволяет использовать уже существующее программное обеспечение, сочетающее синтез бинарных масок и способ прямой записи лазерным пучком по фоторезисту. Сгенерированные

таким способом маски могут быть использованы в оптической литографии (т.е. проекционная или контактная печать) для массового производства фоторезистивных профилей.

Применяя DLW glass пластинки в качестве полутоновой маски и последующую литографическую экспозицию, избегают ошибок совмещения, так как маска записывается за один цикл, используя различную плотность энергии лазерного пучка для генерации полутонов. Это также позволяет экономить в производстве масок, так как вместо изготовления набора из 5 хромовых масок с полным циклом процесса обработки фоторезиста и жидкостного травления требуется всего один этап записи без всякой дальнейшей обработки. Одна такая маска содержит всю необходимую информацию, содержащуюся прежде в наборе из 5 бинарных масок. После того как полутоновой шаблон изготовлен, с помощью установки мультиплицирования, серией одноразовых экспозиций можно получить сотни ДОЭ на одной подложке, и затем эта подложка может быть обработана с помощью плазмохимического или ионно-лучевого травления. Поскольку структура ДОЭ полностью трансформируется в субстрат, нет необходимости в этапе удаления фоторезиста после травления. После обработки подложки сотни монолитных многоуровневых ДОЭ получают с помощью процесса, который более чем в 5 раз сокращает число обычно требуемых операций. Кроме того, часто требуются оптические элементы с высотой микрорельефа, многократно превышающей длину волны света  $\lambda$ , что накладывает определенные требования на качество микрорельефа, когда требует-

ся поверхность рельефа оптического качества одновременно с вертикальными стенками границ зон. Такой край достигается лишь при полном контакте фотошаблона с поверхностью фоторезиста или при абсолютно сфокусированном изображении маски, в то время как гладкость поверхности может быть получена путем расфокусировки изображения или за счет использования определенного зазора между маской и фоторезистом. Снять эти два противоречия удастся с помощью полутоновых фотошаблонов на основе DLW glass пластинок.

### ***Создание полутоновых масок на круговой лазерной записывающей системе.***

DLW glass 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 этих окрашенных частичек серебра, заставляя часть или все окрашенные частички серебра переходить в бесцветные ионы серебра. Пропускание DLW glass пластинок увеличивается с увеличением плотности энергии сфокусированного лазерного пучка. Обесцвечивание - это термохимическая реакция, которая происходит благодаря движению электронов (не атомов) и не требует никакой дополнительной химической обработки. Требуемая для записи плотность энергии есть функция от длины волны пучка  $\lambda$ , скорости записи, т.е. скорости передвижения лазерного пучка, профиля интенсивности сфокусированного лазерного пучка и значения коэффициента пропускания  $\tau$ , т.е. желаемого значения оптической плотности. Например, экспонируя с энергетической плотностью 2 Дж/см<sup>2</sup>, используя записывающий пучок с длиной волны  $\lambda=514$  нм и скорость записи 4 м/с, DLW glass пластинки получают полностью прозрачные.

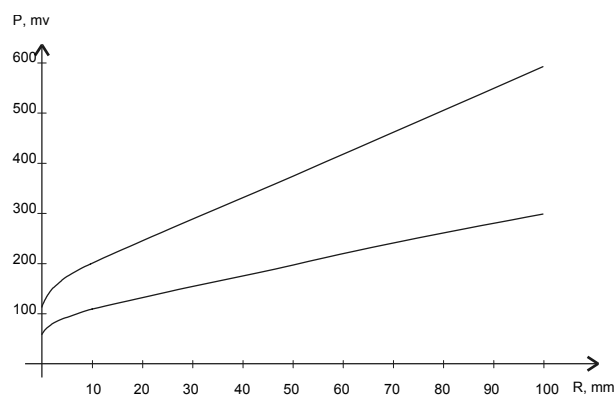
При любой выбранной скорости записи, существует пороговая интенсивность обесцвечивания, ниже которой оптическая плотность не меняется даже при многократном повторении экспонирования. При использовании интенсивности пучка чуть выше этого порога оптическая плотность DLW glass пластинки уменьшается с каждой порцией повторения, и пластинки могут быть полностью просветлены при многократном наложении пучка на одно и то же место. С увеличением интенсивности лазерного пучка выше порога, количество повторений для достижения полной прозрачности уменьшается. DLW glass пластинки просветляются за один раз, т.е. без числа повторений, при интенсивности полного обесцвечивания.

При любой скорости записи существует также пороговая интенсивность эрозии, выше которой

DLW glass пластинки портятся, благодаря избыточной температуре ( $>800^{\circ}\text{C}$ ) на поверхности пластины вблизи сфокусированного лазерного пучка.

Эти DLW glass пластинки были исследованы на круговой лазерной записывающей системе (CLWS) [5] на длине волны излучения  $\lambda=514$  нм с целью определения возможности генерирования фотошаблонов ДОО. Постоянная оптическая плотность по всей поверхности маски обеспечивается за счет равной плотности энергии лазерного пучка в каждой экспонируемой точке. Предположим, что в центре вращения, где линейная скорость нулевая, плотность энергии пучка достаточна для получения определенной прозрачности. В этом случае энергия расходуется только на нагревание «неподвижной» точки и температура распределяется по поверхности пластины, согласно закону теплопроводности. В тот момент, когда точка сдвигается из центра вращения, область экспозиции увеличивается, и плотность энергии распределяется по этой поверхности. Следовательно, удаляясь от центра вращения интенсивность лазерного пучка должна увеличиваться пропорционально линейной скорости перемещения точки. Наиболее критичными областями в записываемой маске являются зоны близко расположенные к центру вращения, где значительно влияние скорости распространения температуры по поверхности пластины, что приводит к нелинейной зависимости изменения интенсивности лазерного пучка от его линейной скорости перемещения. Калибровочная кривая зависимости изменения интенсивности лазерного пучка от радиуса - расстояния от экспонируемой точки до центра вращения, выполняется каждый раз при смене скорости вращения пластинки и требуемых значений оптической плотности (рис. 1). Здесь показана зависимость интенсивности лазерного излучения в значениях управляемого напряжения  $U$  на акустооптическом модуляторе от радиуса  $R$ , удаления точки от центра вращения. Такая мерность принята в программном обеспечении лазерной записывающей системы [5]. Калибровочная кривая была получена с помощью теста, в котором серией импульсов лазерного излучения с различной плотностью энергии записывается несколько штрихов на выбранных радиусах. Затем по результатам измерения оптической плотности каждого штриха определяют интенсивность, соответствующую равным или почти равным оптическим плотностям на каждом радиусе. Каждая калибровочная кривая соответствует своему значению оптической плотности. На рисунке видна нелинейность кривой при приближении к центру вращения и где интенсивность практически достигает порогового значения обесцвечивания. Очевидно, что в области, близко расположенной к центру вращения, требуется меньше энергии для достижения минимальной оптической плотности, в то время как на краю маски растет диапазон между минимальной и максимальной интенсивностями. Выбор базовых калибровочных кривых с минимальной и максимальной интенсивностями лазерного пучка влияет в дальней-

шем на глубину модуляции профиля фоторезиста. Таким образом, калибровочные кривые определяются еще и по результатам эксперимента трансформации полутоновых масок в слой фоторезиста. Однако один раз построенные калибровочные кривые зависимости глубины модуляции рельефа в фоторезисте от оптической плотности на маске позволяют пользоваться ими все время, пока не произойдет смена типа фоторезиста или условий экспонирования.

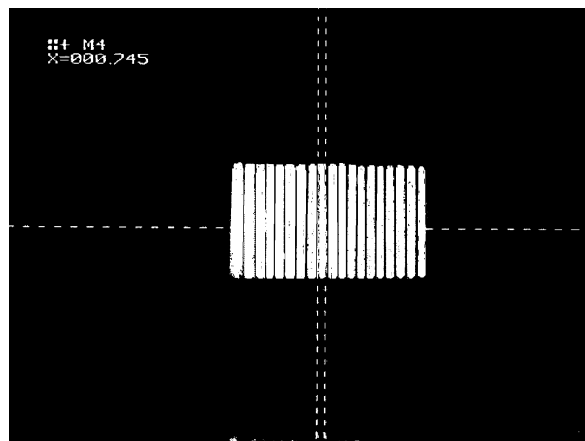


**Рис.1. Калибровочные кривые зависимости интенсивности лазерного пучка от радиуса вращения и требуемой оптической плотности.**

### **Разрешение полутоновых фотошаблонов на DLW glass пластинках.**

Одной из основных проблем современной оптической литографии является достижение наибольшего разрешения, т.е. минимальных размеров воспроизводимых элементов. Применение DLW glass пластинок не ухудшает разрешение по сравнению с традиционными методами оптической литографии, а при использовании определенных свойств DLW glass пластинок, и особых методов записи можно даже уменьшить минимальную ширину линии, следовательно, и ширину зоны ДОО на полутоновом фотошаблоне. При оптической литографии, используя современную экспонирующую и совмещающую технику, с помощью набора из 4 бинарных масок, минимальный размер зоны ДОО многоуровневого профиля может быть порядка 8-16 мкм. При прямой лазерной записи по фоторезисту этот предел около 4-8 мкм. DLW glass пластины предлагают несколько путей улучшения разрешения. При прямой лазерной записи на DLW glass пластинках, использующих сфокусированный пучок с Гауссовским распределением интенсивности, нет мягкого перехода на краю линий в шаблонах благодаря эффекту пороговой интенсивности. Размер записываемого пятна внутри DLW glass пластинок несколько меньше, чем размер воздушного диска в сфокусированном пятне на воздухе. Во время исследования DLW glass пластинок на разрешение, проведенных с помощью определенных тестов, было установлено, что минимальная ширина полностью прозрач-

ной линии может быть на 15-20 % меньше эффективного размера сфокусированного лазерного пятна. Например, в случае представленном на рис. 2, ширина линии с наиболее проработанными, ровными краями, равная 0.745 мкм при эффективном размере пятна около 0.9 мкм, была определена с помощью микроскопа фирмы «Nikon» и телевизионной приставки измерения линейных размеров.



**Рис.2. Тест на определение минимального размера линии: ширина линий - 0.745 мкм.**

Запись проводилась с интенсивностью полного обесцвечивания. При многопроходном методе записи один и тот же отрезок на пластинке может быть экспонирован несколько раз с помощью очень узкой вершины сфокусированного пучка. При этом эффективная ширина пятна подбирается так, чтобы плотность энергии в пятне была достаточна хотя бы для незначительного преодоления пороговой интенсивности обесцвечивания. При многопроходном методе записи была достигнута минимальная ширина линии 0.45 мкм на радиусе 50 мм от центра вращения.

При синтезе полутонового фотошаблона ДОО следует уделять внимание согласованию его параметров с вычислительными возможностями компьютера и технологическими параметрами процесса записи с точки зрения предельного разрешения и точности приближения к профилю фазовой функции. Что касается компьютера, ограничения связаны со временем обработки огромного количества данных, способа и скоростью передачи информации на лазерную записывающую систему. Сейчас современные вычислительные системы позволяют обрабатывать, хранить и передавать информацию в количестве достаточном, чтобы удовлетворить любой генератор изображений. Круговая лазерная система записи имеет точность радиального перемещения 0.1 мкм, что позволяет в особых случаях производить запись с наложением, отслеживая границы зон с предельной точностью. Однако, при записи полутоновых фотошаблонов это достоинство системы может сыграть негативную роль, так как на границе зоны за счет подчеркивания линия получается светлее, чем необходимо. Поэтому в программе управления записью требуется учиты-

вать этот эффект и при необходимости обходиться без уточнения границ зон ДОО, либо применять меньшую интенсивность лазерного пучка. Применяя шаг смещения в радиальном направлении меньший, чем эффективный размер записывающего пучка можно добиться сглаживания ступенчатого профиля микро-рельефа. В этом случае заполнение зон происходит с частичным наложением каждого следа лазерного пучка друг на друга. DLW glass пластинки позволяют подобрать интенсивность лазерного пучка в каждом треке так, что при записи ДОО отрабатывается превосходный пилообразный профиль. Были синтезированы полутонные фотошаблоны симметричных ДОО с размером крайних зон около 4-8 мкм.

### **Методы записи полутонных масок ДОО.**

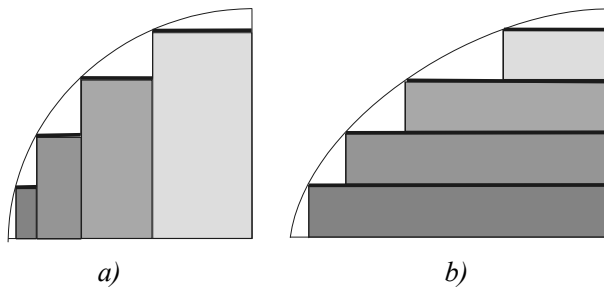
На основе программного обеспечения, управляющего круговой лазерной записывающей системой, были созданы программы тестирования DLW glass пластинок и синтеза полутонных фотошаблонов дифракционных оптических элементов. Этот пакет включает различные методы расчета элементов, принимая во внимание их геометрическую структуру и формальное описание данных.

Существуют два метода записи симметричных ДОО. Во-первых, программа, реализующая запись симметричных ДОО, производит вычисление фазовой функции и все необходимые преобразования данных в процессе записи, таким образом, экономя машинное время и память. Во-вторых, можно воспользоваться уже вычисленными значениями фазы, хранящимися в памяти компьютера, что позволяет неоднократно пользоваться ими. Для симметричных относительно центра вращения элементов достаточно вычислить одномерный массив значений фазовой функции ДОО. В процессе записи определенное значение управляющего акустооптическим модулятором напряжения в милливольтах выбирается из условия соответствия требуемой оптической плотности значению фазовой функции ДОО. Это соответствие отслеживается автоматически, благодаря заранее полученным калибровочным кривым. Запись происходит от края элемента к центру вращения, экспонируя чувствительный слой DLW glass пластинки. Каждая зона разбивается на уровни с различными значениями оптической плотности так, чтобы полученный в конечном итоге профиль фоторезиста, наилучшим образом приближался к фазовой функции ДОО. Максимальное количество уровней в этом случае определяется шириной зоны ДОО и шагом дискретизации; например, от 4-8 уровней для самых узких зон, и, если позволяет диапазон модуляции мощности лазерного пучка на данном радиусе вращения, то вплоть до 256 уровней для самых широких. Таким образом, для симметричных ДОО можно достичь наилучшей точности отображения фазовой функции.

При синтезе несимметричных относительно центра вращения элементов требуется вычислять двумерный массив значений фазовой функции ДОО. В процессе записи данный массив конвертируется в полярную систему координат. Естественно, в этом случае могут возникнуть проблемы с искажением геометрической формы ДОО. Однако, благодаря применению специальной процедуры преобразования, учитывающей максимальное угловое и радиальное разрешение системы, эти искажения были сведены к минимуму. Поскольку размещение элемента на пластинке может быть произвольным, определяемым оператором до начала записи, то заранее не известно, сколько пересечений и с какими зонами ДОО на текущем радиусе встретит лазерный луч. Причем, в некоторых случаях луч может встретиться не все уровни фазы, например, пересечение происходит по касательной к какой-либо зоне. В каждом таком пересечении будет свой набор значений фазы, который требуется отобразить соответствующими значениями оптической плотности. В данной записывающей системе нет возможности управлять интенсивностью лазерного излучения в течение импульса, поэтому мы будем рассматривать способы, реализующие запись полутонных фотошаблонов несимметричных ДОО программным путем.

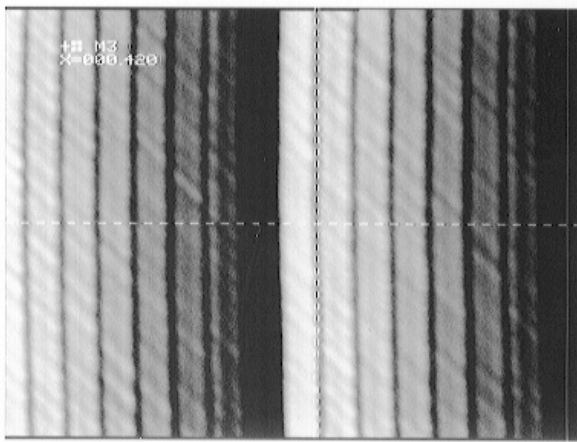
Изменение интенсивности лазерного пучка, согласованного со значениями фазы ДОО, осуществляется по команде в программе управления записью в момент прохождения нулевой метки - начала круга. Различают два способа получения требуемого значения оптической плотности. Первый, основан на изменении интенсивности лазерного пучка при переходе от «маски» к «маске». В этом случае маской назовем слой с одним значением фазы, и генерация полутонного фотошаблона осуществляется с помощью набора таких масок, как при обычной фотолитографии. Метод состоит в том, что каждому уровню фазы (номеру маски из набора) ставится в соответствие определенное значение интенсивности лазерного пучка. Находясь на текущем радиусе и начиная с минимальной интенсивности лазерного пучка, что соответствует, например, первому номеру маски из набора, находят все пересечения этого уровня с зонами ДОО и записывают их (рис. 3). Повторяя круг на этом радиусе, записывают последовательно и все остальные маски, соответствующие встреченным уровням фазы. Интенсивность лазерного пучка увеличивается пропорционально номеру маски, а ее значение соответствует калибровочной кривой для данного значения оптической плотности.

Преимуществом данного метода является его простота и практически линейная зависимость оптической плотности маски от интенсивности лазерного излучения. Основным недостатком этого метода является одна особенность материала DLW glass пластинки, которая проявилась при записи полутонных масок на CLWS.



**Рис. 3. Механизм записи при многопроходных методах; а) простой, б) мультиэкспозиционный.**

В начальный момент импульса лазерного излучения чувствительный слой DLW glass пластинки не успевает прогреться и просветляется недостаточно сильно, поэтому в начале записываемой линии всегда присутствуют темные области (рис. 4).



**Рис. 4. Промежутки между уровнями при записи несимметричных ДОЭ; ширина промежутков около 0.47 мкм.**

Ширина этих темных областей тем меньше, чем больше плотность энергии лазерного пучка и при интенсивности лазерного излучения полного просветления составляет менее 0.5 мкм на радиусе 100 мм. В результате получается, что полутоновой фотошаблон изрезан темными полосами на границах перехода от одного уровня к другому.

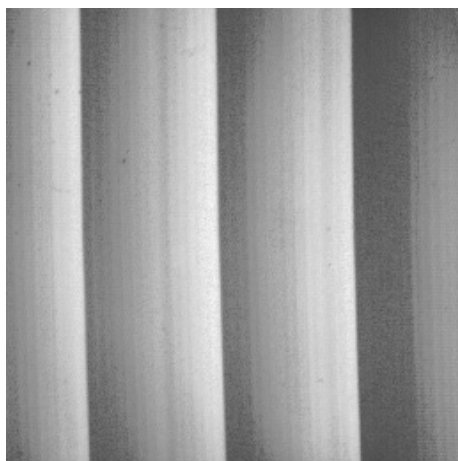
Частично избежать данного недостатка позволяет другой, так называемый многопроходный мультиэкспозиционный метод записи полутоновых фотошаблонов несимметричных ДОЭ. Заданная оптическая плотность достигается за счет экспозиции уже записанных штрихов, при этом каждый последующий штрих просветляется еще больше. От того, с какой стороны зоны ДОЭ мы начинаем запись штриха, зависит наличие или отсутствие темной, не прописанной области вообще. Например, если луч впервые встречает уровень с минимальным пропусканием, то не прописанная область захватит часть этого уровня и произойдет сглаживание ступенек в профиле микрорельефа. Наоборот, если луч впервые встретит уровень с максимальным пропусканием, то

произойдет лишь сглаживания острой кромки вертикальной стенки перехода от одной зоны к другой. Поскольку запись начинается и кончается в точках пересечения данного уровня фазы со всей зоной ДОЭ целиком, то точность, с которой можно прописать профиль фазы, практически равна одному угловому отсчету системы, приблизительно 0.25 мкм. Минимальная же ширина ступеньки при простой многопроходной записи не может быть меньше, чем три угловых отсчета системы. При многопроходной мультиэкспозиционной записи сложнее построить калибровочные кривые интенсивности лазерного пучка, так как зависимость изменения оптической плотности нелинейна к линейной зависимости изменения интенсивности. Это объясняется тем, что уменьшается поглощение лазерного излучения от прохода к проходу вследствие просветления материала фотошаблона. Таким образом, для одинаковой степени просветления на каждом повторе требуется большая плотность энергии лазерного пучка.

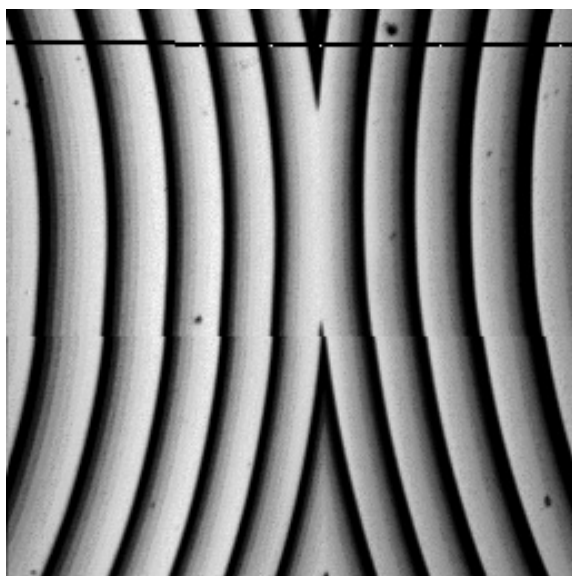
### **Результаты синтеза масок дифракционных оптических элементов.**

На круговой лазерной записывающей системе были записаны полутоновые фотошаблоны дифракционных оптических элементов: бифокальной линзы и растра микролинз. В обоих случаях фазовые функции элементов были заранее рассчитаны и представлены в виде двумерного массива в bitmap формате данных. Используемый формат данных позволяет наглядно представить конечный результат синтеза полутонового фотошаблона ДОЭ. Для записи же бифокальной линзы использовался лишь одномерный массив, вырезанный вдоль линии, проходящей через центр элемента. Расчетные параметры бифокальной линзы следующие: диаметр линзы – 10 мм, фокусные расстояния, первый и второй – 50 и 100 мм соответственно, количество уровней фазы – 40. Запись производилась по методу симметричных ДОЭ с минимальным радиальным смещением 0.75 мкм при эффективном размере пятна – 0.9 мкм. В приведенном фрагменте фотошаблона бифокальной линзы (рис.5) можно увидеть скачок фазовой функции в зонах ДОЭ.

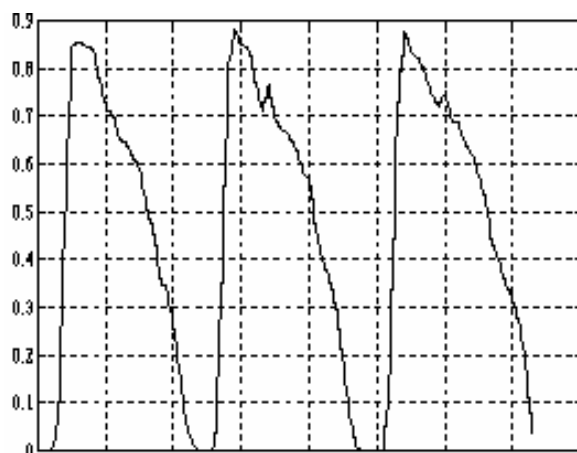
На рис. 6 представлен фрагмент растра микролинз прямоугольной формы. Фазовая функция микролинзы была рассчитана с параметрами: размер 1.4 x 2 мм, фокусное расстояние – 25 мм, число уровней фазы – 8. Размещение растра на подложке - симметричное относительно центра вращения, и он содержит 9 микролинз. Запись осуществлялась по многопроходному мультиэкспозиционному методу с эффективным размером пятна 0.9 мкм. Профиль функции пропускания нескольких зон микролинзы (рис.7) был получен с помощью телевизионной приставки к микроскопу и обработки данных на компьютере. Даже на этой приближенной диаграмме хорошо видно как согласуется профиль функции пропускания с фазовой функцией микролинзы.



**Рис. 5. Фрагмент фотошаблона бифокальной микролинзы**



**Рис. 6. Фрагмент фотошаблона растра микролинз.**



**Рис. 7. Диаграмма профиля функции пропускания нескольких зон.**

### **Заключение.**

Проведенные исследования показали, что новые DLW glass пластинки обладают рядом особенностей при применении их для записи полутонных фотошаблонов с помощью круговой лазерной записывающей системы. Довольно трудоемкими оказались тесты и эксперименты в части, касающейся определения калибровочных кривых, особенно для многопроходного мультиэкспозиционного метода. Наличие провалов при обычном многопроходном методе записи несимметричных ДОЭ также ограничивает их применение в качестве полутонных фотошаблонов. Однако, превосходные результаты для симметричных ДОЭ (и несимметричных для технологии фотоуменьшения и мультиплицирования), позволяют надеяться на массовое применение DLW glass пластинок в качестве полутонных фотошаблонов. На наш взгляд требуются дальнейшие исследования по изучению этого материала; преодолению провалов, оптимизации получения калибровочных кривых и согласования функции пропускания полутонного фотошаблона с профилем фазовой функции ДОЭ.

С помощью этого материала можно достичь очень высокого для полутонных фотошаблонов разрешения и практически гладкого профиля микрорельефа с «блеском». Более того, совершенно отсутствует химический процесс обработки материала после записи маски, а его стеклянная основа хорошо защищена от механических повреждений. Работа с этим материалом можно создать условия, позволяющие контролировать параметры записываемой маски и в реальном времени управлять процессом записи полутонных фотошаблонов дифракционных оптических элементов.

### **Литература.**

1. Полещук А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий // Автометрия, 1991, № 6.
2. Полещук А.Г. Методы формирования профиля поверхности дифракционных оптических элементов. // Компьютерная оптика, 1996, вып. 16, с. 54-61.
3. N.F. Borrelli and D.L.Morse. Microlens arrays produced by a photolytic technique.// Applied Optics., Vol. 27, No. 3. 1988.
4. Jurgen Jahns and Susan J. Walker. Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition. // Applied Optics Vol. 29, No. 7, 1990.
5. V.P.Koronkevich, V.P.Kiryanov, V.P.Korolkov, A.G.Polshchuk, V.V.Cherkashin, E.G.Churin, A.A.Kharissov. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser writing with circular scanning. // SPIE, Vol. 2363, 1995.