

А. Г. Полещук*(Новосибирск)***ПОГРЕШНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР
ЛАЗЕРНЫМ ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЗАПИСИ**

Проведена оценка искажений геометрических размеров простейших дифракционных структур, записываемых термохимическим методом в пленке хрома (толщиной 80–100 нм) движущимся сфокусированным лазерным пучком. Экспериментально показано, что мощность записывающего лазерного пучка должна поддерживаться с точностью 2–3 % для формирования структур с погрешностями геометрических размеров менее $\pm 0,1$ мкм.

Введение. Развитие современной дифракционной оптики требует разработки технологий воспроизводимого формирования микроструктур (чаще всего с бинарным профилем) с размерами менее 0,5 мкм и световым полем в 200–300 мм и более. Абсолютная точность геометрического рисунка должна быть на уровне $1/4$ – $1/20$ от размера наименьшей дифракционной зоны. В ряде случаев дифракционная структура должна наноситься на выпуклые или вогнутые поверхности или подложки большой толщины [1, 2]. Эти специфические особенности ограничивают применение органических фоторезистов и технологии фотолитографии для изготовления прецизионных и крупногабаритных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Очевидно, что отказ от использования фоторезиста и прямое изготовление структуры ДОЭ в тонкой пленке хрома или другом материале существенно упрощает процесс изготовления и увеличивает его точность.

Термическое воздействие лазерного излучения было положено в основу ряда методов получения микроструктур на тонких пленках. Особенностью лазерной термохимической технологии является то, что под действием нагрева (ниже температуры плавления пленки), инициированного лазерным излучением, в тонкой пленке хрома протекают химические и физические процессы, локализованные в пределах нагреваемой зоны, т. е. образуется «скрытое» «термохимическое» изображение [3]. Область скрытого изображения отличается по физическому и химическому составу от исходной пленки, поэтому проявление ее в селективном травителе позволяет выявить записанную структуру [4, 5].

Для изготовления высококачественных дифракционных элементов с амплитудным пропусканием был предложен метод [4–6], включающий в

себя экспонирование в полярной системе координат вращающейся с постоянной скоростью подложки, покрытой тонкой пленкой хрома, и ее последующую химическую обработку (проявление) в специальном селективном травителе. Экспонирование производилось сфокусированным излучением мощного непрерывного лазера (видимого или УФ-диапазона) путем кругового или спирального сканирования подложки [7] с помощью круговой лазерной записывающей системы (КЛЗС) [8]. Многолетнее практическое использование данного метода для изготовления ДОЭ выявило несколько факторов, существенно влияющих на точность изготовления дифракционной структуры. Основные из них: зависимость геометрических размеров формируемой структуры от интенсивности излучения в записывающем пучке, его формы и размеров, толщины и состояния поверхности пленки хрома, длительности записывающего импульса излучения, способа напыления хрома и его адгезии к подложке, времени проявления в селективном травителе и т. д. Решение этих проблем или минимизация их влияния необходимы, в частности, для создания эталонных дифракционных элементов, применяемых в контрольно-измерительной технике, например, для измерения формы поверхности высокоапертурной асферической оптики.

Целью предлагаемой работы является исследование механизма возникновения погрешностей размеров записываемых микроструктур в пленке хрома, обусловленных изменением интенсивности записывающего лазерного излучения.

1. Искажения записываемой микроструктуры. Простейшими элементами, из которых формируются все микроструктуры, при записи в полярной системе координат являются треки в виде набора дуг. Так как при биарной записи важны лишь начало и конец дуг, то они могут быть представлены в виде ячеек с полярными координатами $P_i(r_i, \varphi_i)$, где r_i – расстояние от оси вращения шпинделя до центра записывающего пучка; φ_i – угловая координата центра записывающего пучка (расстояние между началом угловой координаты ($\varphi = 0$) и текущим угловым положением) [7]. Процесс записи вносит погрешности в записанную микроструктуру. Эти погрешности имеют две основные компоненты:

- разность между рассчитанными $P_i(r_i, \varphi_i)$ и записанными $P'_i(r'_i, \varphi'_i)$ координатами ячеек, из которых состоят треки. Погрешности координаты начала и конца трека определяются как $\delta_{1,2} = (\varphi'_{1,2} - \varphi_{1,2})r$, где $\varphi_{1,2}$ и $\varphi'_{1,2}$ – заданные и реально записанные угловые координаты начала (индекс 1) и конца (индекс 2) трека соответственно;

- различие ширин рассчитанного D и реально записанного D' треков: $\Delta D = D - D'$.

Одним из источников погрешностей является неидеальная работа узлов КЛЗС [7]. Другие источники погрешностей связаны с некорректным выбором мощности записывающего излучения и стратегии записи [6]. Рассмотрим влияние выбора мощности записывающего излучения на угловые и радиальные размеры (ширину и длину) формируемого трека при термохимическом методе записи.

1.1. Ширина трека. Распределение интенсивности излучения записывающего пучка в области $x, y < \sigma$ (далее для простоты будем полагать $x = \varphi r$, $y = r$) достаточно хорошо описывается функцией Гаусса

$$I(x, y) = I_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2],$$

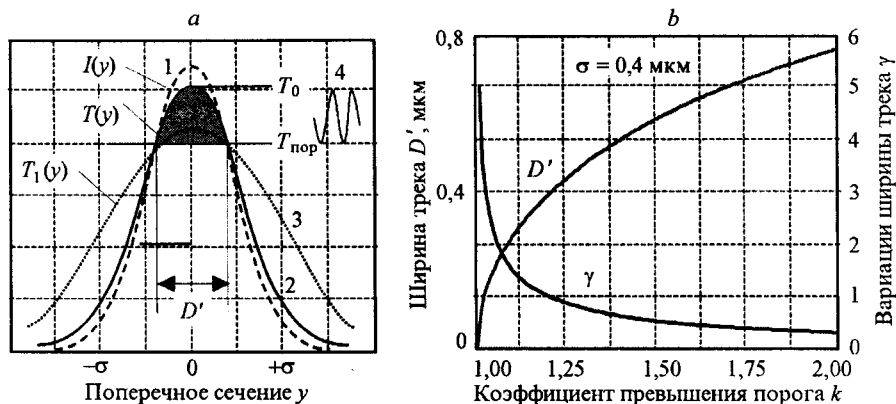


Рис. 1. Определение ширины линий: температурного изображения (а), записываемого трека (b)

где I_0 – интенсивность излучения в центре пучка, а σ – радиус распределения интенсивности на уровне e^{-1} (рис. 1, а, кривая 1). Температурное поле в пленке в значительной степени определяется режимом нагрева. При достаточно большой скорости движения записывающего пучка ($v_n \gg a_1/\sigma$, где a_1 – коэффициент теплопроводности пленки) температурное поле пленки («след») также соответствует гауссовому распределению [9, 10]:

$$T(x) = T_0 \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma_T^2], \quad (1)$$

где T_0 – температура пленки в центре пучка; σ_T – радиус распределения температуры (см. рис. 1, а, кривая 2).

Механизм термохимической записи обладает достаточно четко выраженным пороговым эффектом, ниже которого физические и химические изменения пленки хрома практически отсутствуют [3–5]. Основной вклад в формирование этого порога вносит тонкая пленка (толщиной 1–5 нм) из окислов хрома [3], которая образуется на поверхности пленки хрома под действием нагрева, инициированного лазерным излучением, а также физико-химических изменений в самой пленке [5].

Ширина записанного трека D' (вдоль координаты y) определяется шириной области, прогретой до пороговой температуры $T_{пор}$. Обозначая коэффициент превышения порога как $k = T_0/T_{пор}$, из выражения (1) можно оценить ширину записываемого трека:

$$D' = 2\sigma_T \sqrt{\ln(k)}. \quad (2)$$

На рис. 1, b показана зависимость ширины трека D' от величины коэффициента k превышения порога при записи лазерным пучком с радиусом $\sigma = 0,4$ мкм. Видно, что ширина трека меняется в несколько раз при незначительном изменении коэффициента k . Вариации ширины трека связаны с вариациями интенсивности записывающего излучения (или коэффициента k) выражением

$$\gamma = (\partial D'/D')/\partial k = 1/k \sqrt{\ln(k)}. \quad (3)$$

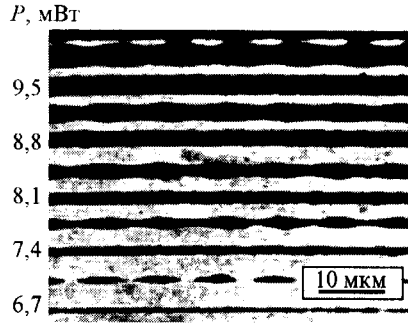


Рис. 2. Микрофотография тестовых дорожек с 10%-ной синусоидальной модуляцией мощности записывающего пучка

Эта зависимость показана на рис. 1, *b*. Видно, что пороговый механизм термохимической записи позволяет формировать достаточно узкие линии, однако при значениях $k < 1,1$ ширина сильно зависит от вариаций интенсивности записывающего излучения. Следует отметить, что изменение ширины записываемого трека происходит симметрично относительно центра записывающего пучка.

Радус σ_T температурного распределения растет с увеличением времени нагрева и, следовательно, с уменьшением скорости сканирования (см. рис. 1, *a*, кривая 3). В качестве примера на рис. 2 приведена фотография серии треков [11], записанных с периодом 4 мкм (в радиальном направлении) в пленке хрома толщиной 120 нм. Скорость движения 2,5 см/с, что при размере записывающего пучка $\sigma = 0,4$ мкм дает характерную длительность экспонирования около 30 мкс. При каждом значении мощности P излучения записывались два трека: один с синусоидальной модуляцией ($\pm 10\%$) среднего уровня мощности (см. рис. 1, *a*, кривая 4), а другой без нее. Видно, что при ширине трека менее 1 мкм (нижняя пара треков записана при $P = 6,7$ мВт) уменьшение мощности излучения на 10% ведет к исчезновению треков, позволяя определить величину коэффициента $k = 1,1$ и оценить радиус σ_T температурного распределения в данном эксперименте. Это означает, что запись осуществлялась вершиной температурного распределения, инициированного лазерным пучком, причем механизм записи имел явно выраженный пороговый характер. Из выражения (2) для $k = 1,1$ и $D' = 1$ мкм получено $\sigma_T = 1,6$ мкм, что в 4 раза больше радиуса σ записывающего пучка. Из выражения (2) также следует, что при допустимой вариации ширины трека 10% ($\delta D'/D' = 0,1$) и $k = 1,1$ вариации мощности записывающего излучения (лазерные шумы) не должны превышать 1%.

1.2. *Длина трека.* Трек записывается движущимся относительно пленки хрома со скоростью v_n сфокусированным лазерным пучком. Оценку изменения длины трека (угловое направление) можно дать, рассмотрев по отдельности моменты включения и выключения излучения, показанные на рис. 3 (точки x_1 и x_2 соответственно). В момент включения x_1 температура пленки в записывающем пучке линейно растет в зависимости от интенсивности излучения I_0 и времени экспозиции τ [12]: $T(\tau) = I_0 A_1 \tau / \rho_1 C_1 h_1 + T_n$, где A_1 – коэффициент поглощения пленки хрома; ρ_1 – плотность; C_1 – теплоемкость; h_1 – толщина; T_n – начальная температура пленки. В этом приближении, справедливом при $v_n > a_1/\sigma$, зависимость температурного распределения вдоль центра записанного трека в момент включения можно оценить сверткой функции нормированного температурного распределения $T(x/\sigma_T)$, инициированного записывающим пучком, и функции включения (длительностью фронтов пренебрегаем) излучения $P(x/\sigma_T)$ лазера:

$$T_d(x/\sigma_T) \approx AT(x/\sigma_T) \otimes P(x/\sigma_T), \quad (4)$$

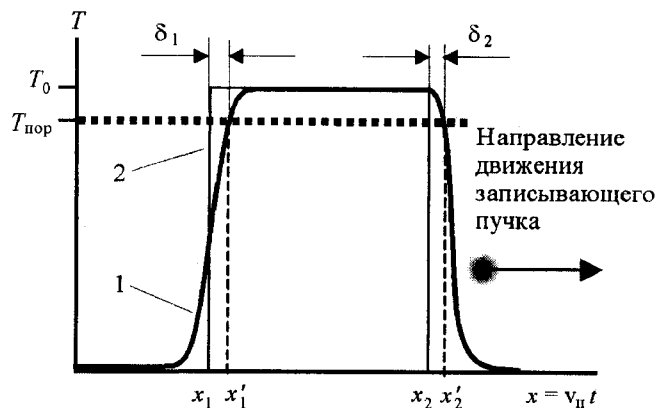


Рис. 3. Максимально достигнутое значение температуры пленки вдоль направления движения записывающего пучка (кривая 1) и форма импульсного включения и выключения излучения (кривая 2)

где A – коэффициент пропорциональности.

Распределение максимально достигнутого значения температуры пленки вдоль направления движения записывающего пучка показано на рис. 3 (кривая 1). После окончания действия импульса излучения, в момент x_2 , пленка начинает остывать. Время остывания пленки хрома толщиной $h = 80-100$ нм до температуры прекращения термохимических изменений ($T \sim 0,4-0,5T_0$) составляет менее 0,05 мкс [9], что примерно соответствует длительности фронта светового импульса записи КЛЗС. Если $T_{пор}$ – пороговая температура термохимических изменений в пленке, то координатами точек начала и конца записанного трека будут x_1' и x_2' вместо заданных x_1 и x_2 . Таким образом, термохимическому методу записи присущи погрешности координат начала и конца записываемой дуги. Величина этих искажений определяется в основном свойствами хрома, размерами и скоростью движения пучка и коэффициентом превышения порога k . Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что в зависимости от величины коэффициента k положение координаты начала записываемого трека может быть как до, так и после координаты включения излучения, а координата конца трека всегда находится после координаты, соответствующей выключению излучения. Имеет место угловой сдвиг трека, что необходимо учитывать при изготовлении ДОЭ и оптических шкал с помощью КЛЗС. Различный характер формирования температурного распределения при включении и выключении излучения приводит также и к различию формы начала и конца записываемого трека: начало трека, как правило, является более узким (см., например, [11], рис. 8).

2. Эксперимент. Результаты экспериментального исследования особенностей записи термохимическим методом простейшего элемента (короткой дуги) приведены на рис. 4. Исследование осуществлялось с помощью КЛЗС, разработанной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [6, 8]. Для экспериментов использовались пленки хрома магнетронного напыления толщиной 80 нм, нанесенные на стеклянные пластины размером 102×102 мм. Скорость движения записывающего пучка относительно пленки хрома изменялась от 1 до 200 см/с в зависимости от радиуса записи. Мощность излучения в записывающем пучке последовательно уменьшалась с шагом 2 мВт, начиная с критического значения P_k начала плавления пленки. Записывались

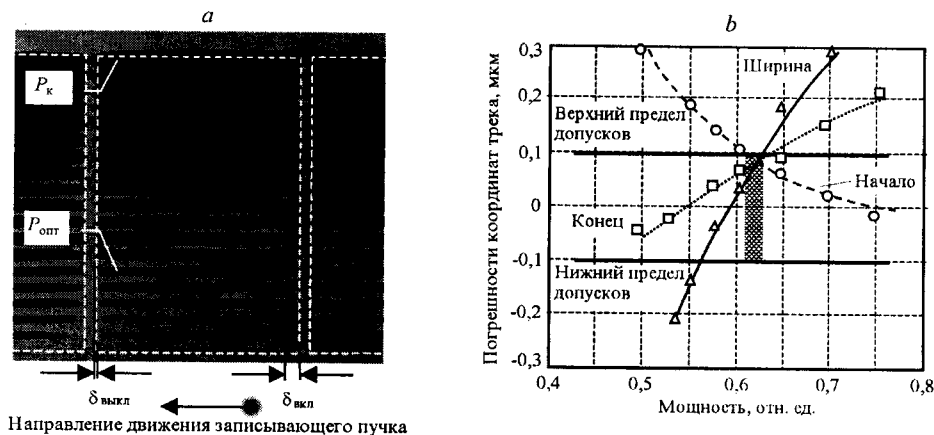


Рис. 4. Результаты исследования размеров записанных треков: микрофотография фрагмента теста (а) и отклонения размеров (0,75 × 20 мкм) записанных треков в зависимости от интенсивности излучения в записывающем пучке (б)

группы треков с периодом в радиальном направлении 1,5 мкм, длиной в угловом направлении 20 мкм, зазор между группами 1 мкм. Треки записывались тремя проходами записывающего пучка без смещения в радиальном направлении [7]. Далее пластины с пленками хрома проявлялись в селективном травителе [5] до полного исчезновения неэкспонированных участков хрома. Микрофотография одного фрагмента экспериментальной записи (радиус 20 мм, $v_p = 150$ см/с, $P_k = 100$ мВт) приведена на рис. 4, а. На фотографии расчетные границы дуг показаны штриховой линией. Видно, что только размеры одной дуги, соответствующей мощности записывающего пучка $P_{opt} \approx 0,6P_k$, согласуются с расчетными значениями длины трека (20 мкм). Наряду с изменением ширины трека имеет место смещение ее начала и конца ($\delta_{выкл}$ и $\delta_{вкл}$), причем величина этого смещения больше в момент включения (т. е. $\delta_{выкл} < \delta_{вкл}$), что соответствует выводам в разд. 1.2.

На рис. 4, б представлены результаты измерения отклонения ширины и длины записываемого трека от номинальной величины для различной мощности записывающего излучения. Видно, что мощность записывающего лазерного пучка должна поддерживаться с точностью 2–3 % для формирования структур с погрешностями геометрических размеров менее $\pm 0,1$ мкм (эта величина соответствует точности позиционирования записывающего пучка в КЛЗС [8]).

Заключение. На основе пороговой модели механизма термохимической записи проведена оценка искажений простейших дифракционных структур, записываемых в пленке хрома сканирующим лазерным пучком. Отмечено сильное влияние незначительных вариаций мощности излучения на размеры формируемых структур вблизи порога, а также различие процессов в пленке хрома при включении и выключении движущегося лазерного пучка, что может приводить к угловому сдвигу записываемого трека. Экспериментально показано, что мощность записывающего лазерного пучка должна поддерживаться с точностью 2–3 % для формирования структур с погрешностями геометрических размеров менее $\pm 0,1$ мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полещук А. Г., Коронкевич В. П.** Лазерные методы трехмерного микроструктурирования оптических поверхностей // 3D лазерные информационные технологии /Под ред. П. Е. Твердохлеба. Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 2003. С. 243.
2. **Burge J. H.** Application of computer-generated hologram for interferometric measurement of large aspheric optics // Proc. SPIE. 1995. **2576**. P. 258.
3. **Veiko V. P., Kotov G. A., Libenson M. N., Nikitin M. N.** Thermochemical action of laser radiation // Sov. Phys. Doklady. 1973. **18**, N 1. P. 83.
4. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома // Квантовая электрон. 1985. **12**, № 4. С. 755.
5. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // Письма в ЖТФ. 1985. **11**, № 3. С. 144.
6. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korolkov V. P. et al.** Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Proc. SPIE. 1997. **3010**. P. 168.
7. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 3.
8. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295.
9. **Paek U. S., Kestenbaum A.** Thermal analysis of thin-film micromachining with lasers // Journ. Appl. Phys. 1973. **44**. P. 2260.
10. **Вейко В. П., Тучина Е. А., Яковлев Е. Б.** О разрешающей способности лазерной литографии на тонких металлических пленках // Квантовая электрон. 1984. **11**, № 4. С. 661.
11. **Корольков В. П., Полещук А. Г.** Управление оптическим излучением в прецизионных лазерных фотопостроителях // Автометрия. 1985. № 6. С. 51.
12. **Либенсон М. Н.** Нагрев и разрушение тонких пленок излучением ОКГ // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 4. С. 3.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: poleshchuk.a.g@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
22 июля 2003 г.*