

*Д. Е. Зайцева^{1,2}, В. П. Корольков^{*1}, Р. И. Куц¹, А. Р. Саметов¹, С. К. Голубцов¹*

Применение металлических полутоновых масок для изготовления многоуровневых дифракционных элементов

¹Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация
**e-mail: victork@iae.nsk.su*

Аннотация. В данной работе реализована технология изготовления многоуровневых дифракционных оптических элементов методом полутонной фотолитографии с использованием полутонных масок, сформированных методом термохимической лазерной записи на тонких пленках хрома. Технология полутонной фотолитографии включает в себя этапы нанесения фоторезиста на подложку, на которой нужно сформировать рельеф, экспонирования слоя фоторезиста методом контактной фотолитографии через полутонную маску и его жидкостного проявления. Также обсуждена методика компенсации искажений при изготовлении высокоэффективных многоуровневых дифракционных оптических элементов, основанная на коррекции обратного ската путем встраивания специальных переходных профилей на границах дифракционных зон.

Ключевые слова: полутонная фотолитография, полутонная маска, многоуровневые дифракционные оптические элементы, термохимическая лазерная запись

*D. E. Zaitseva^{1,2}, V. P. Korolkov^{*1}, R. I. Kuts¹, A. R. Sametov¹, S. K. Golubtsov¹*

Application of Metal Gray-Scale Masks in Fabrication of Multilevel Diffractive Optical Elements

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
**e-mail: victork@iae.nsk.su*

Abstract. In this work, we have implemented a technology for manufacturing multilevel diffractive optical elements by grayscale photolithography using true grayscale masks formed by thermochemical laser writing on thin chromium films. The technology of grayscale photolithography includes the steps of applying a photoresist to a substrate on which it is necessary to form a relief, exposing the photoresist layer by contact printing through a grayscale mask, and its liquid developing. A technique for compensating for distortions in the manufacture of highly efficient multilevel diffractive optical elements is also discussed, based on the correction of the reverse slope by embedding special transition profiles at the boundaries of diffractive zones.

Keywords: grayscale photolithography, grayscale mask, multilevel diffractive optical elements, thermochemical laser writing

Введение

Полутонная литография с использованием полутонных масок (ПМ) часто применяется в производстве высокоэффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В классической технологии фотолитографии на плоскую под-

ложку наносится фоторезист, затем слой фоторезиста экспонируется на установке контактной или проекционной печати через фотошаблон, состоящий из прозрачных и непрозрачных участков. В местах, подвергшихся воздействию света, меняются физико-химические свойства фоторезиста, и при дальнейшей химической обработке в зависимости от состава фоторезиста удаляются засвеченные или не засвеченные участки. В полутоновой фотолитографии используется фотошаблон с плавным изменением пропускания, что ведет после проявления к формированию участков фоторезиста с различной остаточной толщиной пленки [1]. Преимуществом метода полутоновой фотолитографии является достаточно простое изготовление и тиражирование многоуровневых ДОЭ. Данный метод позволяет воспроизводимо повторять форму рельефа от образца к образцу в соответствии с топологией ПМ.

Первоначально маски для фотолитографии изготавливались на эмульсионных фотопластинах и имели достаточно большую зернистость, толщину маскирующего слоя, малую механическую прочность и существенную усадку слоя после жидкостного проявления и сушки. Изготовление ПМ с помощью прямой электронно-лучевой или лазерной записи на специальных стеклах (HEBS-glass [2], LDW-glass [3]) или тонких пленках кремния (Si [4]) или металлов (Sn [5], Sn/In or Bi/In [6]) позволяет существенно упростить и улучшить процесс, но эти специальные стекла являются достаточно дорогими, а тонкопленочные материалы [4-6] не производятся промышленностью как стандартные. Разработка ПМ, изготавливаемых методом термохимической лазерной записи на пленках хрома [7], открывает новые возможности для серийного изготовления высокоэффективных ДОЭ. Методика создания ПМ состоит из трех основных этапов: нанесения пленки хрома толщиной порядка 30–50 нм; термохимической лазерной записи с изменяемой мощностью, в результате которой формируется скрытое изображение из оксида хрома переменной толщины; проявления этого изображения в селективном травителе [8].

В данной работе обсуждаются первые результаты реального применения хромовых полутоновых фотошаблонов для формирования рельефа многоуровневых ДОЭ в пленках фоторезиста.

Формирование пленки фоторезиста

Для формирования пленки фоторезиста использовался фоторезист ФП-3535, который наносился в два слоя на стеклянную подложку методом центрифугирования при частоте вращения 3000 об/мин и длительности вращения 40 с. Данный метод позволяет контролировать толщину пленки скоростью вращения, а также формировать, под действием центробежных сил, наиболее однородные пленки, что является преимуществом по сравнению с другими способами нанесения фоторезиста. Два слоя фоторезиста наносились для того, чтобы исследовать возможности метода для изготовления микролинзовых глубоких структур и спектральных дифракционных линз [9].

Толщина пленки измерялась сравнением сдвига интерференционных полос света, отраженного от поверхности пленки и подложки в царапине, с помощью

интерферометра белого света (WLI, Breitmeier Messtechnik GmbH). В результате двухслойного нанесения были получены пленки толщиной 9 мкм.

Метод формирования полутонной маски

Методика записи ПМ (рис. 1) включает три этапа: нанесение пленки хрома определенной толщины (1), экспонирование сфокусированным лазерным пучком на круговой лазерной записывающей системе CLWS300IAE (2) [7], селективное травление до достижения поверхности подложки. Термохимическая лазерная запись микроизображения происходит при нагреве пленки хрома лазерным излучением, когда мощность пучка превышает определенный уровень, достаточный для начала активного окисления пленки, зависящий от скорости сканирования сфокусированного пучка по подложке. Верхний предел мощности пучка определяется началом плавления и испарения пленки хрома. В этих пределах мощность пучка изменяется так чтобы создать определенное распределение оксида хрома, скрытое изображение в котором проявляется после обработки в селективном травителе [8].

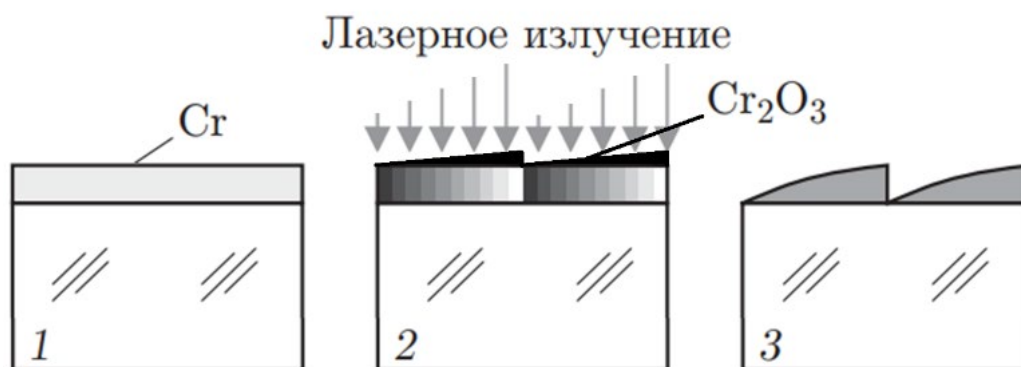


Рис. 1. Технологические этапы создания пропускающего ПМ (1 – напыление пленки хрома, 2 – лазерная запись, 3 – селективное травление)

Метод полутонной фотолитографии

Экспонирование слоя фоторезиста, нанесенного на стеклянную подложку, осуществлялось на установке контактной фотолитографии, оснащенной светодиодным матричным источником с длиной волны 405 нм. В случае наличия зазора Z между поверхностью фоторезиста и поверхностью ПМ рельеф дифракционных зон будет сглаживаться, и обратный скат профиля будет расширяться. После экспонирования фоторезиста через ПМ следует этап проявления изображения в щелочном растворе КОН 0,8% в течение 2 минут, в результате чего удаляется проэкспонированная область пленки фоторезиста. Таким образом, изображение полутонной маски переносится в 3D распределение глубины рельефа на поверхности фоторезиста.

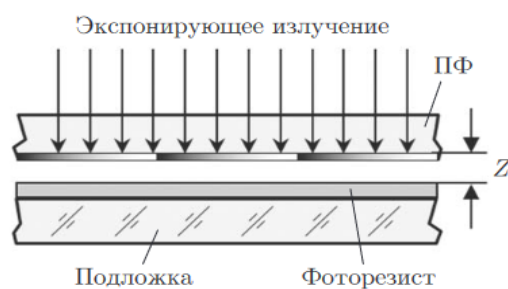


Рис.2. Схема экспонирования пленки фоторезиста

Анализ экспериментальных результатов

С помощью оптического микроскопа, работающего в режиме пропускания, фиксировалось изображение тестовой структуры ПМ (рис. 3) и производилась обработка полученных данных в среде MatLab. В результате был получен график зависимости интенсивности прошедшего света от уровней мощности лазерного пучка, падающей на образец при записи (рис. 4).

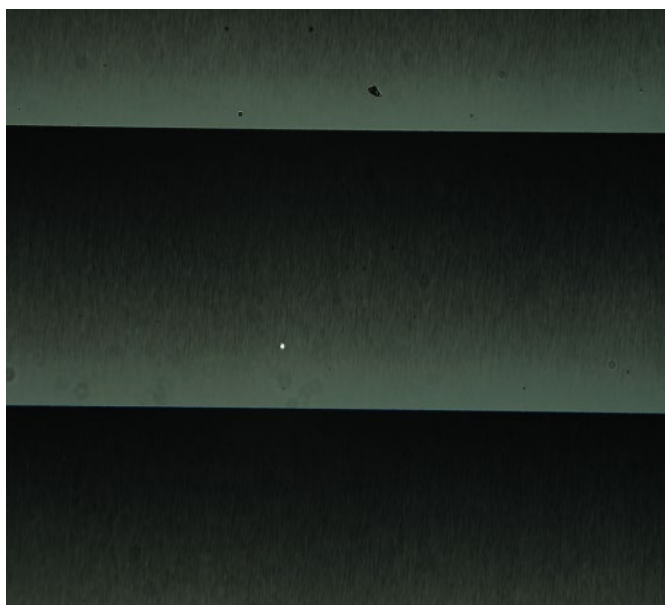


Рис.3. Фрагмент полутонового изображения тестовой периодической структуры с периодом 100 мкм

На рис. 5 представлен график зависимости глубины дифракционного микрорельефа, сформированного в пленке фоторезиста, от уровней мощности.

С помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ-3000 (Hitachi) был получен СЭМ-снимок микрорельефа на обратном скате пилообразных дифракционных зон (рис. 6) в фоторезисте, нанесенном на кремниевую подложку. Так как важной характеристикой при измерении на сканирующем электронном микроскопе является электрическая проводимость исследуемого образца, а фоторезист является диэлектриком, перед измерением на скане фоторезиста напылялся тонкий слой золота, толщиной 30 нм.

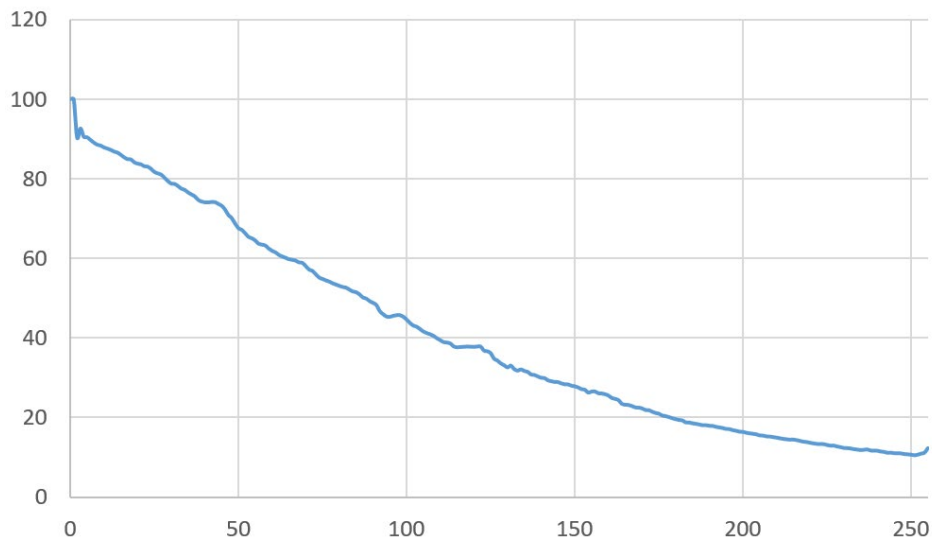


Рис.4. Зависимость интенсивности прошедшего через ПМ света от уровня мощности лазерного пучка, падающей на образец при записи

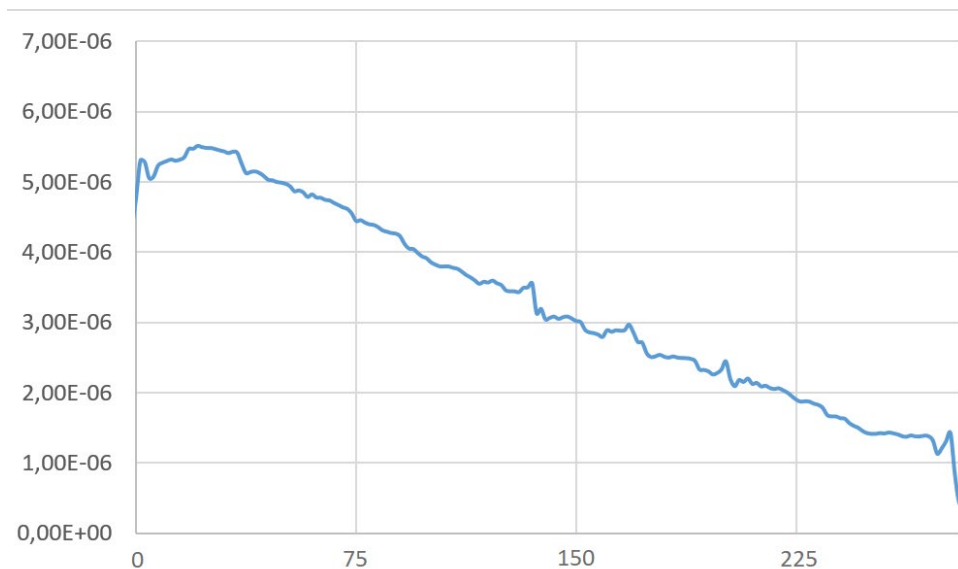


Рис.5. Зависимость глубины дифракционного микрорельефа, сформированного в пленке фоторезиста, от уровней мощности лазерного пучка при записи ПМ

На рис. 6 представлены карта глубины микрорельефа, полученная с помощью оптического профилометра WLI и СЭМ-снимок скола рельефа. СЭМ-снимок (черно-белый) позволяет нам получить больше информации об особенностях рельефа образца, благодаря этому были измерены такие характеристики, как величина обратного ската (2,3 мкм) и угол его наклона, равный примерно 60°. Эти параметры будут в дальнейшем использоваться для коррекции структуры ПМ на границе дифракционных зон на основе метода приграничной оптимизации с целью компенсации искажений рельефа, снижающих дифракционную эффективность [10].

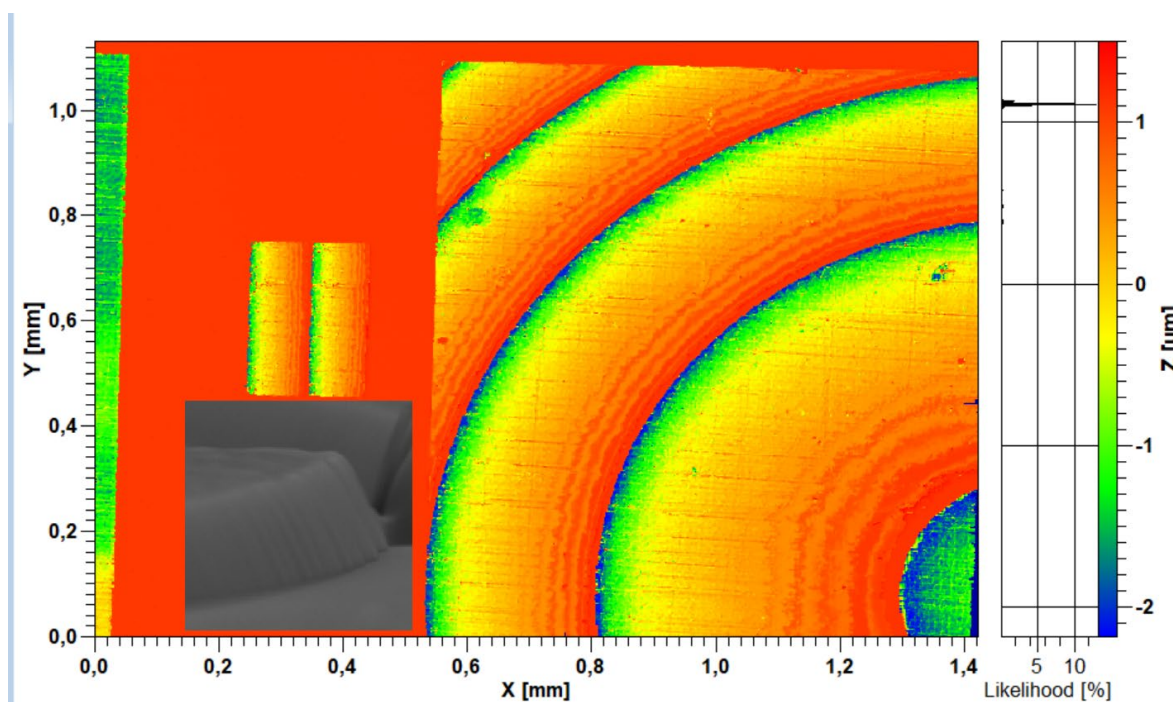


Рис.6. Микроизображения рельефа в фоторезисте: черно-белая вставка – СЭМ-снимок обратного ската дифракционного микрорельефа в фоторезисте, цветная bit-map – карта глубины рельефа сегмента дифракционной линзы

Заключение

Предложен и исследован метод термохимической записи пропускающих полутоновых масок на тонких пленках хрома с максимальным контрастом до 10 раз. Исследовано применение пропускающих полутоновых масок, сформированных термохимической лазерной записью на пленках хрома, для формирования многоуровневых ДОЭ в фоторезисте путем полутоновой контактной фотолитографии. Показана возможность получения многоуровневого рельефа в фоторезисте глубиной по крайней мере до 4 мкм.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (№ гос. регистрации 121041500060-2). В исследованиях использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поleshchuk A.G. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий//Автометрия. – 1991.– N 6.– С. 66–76.
2. Daschner W., Long P., Stein R., Wu C., Lee S.H.. 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// Applied Optics. – 1997.–V.36.– N 20.– P.4675 – 4680.
3. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Cherkashin V.V., Poleshchuk A.G., Kharissov A.A. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs // Proceedings SPIE.–1999. –V.3633.– P.129-138.

4. Gotchiyev V.Z., Korolkov V.P., Sokolov A.P., Chernukhin V.P. High resolution optical recording on a Si films// Journal of Non-Crystalline Solids. – 1991. – V. 137&138. – P.1297–1300.
5. Chuan Fei Guo, Sihai Cao, Peng Jiang, Ying Fang, Jianming Zhang, Yongtao Fan, Yongsheng Wang, Wendong Xu, Zhensheng Zhao, and Qian Liu, "Grayscale photomask fabricated by laser direct writing in metallic nano-films". Opt. Express 17, 19981–19987 (2009).
6. Glenn H. Chapman, Reza Qarehbaghi, Santiago Roche, "Calibrating bimetallic grayscale photomasks to photoresist response for precise micro-optics fabrication". Proc. SPIE 8973, Micromachining and Microfabrication Process Technology XIX, 897307 (7 March 2014).
7. Полещук А.Г., Корольков В.П., Седухин А.Г., Саметов А.Р., Шиманский Р.В. Прямая лазерная запись в пленках хрома полутонных микроизображений с большим динамическим диапазоном // Автометрия.– 2015. – 51, № 3. – С.87–92.
8. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Чуринов Е.Г., Юрлов Ю.И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома // Квантовая электроника.– 1985.– N 4. – С. 755.
9. Бланк В. А., Скиданов Р. В., Досколович Л. Л. Спектральные линзы как дисперсионные элементы для регистрации спектральных индексов// HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – С. 229–234.
10. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., and Shimansky R.S. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements// Applied Optics. – 2006. – 45. – P. 53–62.

© В. П. Корольков, А. Р. Саметов, Р. И. Куц, Д. Е. Зайцева, 2023