

**ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ЗАПИСИ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ  
В ПЛЕНКАХ ХРОМА:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ****В. Г. Никитин***Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
г. Новосибирск**E-mail: vladn@tdisie.nsc.ru*

Изучены особенности формирования температурного следа при круговой лазерной записи в пленках хрома на стеклянных подложках. Проведен расчет температурного поля для широкого диапазона радиусов записи (20–150 мм). Рассмотрена динамика прогрева пленки хрома на кварцевой подложке при включении пучка в процессе движения для случаев с зависящими и независящими от температуры тепловыми коэффициентами пленки и подложки. На основе результатов расчетов показано различие формы (асимметрия) температурного следа при включении и выключении записывающего пучка и предложена методика коррекции процедуры подбора мощности записывающего пучка для нанесения небольших (порядка нескольких микрон) штрихов. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Обсуждается различие изображений синтезированных микроструктур в проходящем и отраженном свете.

**Введение.** Одной из современных технологий для изготовления прецизионных фотошаблонов, шкал, лимбов, элементов дифракционной оптики и т. д. является лазерная круговая термохимическая запись в пленках хрома на стеклянных подложках [1]. Данная технология характеризуется тем, что имеет сравнительно немного стадий: напыление пленки хрома на стеклянную подложку, экспонирование пленки сфокусированным лазерным пучком и жидкостное травление. Круговое сканирование обеспечивает значительно более высокую производительность (по сравнению со сканированием в декартовой системе координат), так как скорость движения записывающего пучка может достигать десятков метров в секунду.

Современные требования к точностным параметрам изделий микромеханики, дифракционной оптики, шкал, фотошаблонов и т. д. становятся все более жесткими. В связи с этим необходимо прецизионное нанесение изображений, в том числе методами лазерной круговой термохимической записи. При использовании этой технологии так или иначе неизбежны искажения в топологии рисунка [2], связанные с динамикой прогрева системы пленка – подложка и кинетикой термохимических преобразований (поверхностного

окисления и кристаллизации [3, 4]). Искажения являются причиной ухудшения точностных параметров изделий. Особенно существенной для понимания механизмов и природы погрешностей является форма следа, получаемого после лазерной записи и жидкостного травления в пленке хрома на стеклянной (кварцевой) подложке. Форма следа важна как в плоскости пленки, так и в плоскости, перпендикулярной ей. Трехмерная форма структуры является особенно актуальной для элементов, работающих на отражение, поскольку от участков, непараллельных поверхности пленки, свет будет отражаться в непроецируемую сторону и рассеиваться. Это приведет к дополнительным искажениям картины, получаемой от элемента, что может являться причиной ухудшения характеристик приборов, где используются элементы, изготовленные с использованием круговой лазерной записи.

Поскольку процесс записи скрытого изображения имеет тепловую природу, большой интерес представляет динамика термохимических переходных процессов в пленке хрома, в том числе рост температуры в зависимости от скорости сканирования при включении пучка. Наиболее значимой является характеристика процесса прогрева системы пленка – подложка в зависимости от пространственной координаты при движении записывающего пучка. Это обусловлено тем, что развитие термохимических процессов в пленках хрома (поверхностного окисления и кристаллизации) напрямую зависит от температуры. Немаловажное значение также имеет форма теплового фронта в точке выключения пучка, так как пространственная координата конца штриха, соответствующая точке выключения, может не совпадать с проектируемой. Анализ динамики прогрева пленки позволит выработать рекомендации по минимизации погрешностей, вызванных инертностью данного процесса.

В работе [2] рассмотрены технологические погрешности термохимической лазерной записи. Сделано это на основе качественных оценок при очень высокой скорости движения пленки относительно записывающего пучка (более 10 м/с), при которых во внимание не принимаются теплофизические характеристики подложки. Термодинамический расчетный анализ системы пленка – подложка при различных условиях лазерной записи содержится в работе [5]. Однако в ней не рассмотрены пространственные характеристики теплового следа при разных скоростях сканирования и не учитывается зависимость теплофизических параметров пленки и подложки от температуры.

Целью данной работы является расчет и анализ динамики прогрева пленки в широком диапазоне скоростей сканирования, сопоставление расчетной конфигурации температурного поля с экспериментальными результатами и выработка рекомендаций по подбору оптимальной мощности для записи при нанесении структур небольшого размера (до 10 мкм) в направлении движения пучка.

**Расчет и анализ температурного поля для пленки хрома на стеклянной подложке в процессе воздействия движущегося лазерного пучка.**  
*Постановка задачи.* Для исследования динамики механизма прогрева системы пленка – подложка необходимо рассчитать распределение температуры при включении и выключении записывающего пучка. Распределение интенсивности сфокусированного лазерного пучка имеет гауссову форму с характерным радиусом  $r_0 = 0,5$  мкм. Лазерный пучок движется относительно системы пленка – подложка со скоростью  $v$  в направлении  $X$ . Для расчета рас-

предела температуры численно была решена система уравнений теплопроводности

$$\begin{cases} C_1 \rho \frac{\partial T_1}{\partial t} = \text{div}(K_1 \text{grad}(T_1)), \\ C_2 \rho \frac{\partial T_2}{\partial t} = \text{div}(K_2 \text{grad}(T_2)), \end{cases} \quad (1)$$

где  $T_{1,2}$  – температура,  $K_{1,2}$  – теплопроводность вещества,  $\rho_{1,2}$  – плотность,  $C_{1,2}$  – теплоемкость. Индекс 1 относится к пленке, индекс 2 – к подложке. Начальное условие определяется равенством температуры для всех  $x, y, z$  по всему пространству в начальный момент времени ( $t = 0$ ):

$$T_1(x, y, z, 0) = T_2(x, y, z, 0) = T_0 = 298 \text{ К}. \quad (2)$$

Граничные условия для системы (1) будут определяться следующим образом.

Уравнения в системе (1) связаны граничным условием

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \quad (3a)$$

на границе пленка–подложка (при  $z = h$ , где  $h$  – толщина пленки), что означает равенство тепловых потоков в этой плоскости. Температуры пленки и подложки на данной границе также будут одинаковыми:

$$T_1 = T_2. \quad (3б)$$

Граничным условием на границе воздух–пленка ( $z = 0$ ) является

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = I_0 \exp \left( -\frac{2((x - vt)^2 + y^2)}{r_0^2} \right), \quad (3в)$$

где  $v$  – скорость сканирования лазерного пучка,  $I_0$  – плотность мощности поглощенного излучения в центре пучка,  $r_0$  – радиус пятна. Условие (3в) означает поток тепла на поверхности пленки, вызванный лазерным облучением.

Также при  $x, y, z = \infty$  температура должна оставаться равной начальной все время воздействия:

$$T = T_0. \quad (3г)$$

Система (1) решалась численно методом конечных элементов [6, 7]. Поглощение пленки хрома было вычислено, исходя из измеренного коэффициента отражения, равного 42 %. Таким образом, в пленке поглощалось 58 % световой энергии.

Область расчета выбиралась следующим образом: в плоскости  $XU$  расстояние от оси пучка составляло  $\pm 10$  мкм в направлении  $U$ . От точек включения и выключения границы области расчета отстояли на 10 мкм вдоль оси сканирования. Расчет проведен как для линейной (теплофизические пара-

метры  $K_{1,2}$ ,  $\rho_{1,2}$ ,  $C_{1,2}$  не зависят от температуры), так и для нелинейной модели (данные параметры зависят от температуры). Температурные характеристики теплофизических параметров хрома и кварца были взяты из [4, 8].

*Обсуждение результатов.* Для исследования динамики роста температуры на поверхности пленки было промоделировано нанесение штриха длиной 5 мкм при разных радиусах записи (другими словами, при разных скоростях сканирования  $v$ ). Рассмотрим более подробно запись с радиусом  $R = 50$  мкм (скорость сканирования  $v = 3,1416$  м/с, мощность записывающего пучка  $P = 50$  мВт). На рис. 1, а для сравнения линейной и нелинейной моделей представлено распределение максимально достигнутых температур в поперечном движении пучка направлении в момент выключения пучка (кривая 1 – линейная модель, кривая 2 – нелинейная). На рисунке видно, что различие между ними вблизи центра пучка составляет около 200 К или около 20 %. Но это различие уменьшается к краям пучка и становится почти незаметным на расстоянии 0,7 мкм от его центра. Вертикальными линиями приблизительно показана ширина экспериментального следа (около 1 мкм.) Видно, что вблизи этих линий различие температуры для линейной и нелинейной моделей составляет не более 3 %. Таким образом, учет зависимости теплофизических параметров хрома и кварца при расчете распределения температуры в данном случае слабо влияет на ширину температурного следа.

На рис. 1, а видно, что разница температур в центре пучка и по краям экспериментально получаемого следа составляет примерно 500 К (на расстоянии 0,5 мкм от центра пучка температура составляет примерно 60 % от максимальной температуры в центре пучка). Это соотношение хорошо согласуется с экспериментально установленным методом подбора оптимальной мощности записывающего пучка [1, 5]. Согласно этому методу записываются кольцевые структуры с разной мощностью и небольшим шагом по радиусу. Мощность лазерного пучка для записи выбирается примерно 0,6–0,8 от той, при которой начинается разрушение пленки. В центре пучка температура приближается к критической, в то время как по краям она составляет примерно 60–80 % от этой величины, что соответствует оценкам ширины температурного следа, приведенным в [2]. Результаты для линейной модели также соответствуют данным, полученным в работе [5] для других условий термохимической лазерной записи. Температура на краях экспериментального

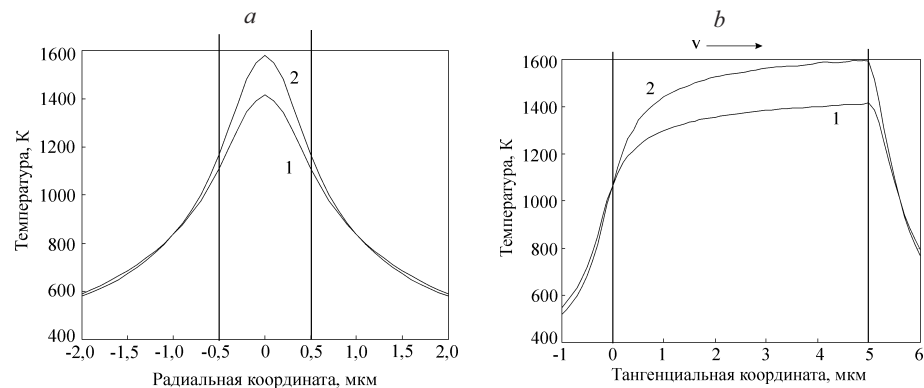


Рис. 1

следа составляет 1150–1200 К. Далее рассмотрим запаздывание температурного следа в процессе включения записывающего пучка для этого случая.

Распределение максимально достигнутой температуры вдоль центра пучка по направлению сканирования приведено на рис. 1, *b* (кривая 1 – линейная модель, кривая 2 – нелинейная). (Стрелка на рисунках указывает направление движения пучка относительно пленки.) Вертикальными линиями обозначены координаты включения и выключения пучка. Хорошо видно запаздывание температурного следа при включении пучка, и при учете зависимости теплофизических параметров от температуры происходит более быстрый разогрев. Связано это с тем, что теплоемкость хрома с повышением температуры существенно снижается. Рассмотрим координату, на которой достигается уровень температуры 1150–1200 К и которая соответствует ширине температурного следа 1 мкм. Точка, где данная температура достигается, отстоит относительно точки включения на несколько десятых микрометра для обоих случаев, в то время как для выключения этот уровень отстоит от точки включения примерно на 0,5 мкм по направлению движения для обеих кривых. Таким образом, одной из причин угловой технологической погрешности (вдоль тангенциальной координаты) являются различия в смещениях начала и конца температурного следа.

Прогрев пленки на стеклянной подложке занимает достаточно длительное время, как показано на графиках рис. 1, *b*. За это время записывающий пучок успевает сместиться на расстояние, равное нескольким диаметрам лазерного пятна, как минимум. Поэтому для получения качественного следа термохимического взаимодействия требуется разная мощность при записи коротких штрихов (порядка нескольких микрон) и круговых структур (колец). Отсюда следует, что процедуру выбора мощности записывающего пучка необходимо проводить отдельно для структур, имеющих небольшой угловой размер (порядка нескольких угловых секунд), и для более длинных или круговых структур. Если этого не сделать, то могут возникнуть большие искажения топологии рисунка, связанные с неверным выбором мощности для записи такого типа структур. Также вследствие длительного прогрева системы пленка – подложка может изменяться толщина пленки, оставшейся в этой области после жидкостного травления, от точки включения записывающего пучка. Толщина будет постепенно возрастать до максимальной величины оставшейся экспонированной пленки. Размер меняющейся толщины можно оценить в несколько микрон (см. рис. 1, *b*).

Изолинии максимально достигнутой температуры для линейной (*a*) и нелинейной (*b*) моделей показаны на рис. 2. Выделен контур, соответствующий ширине экспериментально полученного штриха с поперечным размером примерно 1 мкм. Видно, что отличие между этими линиями на рис. 2, *a* и *b* незначительное: выделенный штрих начинается на расстоянии в доли микрометра от точки включения в направлении движения. Притом, как видно на рис. 1, *b* и рис. 2, *a*, *b*, для нелинейной модели начало температурного следа отстоит от точки включения пучка на большее расстояние, чем для линейной. В то время как другой конец штриха (где происходит выключение) выступает за пределы координаты выключения на 0,5 мкм. Изображение штриха, полученное на сканирующем зондовом микроскопе (белый цвет обозначает область, имеющую высоту над поверхностью подложки более 80 нм), приведено на рис. 2, *c*. Видно, что передний и задний фронты штриха несколько от-

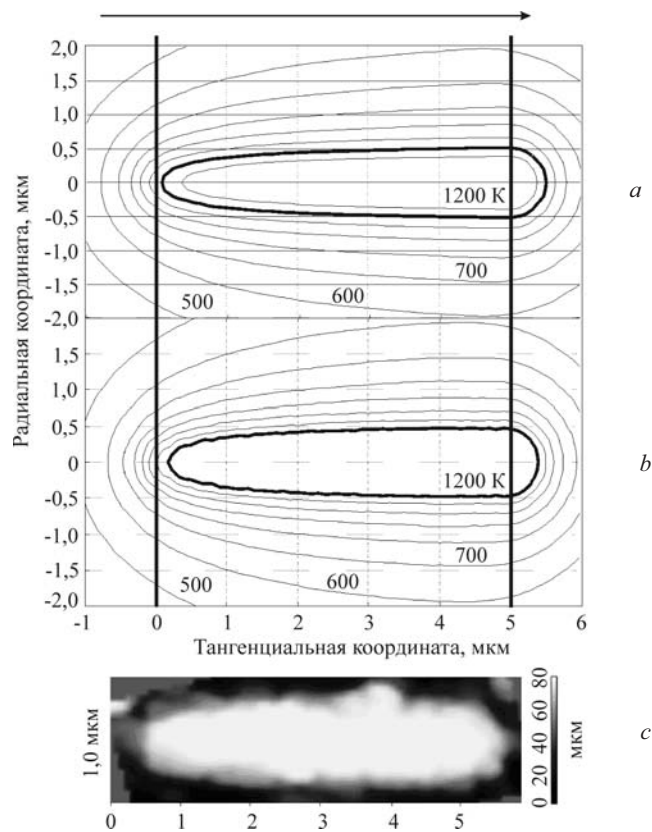


Рис. 2

личаются по форме. Более того, передний фронт штриха как бы отстает от точки включения приблизительно на 0,5 мкм. Заметны крупнодисперсные образования с линейным размером порядка нескольких десятков-сотен микрон. Такие образования могут возникать как вследствие химических реакций на поверхности пленок хрома в процессе жидкостного травления, так и отражать внутреннюю структуру пленки.

Итак, поскольку зависимость теплофизических параметров материалов довольно слабо влияет на пространственные характеристики температурного следа, можно рассматривать линейную задачу прогрева пленки хрома на стеклянной подложке в процессе экспонирования движущимся лазерным пучком. Линии максимально достигнутой температуры на поверхности пленки в процессе записи штриха длиной  $l = 5$  мкм для разных скоростей сканирования показаны на рис. 3. Изолинии приведены с шагом 100 К в диапазоне 500–1200 К. Время воздействия лазерного пучка в процессе нанесения штриха составляет  $\tau = 1/\nu$ , где  $\nu = 2\pi\nu R$  ( $R$  – радиус записи,  $\nu$  – частота вращения, равная 10 оборот./с). Скорость сканирования соответствует различным радиусам записи ( $R = 20, 30, 50, 100, 150$  мм). Пучок движется относительно пленки в направлении оси  $X$ . Координаты включения и выключения пучка обозначены толстыми линиями.

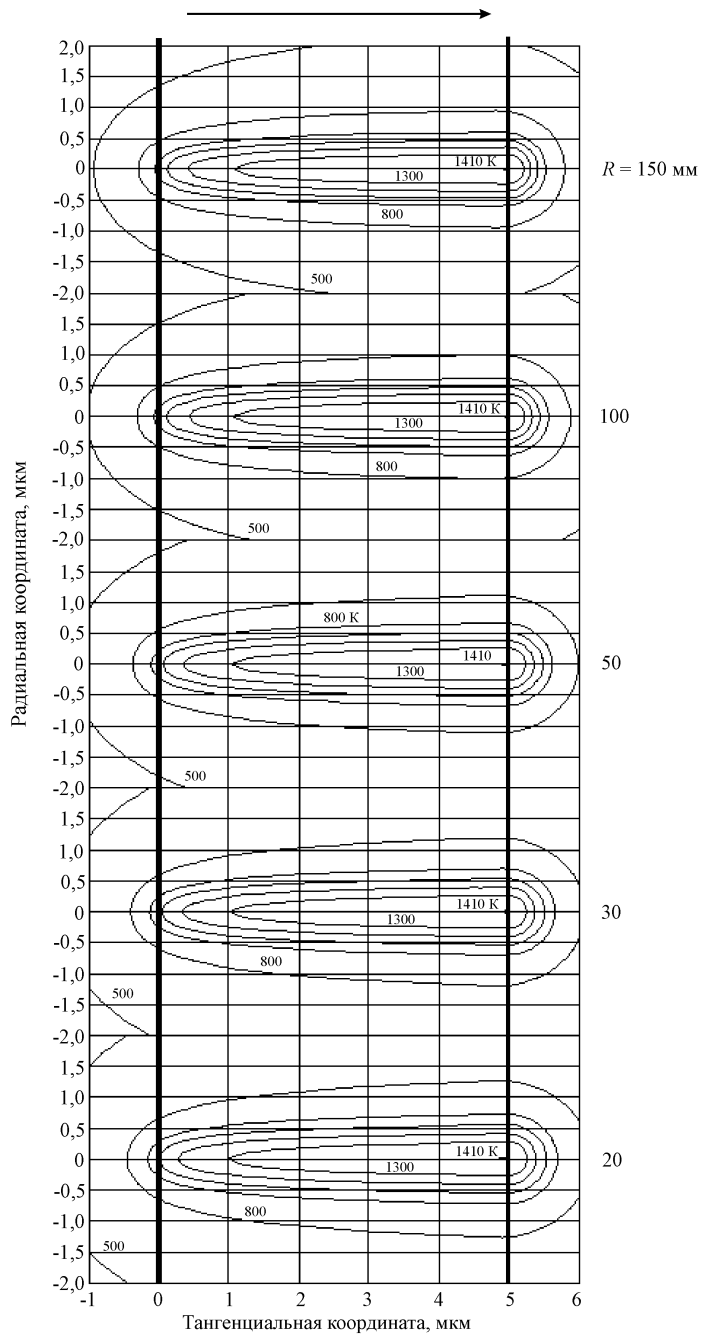


Рис. 3

Температуры для контурных линий: 1410, 1300, 1200, 1100, 1000, 800 и 500 К. Точка с максимальной температурой имеет координаты  $x = 5$  мкм,  $y = 0$ . Вблизи нее видно первую изолинию максимально достигнутой температуры

1410 К. Заметна асимметрия температурного поля при включении и выключении пучка для всех радиусов записи.

При включении пучка на координате  $x = 0$  начинается процесс разогрева пленки и прилегающей области подложки. На рис. 3 это видно по уширению области внутри контурных линий, особенно по самой крайней изолинии  $T = 500$  К. Для  $R = 150$  мм область, прогретая до 500 К, почти вся находится внутри области рисунка размером  $4 \times 7$  мкм. С уменьшением радиуса лазерной записи (соответственно и скорости сканирования) данная область расширяется. При  $R = 20$  мм эта кривая почти вся лежит за пределами рисунка. При выключении же пучка область прогрева выступает за точку выключения на величину, равную примерно половине ширины температурного следа для всех кривых и для всех радиусов. Из сравнения всех рисунков видно, что изолинии вблизи оси пучка ( $Y = 0$ ) практически не отличаются для разных скоростей сканирования. Связано это с тем, что область теплоотвода в пленку и подложку уменьшается с увеличением скорости сканирования, так как уменьшается время взаимодействия излучения с системой пленка – подложка. Следовательно, уменьшается и сам теплоотвод.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что линейные размеры тангенциальных искажений температурного следа будут практически одинаковыми в данном диапазоне радиусов записи. Это приведет к искажениям в топологии получаемого изображения, которое необходимо будет корректировать в процессе лазерной записи.

#### **Структура изображений штрихов. Экспериментальные результаты.**

Для экспериментального исследования кинетики термохимических процессов при круговой лазерной записи в пленках хрома были нанесены специальные тестовые структуры (рис. 4). Запись структур производилась в два этапа. На первом этапе были нанесены штрихи размером  $10 \times 10$  мкм в шахматном порядке (на рисунке обозначены цифрой 1). На втором этапе были нанесены два типа штрихов. Штрихи первого типа имели размер  $14$  мкм в радиальном направлении и  $10$  мкм в тангенциальном (на рисунке они обозначены цифрой 2). Второй тип штрихов, наносимых на этом этапе, представляет собой линейчатую структуру из штрихов длиной  $10$  мкм (в тангенциальном направлении) и шириной  $1$  мкм с шагом, равным  $2$  мкм. Эта структура является продолжением (в радиальном направлении) штрихов 2.

Топология задаваемой тестовой структуры приведена на рис. 4, *a* (изображение получено с помощью программы-эмулятора). Программа-эмулятор строит изображение, исходя из проектируемого рисунка и размера записывающего пучка. В данном случае нанесенные штрихи представляют собой более светлые структуры, чем фон. Хорошо видно перекрытие в тангенциальном направлении между первой и второй серией штрихов. Размер этого пере-

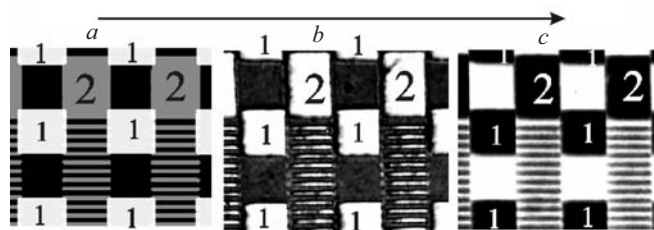


Рис. 4



крытия составляет около 1 мкм – диаметр записывающего пятна, заданного при проектировании. В таком построении не учитывается динамика прогрева системы пленка – подложка.

Изображение экспериментально полученных на круговой лазерной записывающей системе штрихов в отраженном свете представлено на рис. 4, *b*. Оно получено с помощью микроскопа МИИ-4 и цифровой камеры. Видны разрывы в штрихах между первой и второй серией, притом что передний край штрихов гораздо менее ровный, чем задний. Возможно, это связано с динамикой прогрева пленки и тем фактом, что изначально пленка и подложка имеют некоторую шероховатость (до 10 нм). Поэтому в тех областях, где температура становится близка к пороговой, наблюдаются неровности. Разрыв между передними и задними фронтами на данном рисунке можно оценить в 1,5–2,0 мкм. Узкие штрихи, ширина которых должна быть около 1 мкм, видны менее четко, чем залитые квадраты размером 10 × 10 и 14 × 14 мкм. Это зависит от особенностей процесса жидкостного травления. Очевидно, что задние фронты штрихов и квадратов имеют координату, которая была заложена при проектировании. А отставание передних связано как с динамикой прогрева пленки, так и кинетикой термохимических процессов (поверхностное окисление и рекристаллизация) в пленках хрома на стеклянных подложках. Данное изменение размеров штрихов, вероятно, необходимо компенсировать для элементов, работающих на отражение.

Кроме того, на рис. 4, *c* показано изображение тех же штрихов, сделанное в проходящем свете. Поэтому структуры оставшейся после травления пленки хрома черные, а фон белый. В данном случае одиночные штрихи длиной 10 мкм имеют очевидное расширение от точки включения и практически не наблюдается явных разрывов при включении и выключении. В этом плане картина «красивее» изображенной на рис. 4, *b*. Однако в связи с асимметрией температурного поля произошло смещение полученных штрихов относительно проектируемых (см. рис. 4, *a*). Такое смещение можно оценить исходя из координаты следа при выключении записывающего пучка. След получается длиннее на половину ширины пятна. И если ширина следа ~1 мкм, то смещение составит примерно 0,5 мкм. Расчеты показали, что линейное сме-

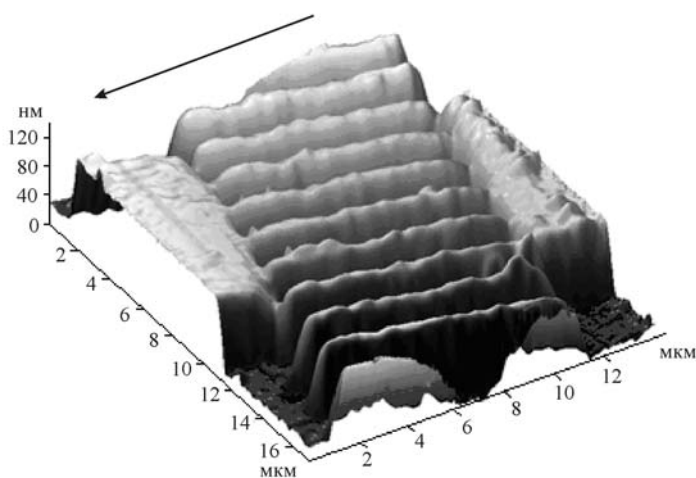


Рис. 5

щение в данном диапазоне скоростей сканирования практически одинаково и приведет к ошибкам в изготовлении угловых шкал, дифракционных оптических элементов, фотошаблонов и т. д.

И наконец, рассмотрим изображение таких же штрихов, полученное с использованием сканирующей зондовой микроскопии. На рис. 5 показано трехмерное изображение тестовых структур, синтезированных вышеуказанным способом. Хорошо видно, как после точки старта записывающего пучка происходит увеличение высоты профиля до максимальной и как резко штрихи обрываются в месте выключения пучка. Таким образом, при отражении света от участков, где максимальная высота еще не достигнута, свет рассеивается. В проходящем свете участки штриха меньшей толщины так же, как и участки с максимальной толщиной, практически не пропускают свет. Этим и объясняется разница изображений на рис. 4, *b* и *c*. По краям изображения видны границы измеренной области.

Этот факт хорошо согласуется с результатами расчета температурного поля, приведенными на рис. 2 и 3.

**Заключение.** В данной работе проведен расчет температурного поля при лазерной термохимической записи в пленках хрома на стеклянных подложках для большого диапазона скоростей сканирования. Рассмотрены две модели: линейная, когда теплофизические параметры пленки и подложки не зависят от температуры, и нелинейная, когда параметры зависят от температуры. Показано, что тепловое поле для радиусов записи 20 мм (при скорости вращения 10 оборот./с) и выше имеет практически одинаковую форму в пределах ширины следа. В результате расчетов установлено, что за время прогрева пленки до температуры, при которой происходят термохимические изменения, она успевает сместиться относительно точки включения на заметное расстояние (до нескольких микрон). Отсюда следует, что в процессе изготовления изделий методом термохимической лазерной записи мощность записывающего пучка для коротких (размером примерно 10 мкм в направлении движения пучка) и длинных штрихов необходимо выбирать исходя из тестовых записей такой же длины.

Проведено сравнение пространственных параметров температурного поля на поверхности пленки хрома при сканировании сфокусированным лазерным пучком с изображениями экспериментально нанесенных штрихов. На основе анализа изображений, полученных в пленке хрома как в отраженном свете, так и в проходящем, установлено, что в первом случае изображения структур короче на несколько микрон, чем изображения, наблюдаемые в проходящем свете. Уменьшение длины изображения следа термохимического взаимодействия в отраженном свете возникает вследствие постепенного увеличения толщины оставшейся пленки вдоль движения пучка до максимальной (оставшейся после жидкостного травления), так как имеет место рассеяние света на участках, непараллельных поверхности подложки. Увеличение толщины оставшейся после травления структуры происходит из-за инертности прогрева системы пленка – подложка. Данную особенность необходимо учитывать при изготовлении элементов с использованием круговой лазерной термохимической записи.

Автор выражает благодарность коллективу Лаборатории лазерных технологий ИАиЭ СО РАН, в частности В. П. Королькову, за предоставленную возможность проведения экспериментов с использованием круговой лазерной записывающей системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И.** Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // Письма в ЖТФ. 1985. **11**, вып. 3. С. 144.
2. **Полещук А. Г.** Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // Автометрия. 2003. **39**, № 6. С. 39.
3. **Вейко В. П.** Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
4. **Лякишев Н. П., Гасик М. И.** Металлургия хрома. Харьков: Элиз, 1999.
5. **Agranovsky M. L., Korol'kov V. P., Rubenchik A. M.** Modeling of the optical recording process on chromium films // Journ. Appl. Phys. 1991. **70**, N 10. P. 5224.
6. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
7. **Кахандер Д., Моулер К., Нэш С.** Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 2001.
8. **Дьюли У.** Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986.

*Поступила в редакцию 29 ноября 2006 г.*

---