

Д. Е. Зайцева^{1,2}, В. П. Корольков^{1}, Р. И. Куц¹, А. Р. Саметов¹, Д. А. Белоусов¹*

Влияние особенностей травления пленок хрома при термохимической лазерной записи полутоновых фотошаблонов

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: victork@iae.nsk.su

Аннотация. В работе представлены результаты исследования динамики проявления пленок хрома, подвергнутых воздействию лазерного нагрева при термохимической записи полутоновых фотошаблонов. Метод термохимической записи включает в себя экспонирование пленки хрома на стеклянной подложке сфокусированным лазерным пучком с изменяющейся мощностью и последующее проявление в селективном травителе для удаления неэкспонированной пленки. Представлены зависимости пропускания и отражения от мощности пучка и времени травления, которые позволят подобрать оптимальные режимы обработки.

Ключевые слова: термохимическая лазерная запись, селективное травление, полутоновые фотошаблоны

D. E. Zaitseva^{1,2}, V. P. Korolkov^{1}, R. I. Kuts¹, A. R. Sametov¹, D. A. Belousov¹*

Investigation of Chromium Film Developing Dynamics at Thermochemical Laser Recording of Halftone Photographic Patterns

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

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: victork@iae.nsk.su

Abstract. This paper shows a method for the formation of transmission halftone photomasks by thermochemical laser recording. This method involves exposing a chromium film with a focused laser beam with varying power and developing it in a selective etcher. The dynamics of the appearance of chromium films during thermo-chemical laser recording of halftone photomasks is investigated. The dependences of transmission and reflection on the recording power at different etching times are presented.

Keywords: thermochemical laser writing, selective etching, halftone photographic patterns

Введение

При производстве многоуровневых дифракционных оптических элементов и микрооптики довольно часто используется полутоновая фотолитография [1]. Ключевым элементом этой технологии является применение полутоновых фотошаблонов (ПФ) с плавным изменением пропускания [2–6].

ПФ должны обладать высоким пространственным разрешением (>1000 1/мм), большим динамическим диапазоном изменения коэффициента пропуска-

ния ($>1:10$), иметь малую толщину полутонкого слоя (для уменьшения влияния дифракции при контактном копировании), высокую химическую и механическую устойчивость. Важно, чтобы эти свойства сочетались с достаточно простой и дешевой технологией изготовления.

Сложность в создании ПФ возникает из-за нестандартности технологии и высокой стоимости заготовки. В данной работе рассмотрен метод термохимической лазерной записи ПФ на тонких пленках хрома, основанный на плавной монотонной зависимости толщины термохимически выращенного оксидного слоя от мощности записывающего лазерного пучка [7]. При этом скорость травления в селективном травителе на основе $K_3[Fe(CN)_6]$ и NaOH определяется толщиной поверхностного оксида и объемного окисления за счет растворенного в пленке металла кислорода [8]. В результате травления в селективном травителе всех участков в течение одного времени образуются области с различной толщиной остаточной пленки хрома, что и обеспечивает разное пропускание.

Поэтому при изготовлении пропускающих ПФ методом термохимической лазерной записи решающее значение имеет процесс селективного травления. В данной работе была исследована динамика проявления пленок хрома при термохимической лазерной записи ПФ. Ранее процесс травления исследовался только для задач изготовления обычных бинарных фотошаблонов с двухуровневым пропусканием, где важно только время полного травливания пленки хрома [9–10]. Исследование динамики процессов травления пленок – нетривиальная экспериментальная задача. Публикации на эту тему встречаются достаточно редко [11,12] в силу того, что промежуточные состояния в процессе травления интересны, как правило, там, где необходимо создавать трехмерный рельеф на поверхности пленки или подложки.

Формирование ПФ методом термохимической лазерной записи

Процесс формирования пропускающих ПФ состоит из трех этапов: сначала на стеклянную подложку напыляется хром толщиной 30–50 нм, следующим шагом производится экспонирование сфокусированным лазерным пучком на записывающей системе (рис. 1), в результате чего формируется скрытое изображение из оксида хрома, которое на заключительном этапе проявляется с помощью селективного травления. В наших экспериментах мы использовали круговую лазерную записывающую систему CLWS300IAE [13] с лазером, имеющим длину волны 532 нм, и фокусирующим объективом с числовой апертурой 0,65. В этой установке реализовано непрерывное вращение заготовки при пошаговом или непрерывном радиальном перемещении сфокусированного микрообъективом лазерного пучка с помощью линейного аэростатического позиционера, контролируемого лазерным интерферометром. При записи ПФ на CLWS300IAE возникают сложности с управлением мощностью записывающего пучка, связанные с очень широким диапазоном изменения линейной скорости сканирования. Но этот недостаток превращается в какой-то степени в достоинство, обеспечивая высокую скорость записи из-за непрерывного сканирования по угловой координате (за счет вращения заготовки). При больших значениях радиальной координаты

наты линейная скорость записывающего пучка может достигать 10 метров в секунду. Благодаря этому можно изготавливать ДОЭ большой площади за сравнительно короткое время, снижая тем самым вероятность возникновения ошибок и затраты на изготовление. Сложные ПФ создаются путем модуляции лазерного пучка, синхронной с вращением подложки, в соответствии с данными, сгенерированными управляющим компьютером для заданных значений угловых и радиальных координат.

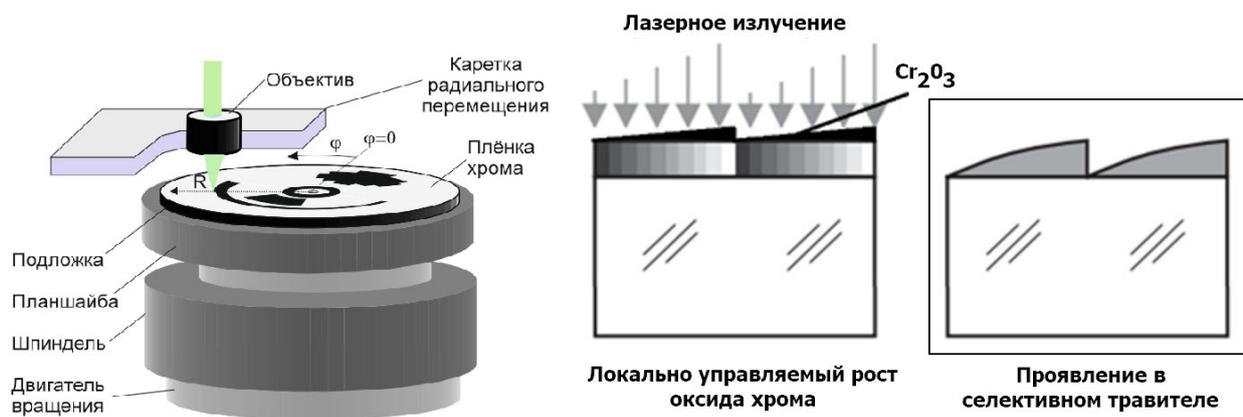


Рис. 1. Принцип записи и технологические этапы формирования пропускающего полутонного микроизображения

Селективное травление

Для эффективного использования термохимического действия лазерного излучения при изготовлении ПФ необходим достаточно селективный травитель. Селективность (K) определяется соотношением средних скоростей травления необлученного и облученного слоев металла одним и тем же травителем. Исследования ряда известных травителей хрома (HCl , $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$ и HNO_3 , $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и NaOH , $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и KOH и др.) показали [9], что наибольшими селективностью и качеством травления обладает раствор, составленный из $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и NaOH . Оптимальная селективность достигается при использовании раствора, состоящего из шести объемов 25%-го раствора $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и одного объема 25%-го раствора NaOH . Такой раствор содержит 0,244 г $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и 0,046 г NaOH на 1 мл травителя. Степень разбавления травителя влияет на время травления, коэффициент селективности при этом практически не меняется [14].

Результаты

Задачей данного исследования является определение оптимального времени травления для получения максимального значения пропускания при максимально широком динамическом диапазоне изменения мощности записывающего пучка. При проведении эксперимента на тонкой пленке хрома, предназначенной для изготовления бинарных фотошаблонов, были записаны полутонные тестовые структуры, для записи использовались стандартные заготовки для фотошаблонов от АО «НИИ МВ» из боросиликатного стекла, покрытого пленкой хрома

с помощью магнетронного распыления. Запись производилась в непрерывном режиме при скорости записи 1470 мм/с, диаметре пятна 700 нм, длине волны 532 нм и шаге сканирования 0,25 мкм (шаг между соседними кольцевыми траекториями пучка вдоль радиального направления). После чего производилось проявление структур в селективном травителе с разным временем травления: от 5 до 10 минут с разницей в 1 минуту. После травления с помощью оптического микроскопа в режиме пропускания были зафиксированы изображения тестовых полутоновых структур (рис. 2).

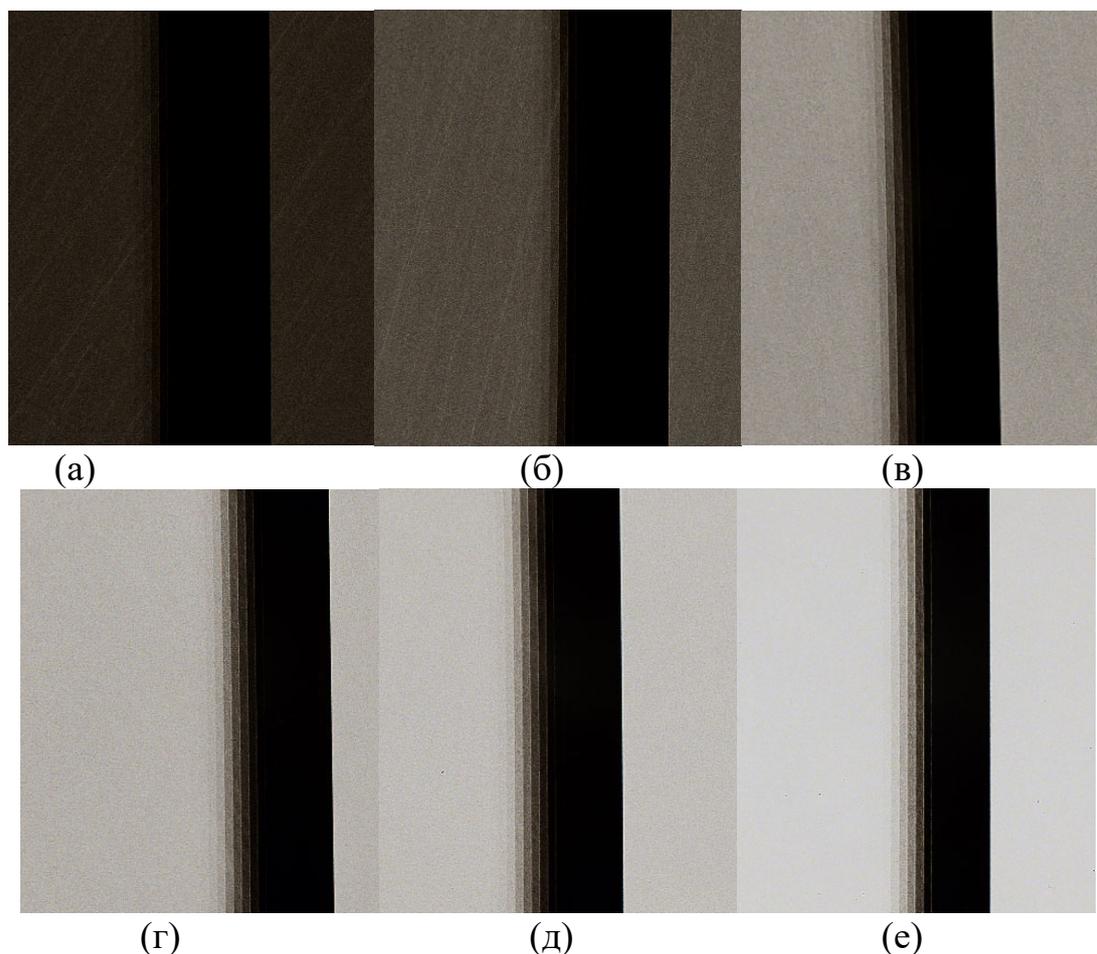


Рис. 2. Изображение тестовых полутоновых структур протравленных с разным временем: а – 5 мин, б – 6 мин, в – 7 мин, г – 8 мин, д – 9 мин, е – 10 мин

В результате компьютерной обработки полученных изображений были построены графики зависимости пропускания от мощности записи при разном времени травления (рис. 3).

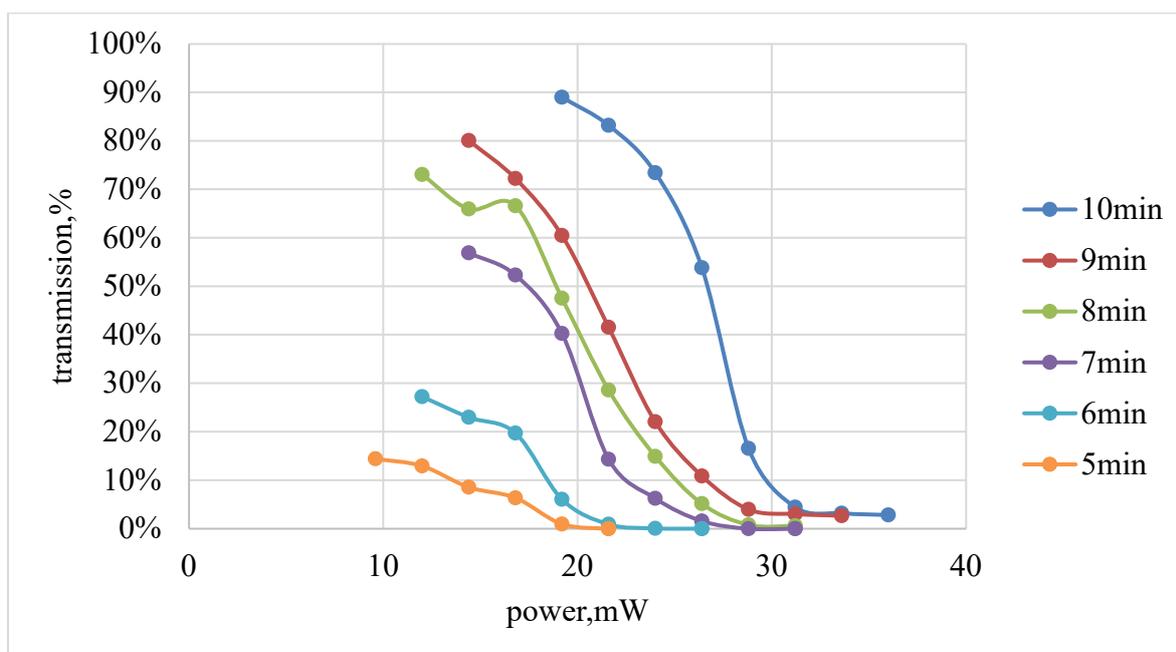


Рис. 3. Зависимость пропускания от мощности записывающего пучка при разном времени травления

Из графика видно, что при травлении в течение 10 минут достигается максимальное пропускание, которое составляет 89%. Однако, при 9 минутах травления мы получаем наибольшую линейность, но при этом пропускание уменьшается примерно на 10%. Существенным достоинством графика для времени травления 9 минут является самый широкий динамический диапазон изменения мощности записывающего пучка между минимумом и максимумом пропускания – 1 к 2. Для времени травления 10 минут динамический диапазон составляет 1 к 1,68. Локальный максимум на графике для времени травления 8 минут объясняется дефектом пленки хрома.

На рис.4 представлена зависимость относительного изменения отражения от мощности записывающего пучка при разном времени травления. Монотонная зависимость с наибольшим динамическим диапазоном относительного изменения отражения (порядка 1 к 7) достигается при 5-6-минутном травлении. Однако при этом мощность записывающего пучка изменяется всего лишь на 15%, что делает весьма затруднительным попадание в этот диапазон, если необходимо изготовить отражающую полутонную маску [15]. Причина образования промежуточной полки на графике относительного изменения отражения связана, по-видимому, со спецификой двухэтапного напыления пленок хрома на АО «НИИ МВ» с целью повышения адгезии первого слоя и уменьшения дефектности.

Заключение

Исследованы зависимости коэффициентов отражения и пропускания пленок хрома от мощности лазерного пучка и времени проявления при селективном травлении полутонных микроструктур, изготовленных методом термохимиче-

ской лазерной записи на тонких пленках хрома. Эти зависимости позволяют определить оптимальную стратегию лазерной записи и проявления полутоновых фотошаблонов. Также в результате работы было выявлено, что из-за двухстадийного напыления использование стандартных пластин магнетронного напыления подходит только для записи пропускающих ПФ.

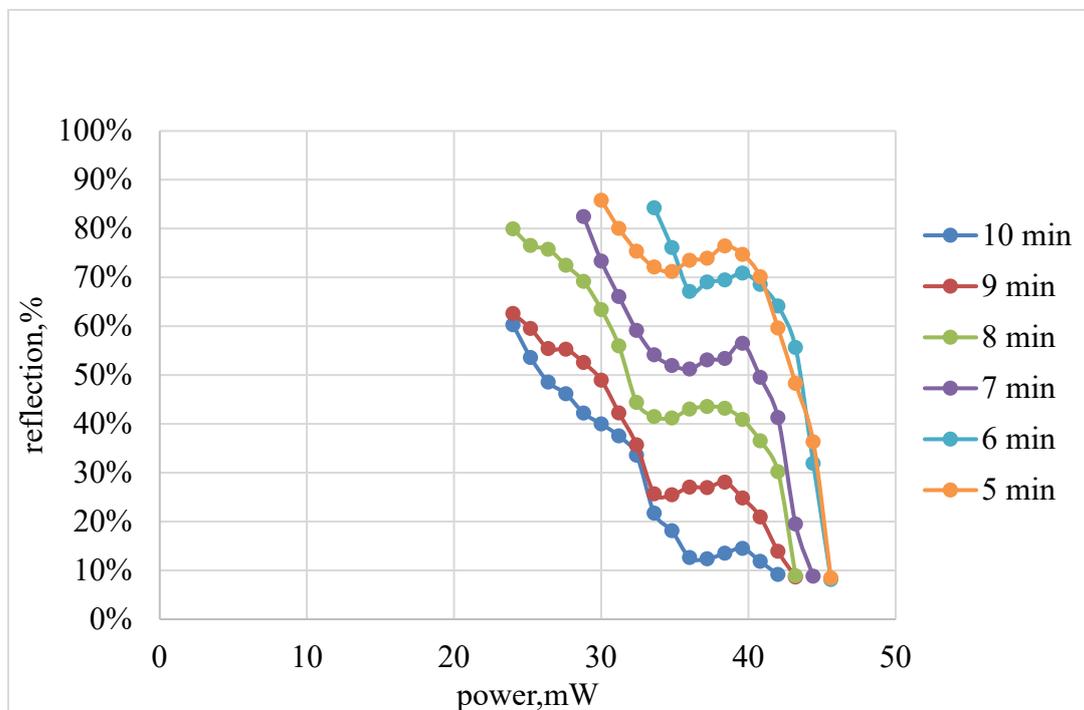


Рис. 4. Зависимость относительного изменения отражения от мощности записывающего пучка при разном времени травления

Благодарности

Исследование финансировалось за счет субсидий на финансовое обеспечение государственного задания (государственный регистрационный номер 124041700107-9). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полещук А.Г., Корольков В.П., Вейко В.П., Заколдаев Р.А., Сергеев Е.А. Лазерные технологии в микрооптике: ч. 2. Изготовление элементов с трехмерным микрорельефом // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 3–19.
2. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Полутоновые фотошаблоны на основе LDW-стекол // Автометрия. – 1998. – №6. – С.27–37.
3. Корольков В.П., Малышев А.И., Никитин В.Г., Полещук А.Г., Харисов А.А., Черкашин В.В., Ву Ч. Изготовление высокоэффективных ДОО с помощью полутоновых фотошаблонов на основе LDW-стекол// Компьютерная оптика. – 1998. – Вып. 18. – С. 43–51.
4. Korolkov V. P., Malyshev A.I., Poleshchuk A.G. et al. Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW-glass// Proc. SPIE. – 2001. – Vol.4440. – P.73–84.

5. Полещук А.Г., Саметов А.Р., Малышев А.И. Исследование прямой лазерной записи полутонный микроструктур в тонких пленках олова// Международная конференция "Голо-Экспо-2013".– Москва, 2013. – С.299-301.
6. 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. – Том 51. – № 3. – С. 87–93.
7. Veiko V.P. , Shakhno E.A. , Poleshchuk A.G. , Korolkov V.P. , Matyzhonok V.N. Local laser oxidation of thin metal films: ultra-resolution in theory and in practice // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2008. – V. 3, N 3. – P. 201–205.
8. Коронкевич В. П. , Полещук А. Г. , Чуринов Е. Г. , Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома // Квантовая электроника, 12:4 (1985), 755–761.
9. Кирьянов В. П., Никитин В. Г. К вопросу о механизме записи изображений в пленках хрома // Автометрия. 2004. – Т. 40, №2. – С. 59–68.
10. Cherkashin V.V. , Churin E.G. , Korolkov V.P. , Koronkevich V.P. , Kharissov A.A. , Poleshchuk A.G. , Burge J. H. Processing parameters optimisation for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Diffractive and Holographic Device Technologies and Applications IV, I. Cindrich and S.H. Lee, eds. – SPIE. – 1997. – Vol. 3010. – P. 168–179.
11. Puncktilhan C., Aksay A, Dissolution dynamics of thin films measured by optical reflectance// The Journal of Chemical Physics, 2009, 131(24):244710 (DOI: 10.1063/1.3276631).
12. Zudans I., Seliskar C.J., Heineman W.R. In situ measurements of sensor film dynamics by spectroscopic ellipsometry. Demonstration of back-side measurements and the etching of indium tin oxide// Thin Solid Films 426 (2003) – P. 238–245.
13. Poleshchuk A.G. , Churin E.G. , Koronkevich V.P. , Korolkov V.P. , Kharissov A.A. , Cherkashin V.V. , Kiryanov V.P. , Kiryanov A.V. , Kokarev S.A. , Verhoglyad A.G. . Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. – 1999. – Vol. 38. – P. 1295– P. 1301.
14. Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г., Синев Д. А., Шахно Е. А. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. 1. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием // Автометрия. – 2017 – Том 53. – №5 – С.71.
15. Корольков В.П., Куц Р.И., Саметов А.Р., Черкашин В.В., Голубцов С.К., Малышев А.И. Прямая лазерная запись отражающих полутонных микроизображений на тонких пленках хрома // Тезисы докладов XVIII Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям "HOLOEXPO 2021". Москва. – 2021. – С. 48–52.

© Д. Е. Зайцева, В. П. Корольков, Р. И. Куц, А. Р. Саметов, Д. А. Белоусов, 2024