

Повышение дифракционной эффективности структур при прямой лазерной записи наклонными пучками: моделирование и эксперимент

В.П. Кирьянов¹, Н.А. Гурин^{1,2}

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1;

² АО «Новосибирский приборостроительный завод»,
630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 179/2

Аннотация

Проведён краткий обзор методов повышения дифракционной эффективности оптических элементов, синтезированных путём прямой лазерной записи. Отмечено, что предложенные ранее методы записи топологии подобных элементов с применением объёмных или поверхностных контурных масок не обеспечивают окончательного решения проблемы повышения дифракционной эффективности. Выполненные модельные и натурные эксперименты по формированию структур рельефно-фазовых оптических элементов путём записи профилей зон с помощью наклонных лазерных пучков показали принципиальную возможность формирования отвесных склонов обратных скатов зон и целесообразность развития данной технологии на основе лазерных генераторов изображений.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, дифракционная эффективность, прямая лазерная запись, оптические технологии.

Цитирование: Кирьянов, В.П. Повышение дифракционной эффективности структур при прямой лазерной записи наклонными пучками: моделирование и эксперимент / В.П. Кирьянов, Н.А. Гурин // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 235-245. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1161.

Citation: Kiryanov VP, Gurin NA. Improving the diffraction efficiency of structures in direct laser writing using obliquely incident beams: modeling and experiment. Computer Optics 2023; 47(2): 235-245. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1161.

Введение

Развитие технологий синтеза трёхмерных рельефно-фазовых оптических элементов (РФОЭ) стимулируется в настоящее время не только научными приложениями, но и потребностями высокотехнологичных отраслей промышленности. При этом упор в новых разработках делается на повышение эффективности синтезируемых элементов. С появлением лазеров, генерирующих излучение в области чувствительности фоторезистных рельефообразующих материалов, начали развиваться лазерные технологии записи элементов дифракционной оптики и микрооптики, при которых реализуют цифро-аналоговое управление интенсивностью записывающего лазерного пучка синхронно с его перемещением (сканированием) по поверхности фоточувствительной плёнки. Такой метод синтеза РФОЭ получил название прямой лазерной записи (ПЛЗ). Как правило, в синтезируемом рельефе высокоэффективных РФОЭ на границах так называемых зон Френеля присутствуют скачки фазового рельефа. В научной литературе такой рельеф получил название кусочно-непрерывного [1]. В идеале крутизна фазового рельефа на границах зон Френеля в подобных структурах должна составлять 90°. Однако реальная протяжённость фазового скачка на границах зон в синтезированных структурах составляет не менее половины диаметра пятна записи, формируемого записывающим лазером. Это приводит к за-

метному снижению дифракционной эффективности синтезированной структуры. Предложены различные подходы к решению проблемы повышения дифракционной эффективности РФОЭ: метод индивидуальной пиксельной оптимизации [2], метод объёмной контурной маски [3], метод поверхностной контурной маски [4] и прямая лазерная запись структур наклонными пучками [5, 6]. Цель данной работы – продемонстрировать перспективность использования метода прямой лазерной записи РФОЭ наклонными пучками для решения проблемы повышения дифракционной эффективности синтезируемых РФОЭ.

1. Обзор базовых методов повышения дифракционной эффективности РФОЭ

1.1. Анализ причин, снижающих дифракционную эффективность РФОЭ при ПЛЗ

При прямой лазерной записи РФОЭ по фоторезистам используется практически линейная зависимость глубины фазового профиля элемента от дозы экспозиции. На рис. 1 приведена интерферограмма микро-рельефа, записанного в фоторезисте Shipley S1818, с линейным нарастанием дозы экспозиции, заимствованная из [7]. Участок DF на этой интерферограмме является практически линейным. Линейная зависимость глубины сформированного в фоторезисте профиля от поглощённой энергии существенно упрощает как процесс записи РФОЭ, так и процесс моделирования процедуры ПЛЗ.

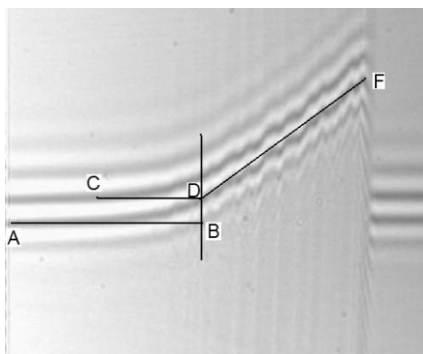


Рис. 1. Интерферограмма микрорельефа при ПЛЗ РФОЭ в фоторезисте [7]

В обоих случаях необходимо принимать во внимание характер распределения интенсивности лазерного излучения в окрестностях точки фокусировки. Принято считать, что выходное излучение лазеров в поперечном сечении характеризуется Гауссовым распределением. Поэтому характер распределения интенсивности излучения Гауссовых пучков в окрестностях точки фокусировки представляют выражением:

$$I_g(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{0\min}^2} \cdot \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right], \quad (1)$$

где

$$r_0(z) = r_{0\min} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_{0\min}^2}\right)^2} -$$

радиус пучка за пределами фокальной плоскости, $r_{0\min} = (f \cdot \lambda) / (\pi \cdot R)$ – радиус пятна в точке фокусировки. Здесь f – фокусное расстояние объектива, R – радиус пучка излучения на входе объектива. Известно также, что результат взаимодействия излучения с фоторезистом зависит от длительности воздействия излучения на фоторезист (т.е. от длительности экспозиции). На рис. 2 приведены результаты расчёта профиля следа взаимодействия лазерного УФ-излучения, полученные японскими исследователями [8], для различных экспозиций (при постоянной подводимой мощности излучения – для различных V – скоростей движения слоя фоторезиста) и при ортогональном падении излучения. Фазовый профиль зон Френеля формируется путём многократного воздействия излучением на фоторезист в последовательных позициях экспонирующего луча, определяемых величиной шага записи, при активном управлении подводимой мощностью излучения.

В зависимости от величины шага записи существенно меняется волнистость линейной, рабочей части зоны Френеля. На интерферограмме (рис. 1) хорошо видна подобная периодическая неровность рабочего склона РФОЭ. Многократное воздействие излучения на экспонируемый слой при наличии переналожения следов взаимодействия (ситуация, возможная при шаге записи менее диаметра пятна взаи-

модействия) математически может быть представлено как многократное суммирование (свёртка) распределений поглощённой фоторезистом энергии, создаваемых распределением симметричных интенсивностей в пучке $I(x)$, дискретно сдвигаемого по координате x . В результате многократного воздействия излучения формируется и линейный, рабочий склон зоны Френеля, и обратный, нерабочий. В дальнейшем рабочие склоны всех зон Френеля сформированного РФОЭ будут направлять свет в расчётном направлении, а обратные – в некотором произвольном направлении, снижая тем самым дифракционную эффективность сформированного элемента.

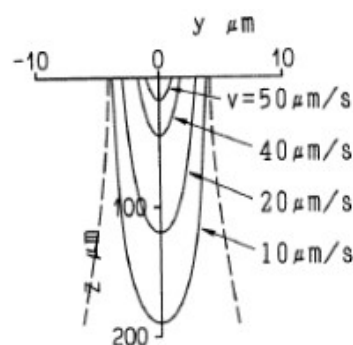


Рис. 2. Результаты расчёта глубины следа взаимодействия от скорости движения слоя фоторезиста [8]

Существует вполне определённое значение шага записи, при котором, с одной стороны, результирующая волнистость рабочей поверхности РФОЭ не превышает заданного уровня и, с другой стороны, длительность процедуры записи лежит в приемлемых пределах. Такой шаг записи считается оптимальным. Как правило, оптимальный шаг записи имеет значение меньше, чем диаметр пятна записи, но большее, чем радиус. При шаге записи меньше радиуса уменьшается волнистость рабочего склона (что уменьшает потери света в рабочем направлении), но увеличивается длительность обратного ската (что увеличивает долю света, отклоняемого в паразитном направлении). При шаге записи более диаметра пятна записи сохраняется постоянной протяжённость обратного ската, но увеличивается волнистость рабочей поверхности зон Френеля, что приводит к росту общих потерь. Эффективность РФОЭ, синтезированных с помощью ПЛЗ с ортогональным падением записываемого луча, составляет порядка $(63 \div 64)\%$ [9]. Повышение этого показателя – основная задача, решаемая при создании различных методов оптимизации прямой лазерной записи РФОЭ [10, 11].

1.2. Возможности метода индивидуальной пиксельной оптимизации

Моделирование процедуры ПЛЗ, выполненное в работах [9–11], показало, что при использовании классических алгоритмов записи наиболее значительное увеличение дифракционной эффективности

реализуется при использовании метода индивидуальной пиксельной оптимизации, когда рассчитывается уровень экспозиции для каждого пикселя записи. В этих работах показано, что дифракционная эффективность линейной решётки с периодом 10 мкм может быть увеличена с 63,4% до 80,8% при радиусе пятна записи 1,4 мкм, если использовать предложенный в этих работах метод оптимизации. Однако авторы работ [9–11] признают, что оптимизация на уровне отдельных пикселей практически неприемлема для записи реальных РФОЭ с произвольной топологией, например, таких как линзы Френеля. Для преодоления подобных ограничений в этих работах были предложены различные алгоритмы приграничной оптимизации. Например, одна из модификаций метода приграничной оптимизации состоит в том, что при записи используют два режима: расширенным пучком (в центре зон) и узким пучком в районе границ зон.

Однако реально возникающая протяжённость обратных склонов при использовании различных методов оптимизации остаётся не менее половины ширины используемого экспонирующего пятна.

1.3. Возможности и недостатки метода объёмной контурной маски

Чтобы обойти это фундаментальное ограничение, японскими специалистами, совершенствующими технологию ПЛЗ, было предложено использовать вариант записи, названный ими методом объёмной контурной маски (ОКМ) [3]. В этом методе проблема снижения абсолютного размера обратного ската РФОЭ решается путём использования комбинации из бинарной многостадийной технологии и одностадийной полутонной. Для этого на поверхности заготовки наносится слой высококонтрастного фоторезиста (этап 1), затем в фоторезисте на границах зон Френеля формируют узкие кольцевые окна с отвесными стенками. Ширину окна формируют близкой ширине обратного ската, возникающего при аналоговом формировании профиля зон. Реализуемая крутизна стенок в окнах в фоторезисте определяется характеристиками бинарной технологии, использующей высококонтрастные фоторезисты и коротковолновое оптическое излучение. На втором этапе в теле подложки через окна в фоторезисте с помощью ионно-плазменного травления формируют узкие канавки. Третий этап состоит в напылении на подложку слоя алюминия толщиной несколько большей, чем глубина канавки. Следующий этап состоит в выполнении химико-механической планаризации подложки, имеющей целью механически удалить слой алюминия с поверхности подложки. После выполнения данной операции в сформированных канавках остаётся алюминий, образующий так называемую объёмную контурную маску. В ходе пятой операции наносится слой низкоконтрастного фоторезиста, который на шестом

этапе подвергается воздействию излучения, пространственное распределение экспозиции которого точно совмещается с топологией контурной маски. На седьмом этапе осуществляется проявление фазового рельефа в фоторезисте. На восьмом этапе осуществляется второе ионно-плазменное травление с целью переноса рельефа в тело подложки. После полного удаления фоторезиста на последнем этапе осуществляют селективное удаление материала объёмной маски с поверхности фазового профиля с целью выделения в кварце крутых задних стенок объёмной топологии РФОЭ. Сформированный в соответствии с данной многостадийной технологией фазовый профиль РФОЭ представлен на рис. 3.

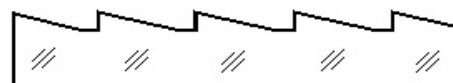


Рис. 3. Характерные искажения фазового профиля РФОЭ, синтезированного по методу ОКМ [3]

Как следует из данного рисунка, технология объёмной контурной маски позволяет формировать почти идеальный профиль. Однако имеются некоторые отличия от идеала в сформированном профиле РФОЭ. Их вносит операция удаления алюминиевой объёмной маски, после выполнения которой остаются участки рабочего склона с крутизной, отличающейся от крутизны остальных участков. Как следствие, они не посылают в нужном направлении падающее на него излучение и снижают тем самым дифракционную эффективность сформированного РФОЭ. Суммарная протяжённость этих участков равна суммарной протяжённости обратных склонов, получаемых при реализации классической ПЛЗ. Кроме того, из приведённого краткого описания технологии формирования РФОЭ по методу ОКМ нетрудно сделать вывод о весьма высокой трудоёмкости предложенной японскими исследователями технологии.

1.4. Возможности метода поверхностной контурной маски

Усилиями новосибирских исследователей [4] разработана более простая технология, использующая идею контурной маски, названная ими методом поверхностной контурной маски (ПКМ). Здесь первый этап также состоит в формировании металлической контурной маски. Но в отличие от выше рассмотренной технологии, контурная маска формируется не в объёме тела подложки, а на её поверхности. Подложка может быть стеклянной или кварцевой. Маска может быть нанесена так же, как и в предыдущей технологии, через окна в высококонтрастном фоторезисте, а может быть сформирована в результате селективного травления хромовой плёнки, что и было реализовано в ходе исследований новосибирских специалистов. Как и в предыдущей технологии, ширина по-

верхностной контурной маски выбирается равной ширине обратных скатов аналоговых профилей зон. На втором этапе сформированная поверхностная маска закрывается полностью слоем слабоконтрастного фоторезиста, который на следующем (третьем) этапе подвергается воздействию излучения, пространственное распределение экспозиции которого точно совмещается с топологией контурной маски. На следующем (четвёртом) этапе осуществляется проявление фазового рельефа в фоторезисте. И на финишном пятом этапе производится ионно-плазменное травление с целью переноса рельефа из фоторезиста в тело подложки. На этом этапе в едином технологическом цикле удаляется также и поверхностная контурная маска. Из-за разных скоростей ионно-плазменного травления кварца и хрома в теле кварцевой подложки формируется профиль с вертикальными задними стенками, но несколько искажённым (на ширину хромовой маски) рабочим профилем (рис. 4). В результате эти участки фазового профиля не посылают излучение в нужном направлении, что приводит, как и предыдущем методе, к падению дифракционной эффективности синтезированного РФОЭ.



Рис. 4. Характерные искажения фазового профиля РФОЭ, синтезированного по методу ПКМ [4]

Таким образом, видно, что оба метода: и метод ОКМ, и метод ПКМ – заранее предполагают неизбежное итоговое искажение фазового профиля рабочего ската РФОЭ. Как следствие, можно уверенно заявить, что поставленная задача создания простой технологии синтеза РФОЭ с эффективностью, близкой к 100 %, до сих пор окончательно не решена.

2. Одностадийная технология ПЛЗ фазовых профилей РФОЭ наклонными пучками

2.1. Возможность формирования с помощью наклонных пучков фазовых профилей РФОЭ с практически отвесными обратными скатами

В [5, 6] была представлена новая технология формирования рельефно-фазового профиля ДОЭ с практически отвесными обратными скатами за счёт использования наклонных пучков. В основе технологии записи лежит известное явление образования т.н. экспонирующего эллипсоида, происходящее при фокусировке рабочего излучения внутри слоя фоточувствительного материала типа фоторезиста. Суть явления в том, что при фокусировке излучения внутри некой прозрачной среды на всей трассе прохождения излучения отмечаются существенные градиенты плотности мощности как в направлении распространения пучка, так и поперёк. По мере приближения к точке фокусировки плотность мощности излучения в

пучке нарастает. Максимальное значение плотности мощности достигается в фокальной плоскости, в центре пятна фокусировки. В каждом поперечном сечении пучка плотность мощности распределена в соответствии с Гауссовым распределением как функция радиуса пятна. Как уже отмечалось выше, характер распределения интенсивности излучения Гауссовых пучков в окрестностях точки фокусировки может быть представлен выражением (1). Для анализируемой ситуации интересна та часть поперечного сечения пучка, распространяющегося в среде фоторезиста, в которой плотность мощности достигает некоторого порогового значения, при котором происходит модификация свойств фоторезиста. По мере удаления от фокальной плоскости объектива происходит увеличение поперечного сечения пучка. Как следует из (1), в поперечных сечениях пучка происходит довольно быстрое уменьшение плотности мощности подводимого излучения и резкое сокращение размеров областей, в которых сохраняются условия для экспонирования фоторезиста. В целом, области, в которых выполняются эти условия, распределены в пространстве симметрично относительно оптической оси и фокальной плоскости. Совокупность сечений, принадлежащих этому пространству, получила название экспонирующего эллипсоида.

В случаях, когда фокусировка производится на поверхность фоторезиста, область фоторезиста, в которой обеспечиваются условия экспонирования фоторезиста, естественно, начинается от фокального пятна и простирается внутри фоторезиста, но теперь симметрично только относительно оптической оси излучения. В данной ситуации эллипсоид вырождается в своеобразный экспонирующий коноид. Если при этом имеет место движение фоточувствительного слоя, то размеры областей, в которых обеспечиваются условия экспонирования фоторезиста, дополнительно изменяются, причём обратно пропорционально скорости движения слоя.

Несложно убедиться в том, что при ортогональном падении лазерного излучения на фоточувствительный материал этой модели записи соответствует классический вариант ПЛЗ, рассмотренный выше, при котором протяжённость обратного ската зон РФОЭ приближается к половине диаметра записываемого пятна.

В отличие от традиционного подхода к процедуре записи структур в [5, 6] предлагается диаметр лазерного пучка уменьшить не менее, чем в два раза по сравнению с входной апертурой объектива, а сам луч сместить в сторону относительно оси объектива, например, на половину радиуса входной апертуры. В результате этого на выходе из микрообъектива излучение лазера будет направляться на фоторезист под некоторым углом. Ход лучей в среде для этого случая представлен на рис. 5.

Так как после смещения луч лазера до входа в микрообъектив остаётся параллельным его оптиче-

ской оси, то в фокальной плоскости излучение концентрируется в окрестностях его оптической оси. При таком ходе луча фокальное пятно на поверхности фоторезиста представляет собой эллипс, малая полуось которого может быть определена из (1) как $2r_{0min}$. Дальнейший ход лучей в фоторезисте определяется его показателем преломления. Но в любом случае оптическая ось луча в среде фоторезиста отклоняется от вертикали, в результате чего вершина экспонирующего коноида, совпадающая с оптической осью пучка, также отклоняется от вертикали. Так как основание конуса образовано фокальным пятном на поверхности фоторезиста, то образующие конуса в диаметральной сечении коноида, совпадающим с большой полуосью фокального пятна, по отношению к вертикали располагаются асимметрично, причём наклон одной из них относительно поверхности записи может приближаться к 90° .

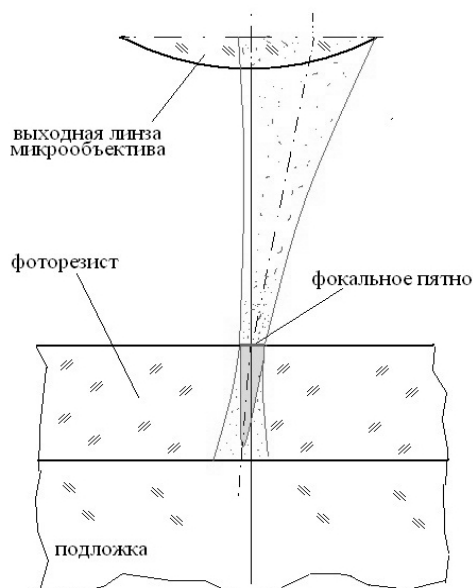


Рис. 5. Ход лучей в фоторезисте при косом падении пучка

2.2. Моделирование результатов экспозиции фоторезиста наклонным пучком

Математическое моделирование процесса экспонирования и травления фоторезиста при наклонном падении излучения, представленное в работе [6], показало, что конечный результат записи в значительной степени зависит от свойств фоторезиста. В ещё большей мере результат зависит от сочетания режимов записи: например, однопроходная ли запись, двухпроходная ли, в том числе с различной ориентацией луча в каждом проходе, или иная.

2.2.1. Моделирование зависимости профиля зоны от чувствительности фоторезиста при однопроходной записи и наклонном падении луча

Известно, что технологии ПЛЗ предъявляют различные требования к характеристикам фоторезистов. Например, бинарные технологии записи предполага-

ют использование фоторезистов повышенной чувствительности к излучению или, иными словами, требуются высококонтрастные фоторезисты. Технологии полутонной записи, наоборот, предполагают использование низкоконтрастных фоторезистов, обеспечивающих повышенную линейность «отклика» фоточувствительного материала на изменения интенсивности света. По этой причине при отработке новой технологии записи важно определиться с наиболее предпочтительным типом фоторезиста для технологии записи структур наклонными пучками.

Для оценки результатов записи профилей РФОЭ наклонными пучками была использована математическая модель формирования профиля путём экспонирования фоторезиста лазерными пучками произвольной ориентации и последующего селективного травления фоторезистов с различными значениями контраста. Селективное травление моделировалось в двумерном представлении разбиением зоны травления на элементарные квадратные ячейки со стороной $0,1 \text{ мкм}$. Каждой ячейке с номерами i, j ставилась в соответствие скорость травления $v(I)$, пропорциональная полученной дозе экспозиции $I(i, j)$. Собственно травление моделировалось последовательным уменьшением длин сторон ($Ax(i, j, t)$, $Ay(i, j, t)$) и диагоналей ($Axy(i, j, t)$, $Axy(i, j, t)$) элементарных ячеек, внутри которых скорость травления считалась постоянной. Единичный временной интервал Δt был выбран таким, чтобы выполнялось $\Delta t \cdot v \ll Ax, Ay, Axy, Axy$. В начальный момент времени $t=0$ начинают редуцироваться стороны и диагонали поверхностных ячеек, например: $Ay(1, j, \Delta t) = Ay(1, j, 0) - v[I(1, j)]$. Стороны и диагонали последующих ячеек начинают уменьшаться при достижении нулевого или отрицательного значения любого уменьшающегося параметра Ax, Ay, Axy, Axy текущей ячейки. Для анализа динамики процесса травления предусмотрена возможность сохранения поверхностных координат получающегося профиля для каждого момента времени. Чтобы убедиться в корректности используемой математической модели, вначале был выполнен расчёт классического случая, при котором след взаимодействия лазерного излучения формировался в слабоконтрастном фоторезисте при ортогональном падении лазерного излучения на поверхность фоторезиста, осесимметричной ориентации лазерного излучения относительно оптической оси микрообъектива и 100 %-м заполнении излучением входной апертуры микрообъектива (рис. 6а). При этом вначале рассчитывалось распределение экспозиции (поглощённой мощности излучения) в окрестностях фокального пятна, а затем рассчитывалась динамика травления профиля в объёме слабоконтрастного фоторезиста ($\kappa=3$). Сравнение получаемых на рис. 6а профилей с профилями на рис. 2 позволило убедиться в том, что используемая модель адекватно описывает процесс формирования профиля синтези-

руемой канавки. Отмечено также, что протяжённость скатов следа взаимодействия составляет половину эффективного диаметра фокального пятна, что характерно и для экспериментально регистрируемых профилей. Затем было выполнено моделирование следа взаимодействия в классическом варианте, но с диафрагмированием входного пучка. Характер формируемых профилей представлен на рис. 6б. Как видно, при диафрагмировании рабочего излучения диаметр

сфокусированного пятна на поверхности слоя увеличился практически в полтора раза, увеличились также и размеры экспонирующего конуса, что привело к заметному увеличению крутизны скатов.

То есть используемая математическая модель адекватно описывает то, что и должно происходить из-за увеличения глубины резкости фокусировки. В целом же симметричный характер протравленного профиля канавки принципиально не изменился.

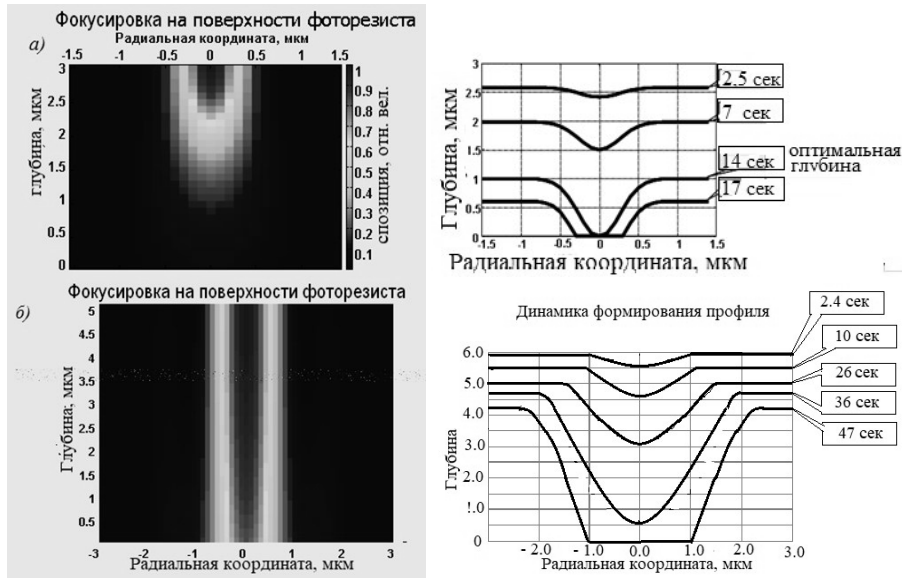


Рис. 6. Распределение плотности мощности и динамика формирования профиля в фоторезисте: а) не диафрагмированный пучок, б) диафрагмированный пучок

На рис. 7а приведены результаты расчёта экспонирования слабоконтрастного фоторезиста ($\kappa=3$) излучением лазера, диафрагмированного до половины диаметра входной апертуры и смещённого относительно оптической оси микрообъектива на половину радиуса входной апертуры. Смещение диафрагмированного входного излучения относительно оптической оси микрообъектива приводит к наклону оси излучения, выходящего из микрообъектива. На рисунке видно, что ось возникшего экспонирующего конуса также отклоняется от нормали. Моделирование процесса травления фоторезиста выявляет появляющуюся при такой записи заметную асимметрию скатов результирующего профиля в слабоконтрастном фоторезисте. Видно также, что крутизна левого ската стала практически в два раза круче, чем при ортогональном падении. При этом крутизна правого склона почти в пять раз меньше крутизны левого склона. То есть результаты моделирования подтвердили исходную гипотезу, изложенную в [5].

Результаты следующего модельного эксперимента, выполненного со среднеконтрастным ($\kappa=10$) фоторезистом, представленные на рис. 7б, однозначно указали на перспективность использования наклонных пучков при записи профилей РФОЭ. Здесь видно, что при совершенно одинаковых параметрах экспозиции слоёв фоторезиста проявленный в среднекон-

трастном фоторезисте фазовый профиль существенно отличается от соответствующего профиля в слабоконтрастном фоторезисте. Моделирование показывает, что сразу же после начала процесса травления возникающий при этом профиль стал устойчиво проявлять тенденцию к формированию отвесной стенки следа взаимодействия. На конечных стадиях проявления крутизна заднего склона следа взаимодействия приближается к 90° .

Таким образом, результаты модельного эксперимента указывают на то, что при использовании среднеконтрастных фоторезистов и технологии записи наклонными пучками можно формировать за одну технологическую операцию дифракционные зоны с практически отвесными задними стенками.

2.2.2. Моделирование технологии двухпроходной записи профилей с разными наклонами лучей

Формирование треугольного фазового профиля внутри каждой зоны Френеля путём многократных проходов с изменяемой интенсивностью записывающего излучения является обычной практикой традиционной ПЛЗ с ортогональным падением излучения. Как правило, подобным образом формируют профили зон, ширина которых много больше пятна записи. В предыдущем же параграфе рассматривался алгоритм формирования треугольного профиля зон, ширина которых равна диа-

метру пятна записи. Для текущей практики ПЛЗ это нетипичный режим записи, так как потери света здесь были слишком велики и для них к настоящему времени не были наработаны стандартные алгоритмы записи.

Поэтому интересно промоделировать режимы записи треугольных профилей зон шириной от одного

диаметра пятна записи до (2–3) диаметров, с помощью наклонных лучей с целью сохранения возможности формировать отвесные обратные склоны, крутизной порядка 90° . Простое сочетание проходов наклонным лучом с изменяемой мощностью излучения здесь даёт неудовлетворительный результат (рис. 8а).

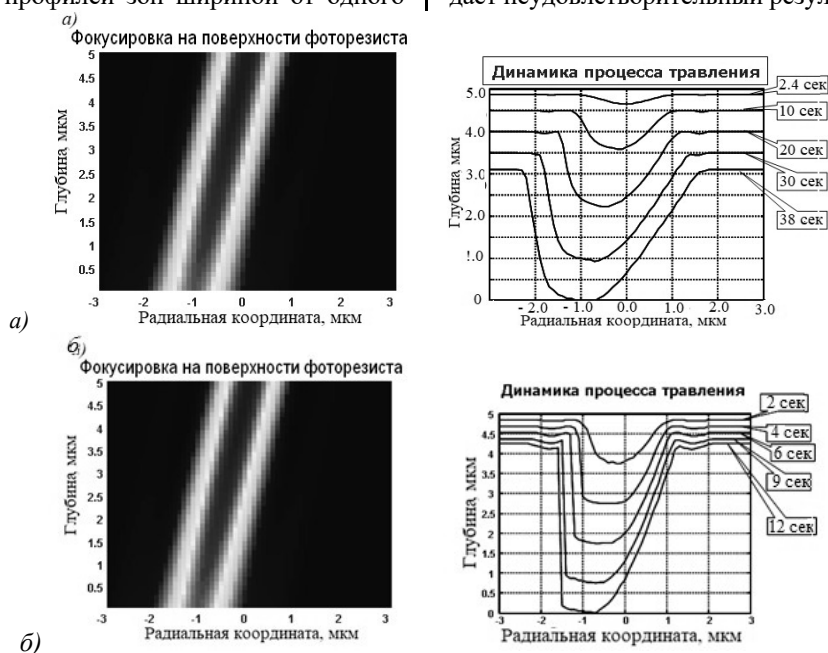


Рис. 7. Распределение плотности мощности и динамика травления фазового профиля при воздействии наклонным пучком и разных фоторезистах: $\kappa = 3$ (а); $\kappa = 10$ (б)

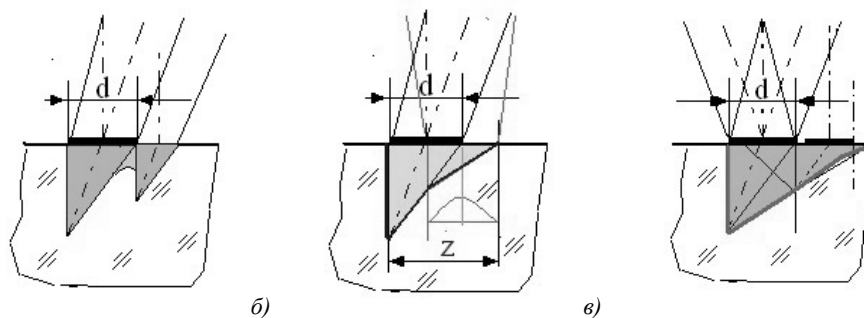


Рис. 8. Формирование фазового профиля при двух- и трёхпроходном режиме записи: двухпроходный режим (а); двухпроходный режим с разной ориентацией луча (б); трёхпроходный режим записи с разной ориентацией луча (в)

Видно, что изрезанность рабочего ската зоны слишком велика. Здесь более целесообразна двухпроходная запись с меняющейся ориентацией луча. Например, первый проход выполняется по рассмотренной выше технологии записи наклонным пучком, при которой формируется отвесный обратный скат, а второй – при стандартном (ортогональном) падении излучения половинной мощности и при смещении записывающей головки на половину диаметра пятна (рис. 8б). При таком алгоритме записи можно формировать треугольные профили дальних зон шириной до 1,5 диаметров пятна. Расширить размеры треугольной зоны до двух диаметров можно при использовании трёхпроходного режима с переменной ориентацией луча (рис. 8в). Первый проход выполняется по рассмотренной выше технологии записи наклонным пучком, а второй – по той же схеме,

но с противоположным сдвигом луча относительно оптической оси и изменённой мощностью излучения. В результате выполнения первых двух проходов луча формируется канавка с двумя отвесными стенками и наклонным дном. Третий проход выполняется по той же схеме, что и первый проход, но он выполняется со сдвигом записывающей головки на шаг, равный диаметру пятна записи, и мощностью, уменьшенной в два раза. При таком алгоритме можно ожидать формирование рабочего склона зоны с существенно уменьшенной изрезанностью оптической поверхности.

2.2.3. Моделирование технологии многопроходной записи треугольных зон Френеля

Такая многопроходная технология предполагает широкое применение рассмотренных выше двойных

проходов с противоположной ориентацией луча относительно его оптической оси при 100%-м наложении пятен записи и соответствующем управлении мощностью излучения. На рис. 9 представлены отдельные этапы пятипроходного цикла записи треугольной зоны шириной z , равной 2,5 диаметра пятна записи. На рис. 9а приведены два первых прохода наклонными пучками. Для этого записывающая головка фиксируется на расчётной позиции. Диафрагмированный луч смещается вправо относительно его оптической оси и в течение первого прохода экспонирует в фоторезисте треугольный профиль с левой отвесной стенкой. На втором проходе луч смещается относительно оптической оси в противоположную сторону и производит экспонирование фоторезиста излучением, мощность которого устанавливается по-

рядка 0,66 от мощности при первом проходе. В ходе второго прохода в фоторезисте экспонируется треугольный профиль с правой отвесной стенкой. Суммарно в результате двух проходов в фоторезисте экспонируется объём, поперечное сечение которого приближается к трапеции. После этого записывающая головка перемещается на один шаг, равный диаметру пятна записи. Третий проход выполняется по аналогии с первым, но при мощности излучения, равной мощности излучения на втором проходе, и сдвиге записывающей головки на один шаг, равный диаметру пятна записи. Четвёртый проход выполняется в этом же положении записывающей головки и по аналогии со вторым, но при уровне мощности излучения порядка 0,33 от уровня мощности излучения в первом проходе.

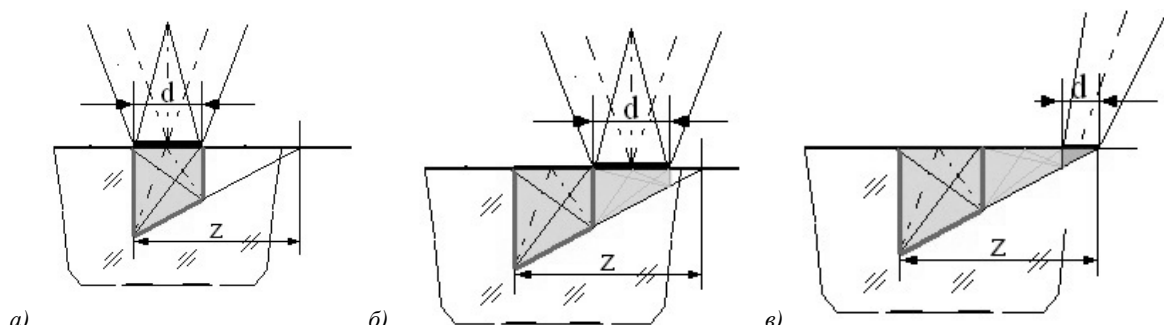


Рис. 9. Формирование треугольного профиля зоны шириной порядка 2,5 диаметра пятна записи: экспонирование фоторезиста за первые два прохода (а); экспонирование фоторезиста за четыре прохода (б); экспонирование фоторезиста за пять проходов (в)

В результате двух новых проходов в фоторезисте экспонируется объём, конфигурация поперечного сечения которого приближается к новой трапеции, но расширенных размеров (рис. 9б). И, наконец, пятый проход выполняется при новом сдвиге записывающей головки на шаг, равный диаметру пятна записи при устанавливаемой мощности излучения в четвёртом проходе, и при ориентации луча по аналогии с первым проходом. В результате пяти проходов формируется профиль треугольной формы, шириной порядка 2,5 диаметра исходного пятна записи.

Для того, чтобы сохранить большую крутизну обратных скатов зон у всех зон Френеля, целесообразно сохранить предложенный многопроходный алгоритм записи и для зон, ширина которых много больше диаметра пятна записи. Естественно, практическая реализация предложенного алгоритма записи потребует автоматизации процесса переключения ориентации диафрагмированного луча относительно оптической оси микробъектива.

3. Экспериментальные результаты по записи тестов в фоторезисте с помощью наклонных пучков

Эксперименты по записи тестов в фоторезисте с помощью наклонных пучков проводились на лазерном генераторе изображений модели ЛГИ-2 разра-

ботки ИАиЭ и КТИ НП СО РАН [12] (рис. 10а). Применительно к решаемой проблеме своеобразной особенностью генератора этой модели является конструкция его оптического канала в части подвода излучения 1 от технологического лазера к фоточувствительному слою 5 (рис. 10б).

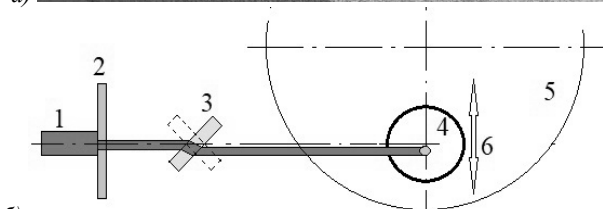
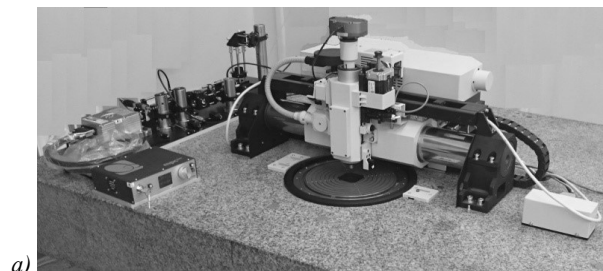


Рис. 10. Лазерный генератор изображений модели ЛГИ: внешний вид ЛГИ-2 (а); реализация процедуры смещения луча относительно оптической оси микробъектива (б)

В этой модели излучение лазера подводится в плоскости, ортогональной вектору б движения карет-

ки линейных перемещений, несущей на себе головку записи с микрообъективом 4. По этой причине требуемые для экспериментов изменения ориентации диафрагмированного с помощью вспомогательной пластины 2 записывающего луча относительно оптической оси микрообъектива 4 головки записи производится в горизонтальной плоскости путём поворота в ту или иную сторону стеклянной плоскопараллельной пластины 3.

3.1. Результаты однократной записи тестов с разной ориентацией записывающего луча

Тесты этой серии натуральных экспериментов начались с изучения результата формирования данным генератором профилей при классическом варианте записи в фоторезисте с ортогональным падением записывающего луча. Режим записи реализуется, если плоскопараллельная пластина 3 ориентирована ортогонально оптической оси микрообъектива. Результаты обработки фрагментов тестирования приведены на рис. 11. На рис. 11а приведены микрофотографии следов взаимодействия, записываемых с шагом, равным 10 мкм, а на рис. 11б – профилограммы этих следов, выполненные с помощью конфокального профилометра [13]. Они показывают, что оптический канал генератора ЛГИ-2 позволяет формировать профили следов взаимодействия без каких-либо особенностей, с эффективной шириной следа порядка 3,5 мкм. Как и ожидалось, при ортогональном падении излучения на фоторезист в нём после проявления формируются дорожки переменной глубины, имеющие с обеих сторон симметричные склоны, протяжённость которых равна половине диаметра действующего в данный момент пятна взаимодействия. Глубина канавок достигает величины, равной 0,28 мкм, при толщине фоторезиста порядка 0,5 мкм. Максимальная протяжённость скатов достигает 1,8 мкм.

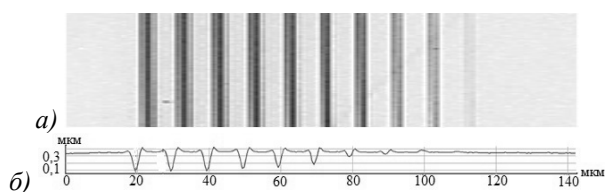


Рис. 11. Запись тестов при ортогональном падении излучения: микрофотографии следов взаимодействия, записываемых с шагом, равным 10 мкм (а), профилограммы этих следов, выполненные с помощью конфокального профилометра (б)

Затем была выполнена однократная запись тестов при повороте плоскопараллельной пластины 3 на угол порядка 30° против часовой стрелки. Результаты данного теста приведены на рис. 12. Здесь также приведены и микрофотографии следов (рис. 12а), и их профилограммы (рис. 12б).

В этих экспериментах эффективная ширина следа взаимодействия несколько меньше, чем при ортогональном падении лучей, и оценивается на уровне

(2,5–3,0) мкм. Глубина треугольных профилей достигает 0,32 мкм. На рис. 12б отчётливо видна возникшая асимметрия отклика фоторезиста на воздействие лазерного излучения. Правый склон канавок практически отвесный, левый – наклонный, что и ожидалось в данном эксперименте.

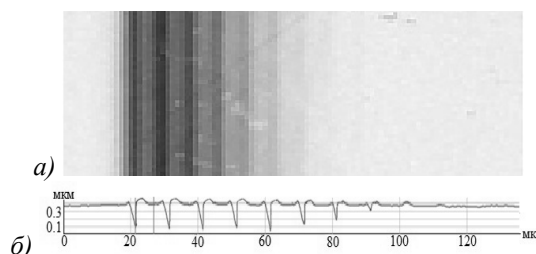


Рис. 12. Запись тестов при наклонном падении излучения (поворот пластины против часовой стрелки): микрофотографии следов (а) и их профилограммы (б)

В следующем эксперименте была выполнена однократная запись следов взаимодействия при повороте плоскопараллельной пластины 3 на угол порядка 30° по часовой стрелке. Результаты данного теста приведены на рис. 13. Здесь так же, как и на рис. 11 и 12, приведены микрофотографии следов (рис. 13а) и их профилограммы (рис. 13б). На этом рисунке эффективная ширина следа взаимодействия практически одинаковая с предыдущим экспериментом, глубина профиля достигает 0,3 мкм, также отчётливо видна ожидаемая асимметрия отклика материала на воздействие лазерного излучения. Но здесь уже левый склон канавки сформировался практически отвесным, а в поперечном сечении профиль зоны практически треугольный.

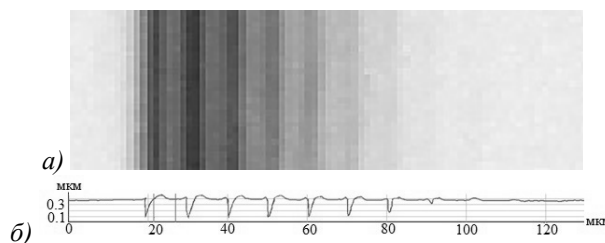


Рис. 13. Запись тестов при наклонном падении излучения (поворот пластины по часовой стрелке): микрофотографии следов (а) и их профилограммы (б)

Таким образом, можно утверждать, что данными натурными экспериментами была реально подтверждена ранее теоретически обоснованная модельными экспериментами уточнённая гипотеза о возможности формирования в едином технологическом цикле треугольных профилей дифракционных зон Френеля с практически отвесными обратными скатами.

3.2. Экспериментальные результаты тестирования записи канавок с управляемым наклоном дна

Реальная запись треугольных профилей произвольной ширины на основе алгоритмов, рассмотренных по существу модельных экспериментов, предложенных в подпараграфе 2.2.3 данной статьи, натолкнулась на ра-

нее не принимаемые во внимание особенности записи структур, выполняемых с помощью лазерных генераторов изображений. Вообще говоря, процедура формирования канавок с обеими отвесными стенками в результате записи с двойным проходом при разной ориентации луча, экспериментально была также подтверждена. На рис. 14 приведена микрофотография (рис. 14а) и профиль следа взаимодействия (рис. 14б), возникшего после двух проходов записывающей головкой, находящейся в одной позиции, но с разными наклонами луча и половинной мощностью излучения. Поэтому ширина и глубина канавки приблизительно в два раза меньше максимальных значений.

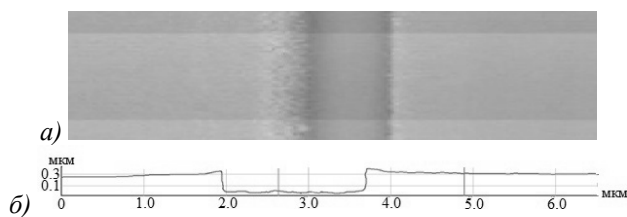


Рис. 14. Формирование суммарного профиля канавки при фокусировке излучения на фоторезист точно по центру перетяжки: микрофотография (а) и профиль следа взаимодействия (б)

Этот результат реально подтверждает высказанную в 2.2.3 гипотезу о возможности формирования прямоугольных канавок с двумя отвесными стенками и управляемой глубиной. В целом же эксперименты показали, что профиль, формируемый за несколько проходов, подвержен воздействию ряда возмущающих факторов. И основной из них выступает неопределённость положения плоскости фокусировки микрообъективом излучения на фоторезист. Когда система автофокусировки удерживает микрообъектив в позиции, когда поверхность фоторезиста лежит точно по центру «перетяжки» излучения, то пятно взаимодействия формируется симметричным относительно оптической оси луча, в том числе и при наклонном падении излучения, и результат взаимодействия точно соответствует ожидаемому профилю. Если же система удерживает микрообъектив в позиции, при которой поверхность фоторезиста оказывается несколько выше центра перетяжки, то при наклонном падении луча пятно взаимодействия смещается в сторону так, что формируемые в каждом проходе отвесные края треугольных профилей приближаются к оптической оси микрообъектива, каждый со своей стороны. В этой ситуации у суммарного профиля появляются плавные стенки. Причём если смещение осуществлялось не одинаковым образом, то возникающие наклоны стенок формировались разными (рис. 15а). Если же система автофокусировки удерживает микрообъектив в позиции, когда поверхность фоторезиста находится ниже центра «перетяжки», то при наклонном падении луча пятно взаимодействия смещается в сторону, для которой характерно удаление отвесных краёв треугольных профилей от оптической оси. Как

следствие, у суммарного профиля появляются выпуклости на дне канавки (рис. 15б).

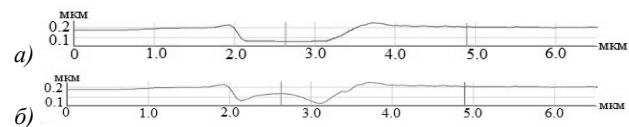


Рис. 15. Формирование суммарного профиля канавки при фокусировке излучения на фоторезист не точно относительно центра перетяжки: суммарный профиль при смещении поверхности фоторезиста вверх относительно центра перетяжки и разных интенсивностях в каждом проходе (а); суммарный профиль при смещении поверхности фоторезиста вниз относительно центра перетяжки и разных интенсивностях в каждом проходе (б)

Данные эксперименты показали, что многопроходная технология записи высокоэффективных фазовых профилей РФОЭ с помощью пучков, имеющих переменный наклон, предъявляет повышенные требования к точности работы ПИД – регулятора системы автофокусировки в части удержания фокальной плоскости микрообъектива головки записи в позиции, совпадающей с поверхностью фоторезиста, нанесённого на подложку.

Заключение

Выполненные модельные и натурные эксперименты по формированию высокоэффективных структур рельефно-фазовых оптических элементов путём записи треугольных профилей зон с отвесными нерабочими скатами с помощью наклонных пучков показали целесообразность дальнейшего развития данной технологии на основе разработанных в СО РАН лазерных генераторов изображений. Особое внимание при доработке данной технологии записи следует уделить:

- автоматизации процедуры переключения направления параллельного смещения излучения технологического лазера относительно оптической оси канала записи генератора,
- доработке программного обеспечения генератора в части совершенствования процедуры записи структур,
- повышению требований к точности удержания фокальной плоскости микрообъектива головки записи генератора изображений относительно поверхности тонкого слоя фоторезиста, в котором формируются фазовые профили зон РФОЭ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

References

- [1] Gale MT, Rossi M, Pedersen J, Schuetz H. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists. Opt Eng 1994; 33(11): 3556-3566.

- [2] Korolkov VP, Nasyrov RK, Shimansky RV. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements. *Appl Opt* 2006; 45: 53-62.
- [3] Ogusu M, Iwasaki Y. Method of manufacturing diffractive optical elements. US Patent 6930834 of August 16, 2005.
- [4] Korolkov VP. Application of a contour mask to increase the diffraction efficiency of a DOE with a piecewise continuous relief. International Scientific Conference «SibOptika-2013», Novosibirsk, SSGA, 2013: 20-24.
- [5] Kiryanov VP, Nikitin VG. Method for direct laser writing of kinoform lenses in thick layers of photosensitive materials such as photoresists (options) [In Russian]. Pat RF of Invent N 2498360 of November 10, 2013.
- [6] Kir'yanov VP, Nikitin VG. Modeling of the formation of steep portions of a piecewise continuous profile in a one-step technology for fabricating diffractive optical elements using oblique laser beams. *Optoelectron Instrum Data Process* 2017; 53(6): 548-553.
- [7] Kiryanov VP, Kiryanov AV, Korolkov VP. Circular scanning laser imaging generators: new opportunities for traditional directions [In Russian]. In Book: Anniversary collection of selected works of KTI NP SB RAS. Novosibirsk: "Geo" Publisher; 2012: 184-216.
- [8] Maruo S, Jkuta K. Submicron stereo-lithography for the production of freely moveable mechanisms by using single-photon polymerization. *Sens Actuator A Phys* 2002; 100: 70-76.
- [9] Korolkov VP, Pruss C, Reichelt S, Tiziani HJ. Preliminary results in investigation of diffractive high-efficiency objectives. *Computer Optics* 2002; 23: 33-39.
- [10] Korolkov VP, Nasyrov RK, Gutman AS, Sametov AR, Sukhikh SA. Optimization of halftone technology for manufacturing diffractive elements with piecewise-continuous relief. 7th Int Conf «Holoexpo-2010», Moscow 2010: 196-202.
- [11] Korolkov VP, Nasyrov RK, Shimansky RV. Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements. *Proc SPIE* 2007; 6732: 67320P. DOI: 10.1117/12.751913.
- [12] Verkhoglyad AG, Zavyalova MA, Kalichkin AE, Kokarev SA, Korolkov VP. Circular laser writing system for fabrication of phase and amplitude microstructures on spherical surfaces. *Sensors and Systems* 2015; 10: 45-52.
- [13] Bessmeltsev VP, Raldugin AN, Terentiev VS. Development of a multichannel confocal system for studying the surface microprofile. 9th Int Conf «Holoexpo-2012», Suzdal 2012.

Сведения об авторах

Кириянов Валерий Павлович, 1940 года рождения, в 1964 г. окончил физико-технический факультет Уральского политехнического института по специальности «Программирующие устройства и системы управления», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН. Область научных интересов: лазерные интерферометрические преобразователи перемещений, оптические угловые преобразователи. E-mail: kiryanov@iae.nsk.su.

Гурин Никита Андреевич 1994 года рождения, в 2018 году окончил Сибирский государственный университет геосистем и технологий по специальности «Управление жизненным циклом опико-электронных приборов и комплексов», аспирант, главный оптик в АО «Новосибирский приборостроительный завод», инженер в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, лазерные интерферометрические преобразователи перемещений, оптические угловые преобразователи. E-mail: gna200694@yandex.ru.

ГРНТИ: 29.31.27

Поступила в редакцию 26 мая 2022 г. Окончательный вариант – 13 июля 2022 г.

Improving the diffraction efficiency of structures in direct laser writing using obliquely incident beams: modeling and experiment

V.P. Kiryanov¹, N.A. Gurin^{1,2}

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia, Academician Koptug avenue, 1;

² SC "Novosibirsk Instrument-Making Plant", 630049, Novosibirsk, Russia, st. Dusi Kovalchuk, 179/2

Abstract

A brief review of methods for increasing the diffraction efficiency of optical elements synthesized by direct laser writing is done. It is noted that the previously proposed methods for recording the topology of similar elements using volumetric or surface contour masks do not provide an ultimate solution to a problem of increasing the diffraction efficiency. The performed model and physical experiments on the fabrication of structures of surface-relief phase optical elements by recording zone profiles using oblique laser beams show the fundamental possibility of forming steep side walls of the reverse zone slopes and the feasibility of developing this technology based on laser image generators.

Keywords: diffractive optical elements, diffraction efficiency, direct laser record, optical technologies.

Citation: Kiryanov VP, Gurin NA. Improving the diffraction efficiency of structures in direct laser writing using obliquely incident beams: modeling and experiment. *Computer Optics* 2023; 47(2): 235-245. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1161.

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education within Project No. 121042900050-6.

Authors' information

Valerii Pavlovich Kiryanov, (b. 1940), graduated from Ural Polytechnic Institute with a degree in Programming Devices and Control Systems in 1964, doctor of Technical Sciences, leading researcher at the Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests: laser interferometric displacement encoders, optical angle encoders. E-mail: kiryanov@iae.nsk.su.

Nikita Andreevich Gurin, (b. 1994), graduated from the Siberian State University of Geosystems and Technologies with a degree in Life Cycle Management of Optoelectronic Devices and Complexes in 2018, postgraduate student, chief optician at JSC Novosibirsk Instrument-Making Plant, engineer at the Institute Automation and Electrometry SB RAS. Research interests: diffractive optics, laser interferometric displacement encoders, optical angle encoders. E-mail: gna200694@yandex.ru.

Received May 26, 2022. The final version – July 13, 2022.
