

# Модифицированный метод прямой лазерной записи радиально-симметричных структур

С.В. Ганчевская<sup>1,2</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Предложен и промоделирован модифицированный метод прямой лазерной записи по фоторезисту. Метод основан на использовании плоскопараллельной пластины для смещения пишущего пучка. Проведено экспериментальное исследование по записи радиально-симметричных структур пучком со смещенной фокусировкой.

## 1. Введение

В настоящее время методы лазерной записи микрорисунка являются наиболее распространенными и универсальными для формирования топологии фотошаблонов различного назначения: дифракционных элементов, угловых шкал, сеток и т.д. Существует технология формирования дифракционных микроструктур в кристаллических образцах ниобата лития [1,2], фоторезисте [3,4], в плёнках хрома [5-7], плёнках молибдена [8,9].

Прямая лазерная запись может применяться как для одномерных [2], так и для дву-, трёхмерных структур[1]. В работе [1] показана универсальность метода прямой фемтосекундной лазерной записи для микроструктур с примесью железа на примере кристаллов ниобата лития. Неразрушающая фотомодификация позволяет полностью или частично стирать или изменять ранее записанные структуры. В работе [2] сформированы фазовые дифракционные структуры в кристаллических образцах ниобата лития с поверхностным легированием фоторефрактивными примесями с использованием процедур поточечного последовательного экспонирования фоточувствительной области лазерным излучением и ее параллельного экспонирования через одномерный амплитудный транспарант.

Электронно-лучевая литография является одной из технологий, позволяющих достичь сверхвысокого разрешения. Экспонирование резиста производится посредством отклонения пучка и не требует применения масок, что является основным преимуществом данной методики. В работе [3] предложен метод формирования микрорельефа путём прямого электронно-лучевого травления резиста. Способ позволяет получать маскирующее изображение (или другого) в резисте в сухом одностадийном вакуумном процессе экспонирования, сопровождающегося одновременным проявлением изображения. Это достигается за счет прямого травления резиста и превращения его в летучие продукты непосредственно при воздействии электронного луча в экспонированных областях. На примере

резиста из полиметилметакрилата показано, что метод удобен для получения микро- и наноструктур со скруглённым профилем сечения и для получения пространственных 3D-структур с хорошей точностью вертикальных размеров изображения и низкой шероховатостью поверхности [4]. Основным недостатком электронной литографии является низкая производительность.

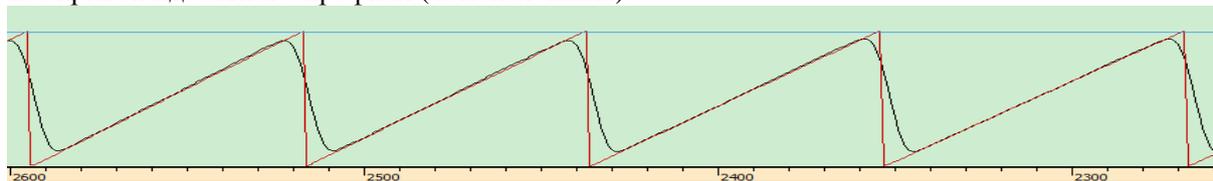
Наиболее отработанным и распространённым методом изготовления литографических масок и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) остается термохимическое окисление хрома [5-7]. Относительно недавно появились работы, посвященные дальнейшему развитию технологии аддитивного метода изготовления микрорельефа фазовых решеток на пленке молибдена [8, 9]. Предложенная технология заключается в термическом окислении маски на основе тонкого металлического слоя молибдена (15–70 нм). Затем подложка травится через полученную маску.

Основной недостаток записи структур рассмотренными технологиями – малый размер. В настоящее время одним из самых лучших методов записи по большому растру является запись радиальных структур методом прямой лазерной записи. В Новосибирске совместно ИАиЭ СО РАН и КТИ НП СО РАН разработана круговая лазерная записывающая система (КЛЗС). Принцип действия КЛЗС основан на формировании изображения сфокусированным лазерным лучом на вращаемой стеклянной подложке с нанесенным на нее хромом или фоторезистом в режиме кругового растрового сканирования. КЛЗС нового поколения позволяет записывать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) на сферических поверхностях с ошибкой волнового фронта менее  $\lambda/100$  [10]. Использование двух лазеров позволяет реализовать на данной системе запись многоуровневого микрорельефа фазовых ДОЭ на пленках фоторезиста и амплитудных фотошаблонов на тонких пленках хрома.

## 2. Модифицированный метод записи радиально-симметричных структур

При записи радиально-симметричных структур из-за особенностей КЛЗС существует проблема получения вертикальных стенок, в результате снижается светосила линзы, а для короткофокусных систем появляется предельная светосила.

На рис. 1 показана профилограмма гармонической линзы (плавная линия) с наложенной на нее кривой идеального профиля (ломаная линия).



**Рисунок 1.** Профилограмма изготовленной линзы (плавная линия) с наложенной на нее кривой идеального профиля (ломаная линия).

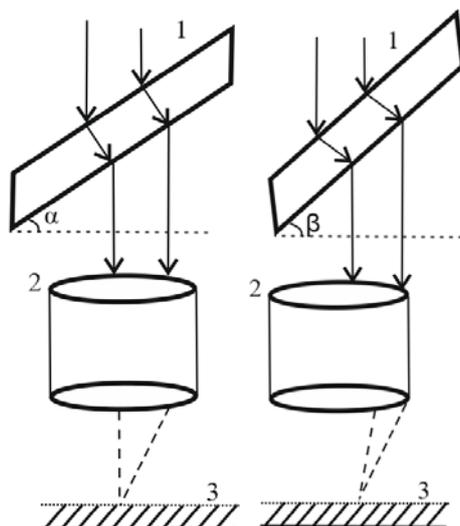
Как видно из рисунка 1 отклонения микрорельефа наблюдаются в точках резкого изменения профиля. В остальных местах отклонения составляют менее 50нм, что соответствует оптическому качеству поверхности (менее  $\lambda/10$ ).

Для реализации записи вертикальных поверхностей в микрорельефе необходимо модифицировать метод записи путем смещения лазерного пучка, входящего в микрообъектив. В результате такого смещения симметричный конус фокусировки должен превратиться в ассиметричный (рис.2) и, при записи в определенном направлении будет отсутствовать засветка боковой области резиста. Самый простой и быстрый способ смещения пучка, без радикального вмешательства в конструкцию КЛЗС – установка плоскопараллельной пластины под регулируемым углом (рис.2) перед объективом для смещения записывающего луча. На рисунке 2 показано как смещается луч при изменении угла наклона пластины.

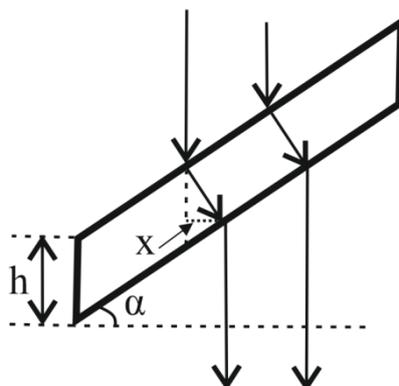
При прохождении света через плоскопараллельную пластину свет дважды претерпевает преломление, в результате чего луч, падающий на пластину и луч, выходящий из нее, будут параллельными. Величина смещения в такой конструкции будет определяться формулой (1):

$$x = h \sin(\alpha) \quad (1)$$

К сожалению, такая пластина приводит к определенным энергетическим потерям, которые возникают вследствие наличия френелевского отражения. Потери эти зависят от величины смещения лазерного пучка, которую необходимо получить. Как видно из рис.2 минимальное смещение определяется размером самого пучка (пучок смещается на половину своего размера), а максимальное размером апертуры (пучок смещается к краю апертуры).



**Рисунок 2.** Схема смещения пучка плоскопараллельной пластиной: а) на минимальный угол; б) на максимальный угол.



**Рисунок 3.** Схема смещения пучка плоскопараллельной пластиной.

Будем рассчитывать минимальный и максимальный углы наклона пластины с учётом размеров входного зрачка (5,05 мм) и лазерного пучка при фокусировке (2,1 мм) (параметры КЛЗС). В качестве плоскопараллельной пластины предполагается использовать стандартную кварцевую подложку толщиной 2 мм, тогда диапазон изменения угла наклона пластины составляет от  $32^\circ$  до  $57^\circ$ .

Коэффициенты отражения при s-поляризации и p-поляризации определяются по формулам:

$$R_s = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

При смещении луча на минимальный угол теряется от 9 до 15 % мощности, в зависимости от поляризации, а на максимальный – порядка 25 %, при этом толщины стандартной подложки уже недостаточно для смещения пучка на край апертуры.

### 3. Заключение

Модифицирован метод прямой лазерной записи по фоторезисту, основанный на использовании плоскопараллельной пластины для смещения пишущего пучка. Уменьшение эффективности компенсируется сменой области засветки фоторезиста (объем засвечиваемого фоторезиста уменьшается), поэтому энергетические потери не должны оказать заметного влияния на скорость записи.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26), Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6 и гранта Президента НШ-6307.2018.8.

### 5. Литература

- [1] Mizeikis, V. Direct Laser Writing: Versatile Tool for Microfabrication of Lithium Niobate / V. Mizeikis, V. Purlys, D. Paipulas, R. Buividas, S. Juodkasis // JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2012. – Vol. 7(3). – P. 345-350.
- [2] Безпальный, А.Д. Волноводные и дифракционные элементы устройств и приборов фотоники, оптически индуцированные в подложках ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем / А.Д. Безпальный, А.О. Верхотуров, В.М. Шандаров // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Т. 38, № 4. – С. 86-90.
- [3] Bruk, M.A. The new dry method of mask (relief) formation by direct electron-beam etching of resist / M.A. Bruk, E.N. Zhikharev, D.R. Streltsov, V.A. Kalnov, A.V. Spirin // Microelectronic Engineering. – 2013. – Vol. 112. – P. 1-4.
- [4] Брук, М.А. Некоторые особенности нового метода формирования микрорельефа путем прямого электронно-лучевого травления резиста / М.А. Брук, Е.Н. Жихарев, Д.Р. Стрельцов, В.А. Кальнов, А.В. Спирин, А.Е. Рогожин // Компьютерная Оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 204-210.
- [5] Полещук, А.Г. Датчик Гартмана на основе многоэлементных амплитудных масок с аподизированными апертурами / А.Г. Полещук, А.Г. Седухин, В.И. Трунов, В.Г. Максимов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С.695-703.
- [6] Вейко, В.П. Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур / В.П. Вейко, Д.А. Синёв, Е.А. Шахно, А.Г. Полещук, А.Р. Саметов, А.Г. Седухин // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 4. – С. 562-571.
- [7] Волков, А.В. Высокора разрешающая лазерная запись контактных масок на плёнках молибдена для изготовления элементов дифракционной оптики / А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 220-225.
- [8] Poleshchuk, A.G. Direct laser writing of gray-scale microimages with a large dynamic range in chromium films / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, A.G. Sedukhin, A.R. Sametov, R.V. Shimanskii // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2015. – Vol. 51(3). – P. 287-292.
- [9] Казанский, Н.Л. Формирование микрорельефа методом термического окисления пленок молибдена / Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т.42, №3. – С.106-110.
- [10] Верхогляд, А.Г. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А.Г. Верхогляд, М.А. Завьялова, А.Е. Качкин, С.А. Кокарев, В.П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – №9-10. – С. 47-54.

## Modified method of direct laser writing radially symmetric structures

S.V. Ganchevskaya<sup>1,2</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute – branch of the Federal Scientific Research Centre “Cristallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** A modified direct laser photoresist recording method was proposed and modeled. The method is based on using a planar-parallel plate to shift the writing beam. An experimental study was carried out on the recording of radially symmetric structures by a beam with a shifted focusing.

**Keywords:** writing beam, radially symmetric structures, circle laser writing system.