

# Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур

В.П.Вейко, В.И.Корольков, А.Г.Полещук, А.Р.Саметов, Е.А.Шахно, М.В.Ярчук

*Термохимический метод записи информации, основанный на локальном лазерном окислении тонкой металлической пленки с последующим травлением необлученной области, является альтернативой лазерной фотолитографии и прямому лазерному удалению материала пленки. При таком способе записи отсутствуют термические и гидродинамические искажения рисунка, как в случае лазерной абляции, а количество технологических операций существенно меньше, чем при изготовлении фотомасок классическим методом фотолитографии. Основная область применения термохимической технологии – изготовление дифракционных оптических элементов (ДОЭ), которые широко используются в принтерах, аппаратах для чтения штрих-кодов, лазерных CD- и DVD-проигрывателях и т. д. Задача настоящего исследования – увеличение разрешающей способности термохимического способа записи информации на тонких металлических пленках хрома.*

**Ключевые слова:** лазерная термохимическая технология, запись информации, тонкие пленки, дифракционные оптические элементы.

## 1. Введение

Термическое воздействие лазерного излучения лежит в основе ряда методов получения микроструктур на тонких пленках. Особенностью лазерной термохимической технологии (ЛТТ) является то, что под действием иницированного лазерным излучением нагрева тонкой пленки металла (в частности, хрома) в пленке протекают химические и физические процессы, локализованные в пределах нагреваемой зоны, т. е. образуется скрытое термохимическое изображение [1]. Пленка в области скрытого изображения отличается по своему физическому и химическому составу от исходной пленки, что позволяет выявить структуру изображения [1, 2] путем жидкостного химического травления (проявления).

Применение ЛТТ наиболее оправдано при изготовлении дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [3] амплитудного типа, которые обычно состоят из непрозрачных полос (дифракционных зон) с переменными шириной и периодом. Это обусловлено тем, что в ряде случаев дифракционная структура должна наноситься на выпуклые или вогнутые оптические поверхности или подложки большой толщины и площади [4]. Указанные специфические особенности ограничивают применение известной технологии фотолитографии [5] (основанной на применении фоторезистов) для изготовления прецизионных и крупногабаритных ДОЭ. Дело в том, что тонкая и

однородная по толщине пленка фоторезиста может быть нанесена только центрифугированием, применение которого для тяжелых подложек практически невозможно. Очевидно, что термохимический метод формирования структуры ДОЭ в тонких пленках хрома позволяет существенно упростить процесс изготовления и увеличить его точность [6].

Согласно классической модели [1], термическое воздействие лазерного излучения на тонкие пленки хрома приводит к образованию тонкого слоя окисла, изменяющего физико-химические свойства облученной поверхности. Также было установлено [1, 2, 7], что помимо образования на поверхности пленки окиси хрома, протекает еще ряд процессов, в частности отжиг, рекристаллизация и частичное окисление пленки на всю толщину. Та-ким образом, при экспонировании пленки хрома лазерным излучением имеют место как процессы поверхностного окисления, так и изменение свойств в объеме пленки. Однако иницированный лазерным излучением процесс поверхностного окисления играет в исследованных режимах, по-видимому, доминирующую роль в формировании микроструктур в пленках хрома. Наибольшее распространение получила ЛТТ, основанная на экспонировании вращающейся с постоянной скоростью подложки, покрытой тонкой пленкой хрома, и ее последующей химической обработке в селективном травителе. Экспонирование производится сфокусированным излучением мощного непрерывного лазера при круговом (или спиральном) перемещении подложки с помощью лазерной записывающей системы (КЛЗС) [8]. Этим методом изготовлены уникальные ДОЭ, в частности, для контроля формы асферических зеркал крупнейших в мире телескопов [4] с минимальными размерами хромовой структуры около 500 нм при общем размере элементов до 230 мм.

В последние годы резко возрос интерес к дифракционным элементам, работающим в УФ и ДУФ диапазонах, а также к субволновым ДОЭ [9, 10]. В этой связи ставится

В.П.Вейко, Е.А.Шахно, М.В.Ярчук. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; e-mail: veiko@lastech.info.ru

В.И.Корольков, А.Г.Полещук, А.Р.Саметов. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1

Поступила в редакцию 30 декабря 2010 г., после доработки – 29 марта 2011 г.

задача повышения пространственного разрешения лазерной записи на пленках хрома [11]. Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному изучению возможностей (и ограничений) повышения разрешающей способности ЛТТ.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим окисление тонкой металлической пленки вследствие ее нагрева лазерным излучением. При нагревании в пленке активируется целый ряд физико-химических процессов (в частности, адсорбция кислорода на поверхности, диффузия ионов металла и кислорода, химическая реакция окисления металла с образованием слоя окисла и т. п.) [12]. Скорость увеличения толщины слоя окисла  $H$  от температуры  $T$  определяется соотношением скоростей указанных процессов. В условиях изотермического нагревания кинетика окисления ограничивается самой медленной стадией – процессами диффузии. В этом случае она описывается уравнением Вагнера

$$\frac{dH}{dt} = \frac{B}{H} \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right), \quad (1)$$

где  $B$  – константа параболического закона окисления;  $T_a$  – энергия активации диффузионных процессов, выраженная в градусах Кельвина;  $t$  – текущее время.

Для вычисления толщины слоя окисла в условиях лазерного неизолированного окисления воспользуемся подходом, разработанным М.Н.Либенсоном, согласно которому, если температура пленки существенно меньше значения  $T_a$ , активационная экспонента резко растет с температурой и основной вклад в увеличение толщины окисной пленки вносится в те моменты времени, когда температура  $T$  близка к своему максимальному значению  $T_{\max}$ . Это позволяет определить толщину окисного слоя в условиях лазерного нагрева как равную толщине слоя окисла при изотермическом нагреве в течение некоторого эквивалентного времени (меньшего времени воздействия излучения)  $t_{\text{eq}}$  [13]:

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_{\text{eq}}}. \quad (2)$$

Величина  $t_{\text{eq}}$  определяется характером изменения во времени температуры при лазерном воздействии. В частности, если максимум температуры достигается в момент времени  $t_0$  до окончания лазерного воздействия, то

$$t_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{2\pi T_{\max}^2}{T_a |T''(t_0)|}}. \quad (3)$$

Здесь  $T'' = \partial^2 T / \partial t^2$ . Таким образом, определение зависимости температуры пленки от времени в каждой точке пленки позволяет определить структуру образующегося окисла.

Последующее травление пленки формирует ее топографию в результате удаления участков пленки, не защищенных слоем окисла достаточной толщины. Значение этой критической толщины точно не определено. По данным различных источников оно составляет от 4 до 8 нм. Для определения верхней границы минимальной ширины элемента пленочного слоя, получаемого методом лазерного окисления, мы приняли в расчетах критическую толщину равной 6 нм.

Основное внимание в настоящей работе уделено вопросу повышения разрешающей способности формирования микроструктур методом сканирования пучка непрерывного лазерного излучения. В этом случае время воздействия излучения оказывается на несколько порядков больше, чем при обычно используемом наносекундном режиме облучения.

## 3. Анализ предельной разрешающей способности термохимического метода записи изображения

Рассмотрим возможности получения на пленке термохимического изображения минимальных размеров при гауссовом распределении интенсивности излучения в фокальном пятне. Толщина слоя окисла, образующегося на поверхности металла в результате воздействия прямоугольного импульса излучения длительностью  $\tau$  при вагнеровском законе окисления, как следует из выражений (2) и (3), может быть записана в виде [13]:

$$H = 2 \left[ \frac{BT_{\max}^2 \tau}{T_a (T_{\max} - T_{\text{in}})} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{T_a}{2T_{\max}}\right), \quad (4)$$

где  $T_{\text{in}}$  – начальная температура. Отсюда получим соотношение толщин слоя окисла на расстоянии  $r$  от центра облученной области ( $H_r$ ) и в ее центре ( $H_0$ ):

$$\frac{H_r}{H_0} = \frac{T(r)}{T(r=0)} \left[ \frac{T(r=0) - T_{\text{in}}}{T(r) - T_{\text{in}}} \right]^{1/2} \times \exp \left[ -\frac{T_a}{2T(r)} + \frac{T_a}{2T(r=0)} \right]. \quad (5)$$

Считая, что  $T(r)/T(r=0) \approx \exp[-(r/r_0)^2]$  и  $T - T_{\text{in}} \approx T$ , находим отношение характерного размера  $r$ , полученного на пленке элемента изображения к радиусу облученной области в случае  $r < r_0$ :

$$\frac{r}{r_0} \approx \sqrt{2 \frac{T_0}{T_a} \ln \frac{H_0}{H_r}}, \quad (6)$$

где  $T_0 \approx 1220$  К – температура, достаточная (согласно экспериментальным данным) для образования защитного слоя окисла на пленке хрома.

Таким образом, достижимый минимальный размер элемента изображения на пленке, полученного методом лазерного окисления с последующим травлением, зависит от размера облученной области и определяется свойствами окисла и особенностями процесса травления. В частности, при  $H_r/H_0 = 0.8$  минимальный размер элемента  $r_{\text{min}}$  составляет  $\sim 0.1r_0$ . Это значит, что в принципе размер элемента может быть много меньше радиуса фокального пятна и, соответственно, существенно меньше длины волны излучения.

## 4. Окисление пленки хрома под действием сканирующего пучка непрерывного лазерного излучения

Для определения толщины образующегося слоя окисла согласно приведенным выше выражениям (2) и (3) необходимо определить температурное поле в металлической пленке при действии на нее сканирующего лазерного

го излучения. Рассмотрим нагревание металлической пленки толщиной  $h$ , находящейся на диэлектрической подложке, пучком непрерывного сканирующего лазерного излучения с гауссовым распределением интенсивности. Отметим, что при сканировании временная форма импульса, воздействующего на каждую точку поверхности, зависит от пространственного распределения интенсивности излучения в пучке. Будем рассматривать квазистационарный режим нагревания. Нами были предварительно проведены оценочные расчеты отношения теплового потока из облученной области в пленке  $P_1$  к тепловому потоку в подложку  $P_2$ :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{2h}{r_0} \sqrt{\frac{a}{a_s}}, \quad (7)$$

где  $r_0$  – радиус облученной области на поверхности пленки,  $a$  и  $a_s$  – температуропроводности пленки и подложки соответственно. Для большинства практически важных случаев  $P_1/P_2 > 1$ . В частности, для пленки хрома толщиной 100 нм на подложке из стекла К-8 при радиусе облученной области 0.25 мкм  $P_1/P_2 \approx 4$ . Это позволяет рассматривать пленку, нагреваемую лазерным излучением, как адиабатически изолированную, пренебрегая теплоотводом в подложку.

Уравнение теплопроводности для пленки при равномерном прогреве ее по толщине имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{P(1-R)}{\pi r_0^2 \rho c h} \exp \left[ -\frac{(x-Vt)^2 + y^2}{r_0^2} \right], \quad (8)$$

где  $P$  – мощность лазерного излучения;  $V$  – скорость сканирования;  $\rho$ ,  $c$ ,  $R$  – соответственно плотность, теплоемкость и коэффициент отражения пленки. Оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости поверхности пленки, причем ось  $x$  совпадает с направлением сканирования и проходит через центр облученной области.

Решение уравнения (8), полученное нами путем перехода к движущейся системе координат, связанной с облученной областью, и применения к полученному уравнению преобразования Ганкеля нулевого порядка, приведено в работе [11]. Численные расчеты показали, что относительное уменьшение толщины слоя образующегося окисла к периферии распределения интенсивности в фокальном пятне существенно меньше, чем относительное уменьшение максимальной достигаемой температуры (проиллюстрировано на рис.1 для частного случая, когда температура в центре пятна достигает 1600 °С). Это дает возможность получения при термохимической записи разрешения, превышающего пространственное разрешение фокусирующей оптики.

Заметим, что характерной особенностью кривой на рис.1, описывающей распределение толщины слоя окисла в направлении, перпендикулярном направлению сканирования пучка, является существенное отличие ее формы от гауссовой: пологий участок в области  $0-0.05$  мкм от центра пятна сменяется участком с резким уменьшением толщины слоя окисла при больших расстояниях от центра. Математически граница этих участков определяется положением точки  $y^*$ , в которой вторая производная функции  $H(y)$  или  $I(y)$  равна нулю. Для функции

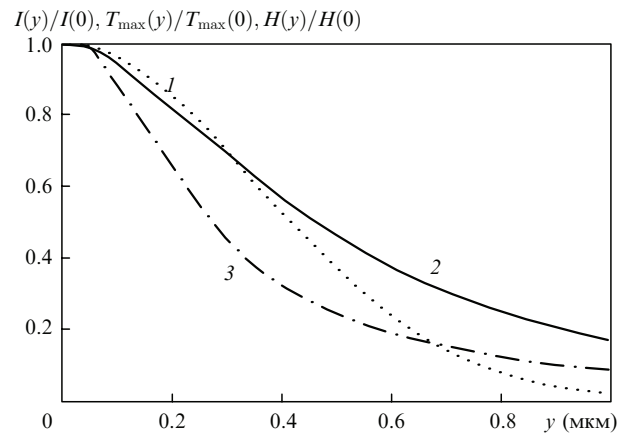


Рис.1. Относительные изменения интенсивности  $I(y)/I(0)$  (1), температуры  $T_{max}(y)/T_{max}(0)$  (2) и толщины пленки окисла  $H(y)/H(0)$  (3) в зависимости от расстояния от центра лазерного пучка;  $h = 100$  нм,  $r_0 = 0.5$  мкм,  $T_{max}(0) = 1600$  °С,  $H(0) = 8$  нм.

$H(y)/H(0)$  на рис.1  $y^* \approx 0.05$  мкм, в то время как для гауссова распределения интенсивности  $I(y)$  в фокальном пятне  $y^* = r_0/\sqrt{2} \approx 0.36$  мкм, а для температурного распределения  $-y^* \approx r_0/\sqrt{2} + \sqrt{ar_0/V} \approx 0.4$  мкм.

Расчетная ширина полученного изображения (если принять, что критическая толщина слоя окисла, соответствующая краю изображения, равна 6 нм) при диаметре облученной области 0.5 мкм составляет от 0.4 мкм при минимальных значениях мощности излучения и максимальных скоростях сканирования (рис.2, нижняя кривая) до 2.5 мкм на пороге плавления (рис.2, верхняя кривая). При адекватном выборе значения мощности излучения (в соответствии со скоростью сканирования) минимальная ширина полученного изображения практически не зависит от скорости сканирования, и разрешающая способность составляет от 2500 до 400  $\text{мм}^{-1}$ .

Проведенные расчеты показали, что мощность излучения, необходимая для окисления пленки хрома толщиной 100 нм, лежит в интервале 10–20 мВт при скорости сканирования от 0.1 до 1 м/с и радиусе фокального пятна фокусировки  $r_0 \sim 0.4$  мкм, что хорошо согласуется с экспериментально полученными значениями 10–30 мВт. В зависимости от скорости сканирования мощность излучения должна изменяться так, чтобы, с одной стороны,

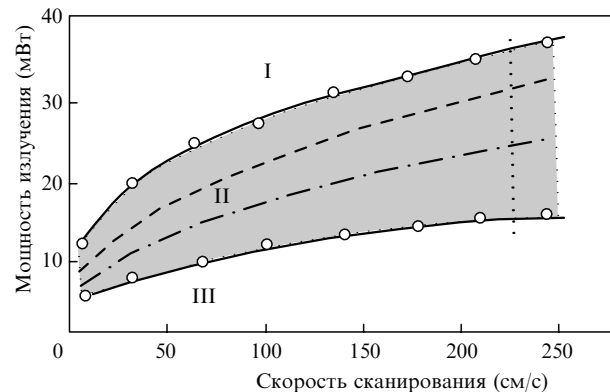


Рис.2. Зависимость от параметров облучения диапазона термохимической записи: I – область плавления, II – термохимическая область, III – область недостаточной толщины окисного слоя. Штриховая линия соответствует расчетному значению границы областей I и II, штрих-пунктирная линия – областей II и III ( $h = 100$  нм).

толщина окисной пленки превышала требуемое критическое значение и, с другой стороны, не происходило плавления. Области допустимых значений мощности записывающего пучка в зависимости от скорости сканирования, рассчитанные теоретически и полученные экспериментально, приведены на рис.2.

## 5. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование пространственного разрешения при термохимической записи было проведено с помощью прецизионной лазерной системы, созданной в ИАиЭ СО РАН [8, 14]. Подложка с тонкой пленкой хрома устанавливалась на верхней части прецизионного аэростатического шпинделя (скорость вращения до 15 об/с). Мощностью излучения непрерывного аргонового лазера ( $P \sim 0.5$  Вт,  $\lambda = 488$  нм) управляли посредством компьютера с 10-битным разрешением. Лазерный пучок фокусировался в пятно диаметром 0.6 мкм (по уровню половины интенсивности). Оптическая головка перемещалась в радиальном направлении по аэростатическим направляющим с помощью линейного двигателя и интерферометрической обратной связи по координате. Диапазон перемещения составлял 250 мм, точность позиционирования – около 20 нм, разрешающая способность позиционирования – выше  $1 \text{ нм}^{-1}$ .

В эксперименте использовались пленки хрома толщиной 80–100 нм, напыленные на подложки из плавленого кварца и оптического стекла. Исследовались пленки, нанесенные как термическим напылением, так и магнетронным. При экспонировании скорость перемещения записывающего пятна относительно подложки варьировалась от 4 до 180 см/с. Это соответствует радиусу кольцевой траектории пучка от 0.5 до 30 мм при скорости вращения около 10 об/с. После экспонирования пленки обрабатывались в селективном травителе (время травления около 3 мин) [14], состоящем из шести частей 25%-ного раствора  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  и одной части 25%-ного раствора  $\text{NaOH}$ .

Важный вопрос о толщине пленки окисла, возникающей при экспонировании, решался путем прямого измерения ее толщины с помощью профилографа Talystep. На рис.3,а приведена микрофотография (на отражение) поверхности пленки хрома (до травления) с серией записанных тестовых линий. Мощность записывающего пучка последовательно уменьшалась от линии к линии. На рис.3,б показана микрофотография этого же участка поверхности после травления. На рис.3,б и в приведены профилограммы этого участка пленки хрома до и после травления. Видно, что до травления изменение высоты рельефа достигает 100 нм в области плавления пленки и уменьшается с 50 до 10 нм в области образования скрытого изображения (область термохимии). Из рис.3,б следует, что максимальная толщина пленки окисла не превышает толщины исходной пленки хрома. Это согласуется с классической теорией, поскольку объем образующегося окисла ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) больше объема исходного материала (Cr) примерно в 2 раза. В области записи в режиме термохимии толщина образовавшейся пленки окисла составляет 10–20 нм и далее плавно уменьшается, что соответствует принятой модели.

Зависимость ширины линий от мощности экспонирующего излучения исследовалась с использованием оптического микроскопа и АСМ (Solver Pro). На рис.4 при-

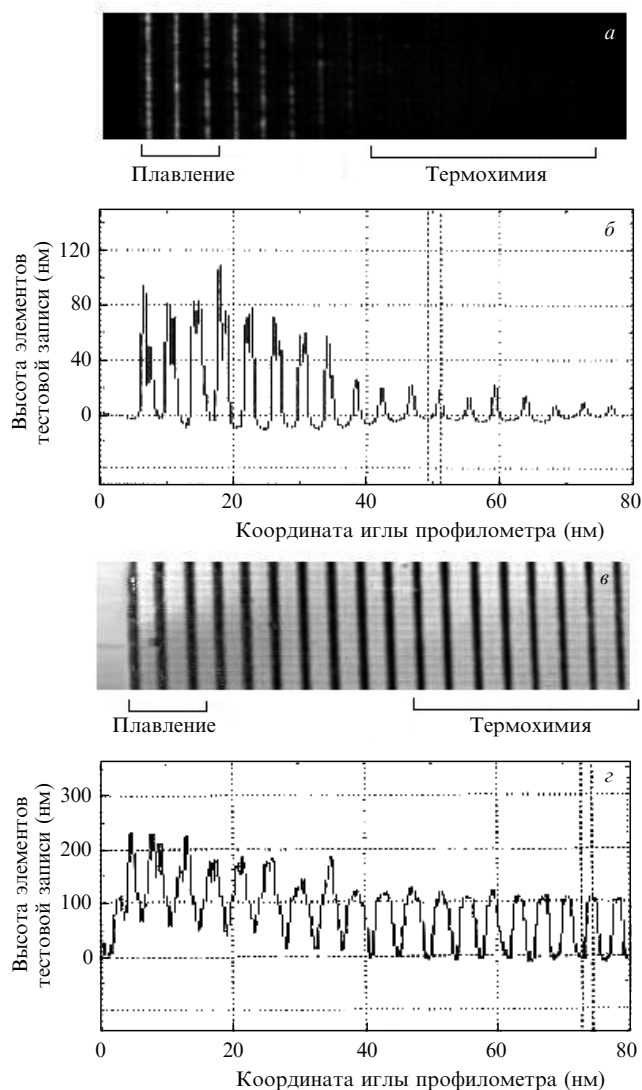


Рис.3. Микрофотографии и соответствующие профилограммы фрагмента тестовой записи на пленке хрома до (а, б) и после (в, г) травления. Пленка хрома толщиной 100 нм получена термическим напылением. Период следования дорожек 4 мкм. Скорость движения пленки при записи 80 см/с.

ведена микрофотография тестового образца, записанного на пленке хрома (радиус записи 20 мм, скорость 150 см/с). Расстояние между линиями (или треками) 1.5

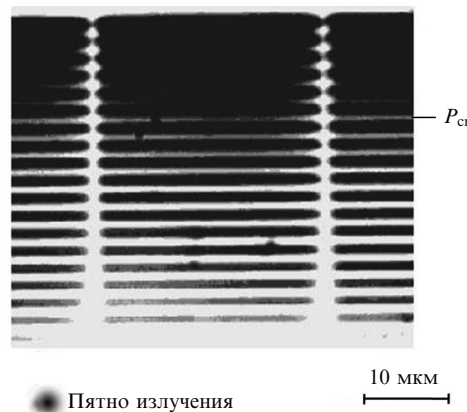


Рис.4. Микрофотография тестового образца ( $40 \times 40$  мкм), записанного на пленке хрома;  $P_{cr}$  – критическая мощность, или мощность, соответствующая плавлению пленки хрома.



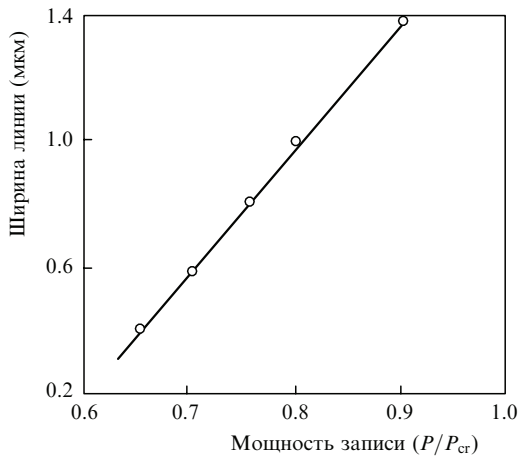


Рис.5. Ширина записанных треков как функция мощности пучка.

мкм. Интервал между группами составляет 1 мкм в радиальном направлении. Мощность пучка излучения возрастает снизу вверх. Ширина записанных треков линейно зависит от мощности лазерного излучения (рис.5), максимальное разрешение равно 650 лин/мм.

Профили треков при разной мощности экспонирующего излучения показаны на рис.6. Из рисунка видно, что при достаточно малой мощности трек имеет форму узкого пика (шириной 0.4 мкм на уровне 0.5), в то время как

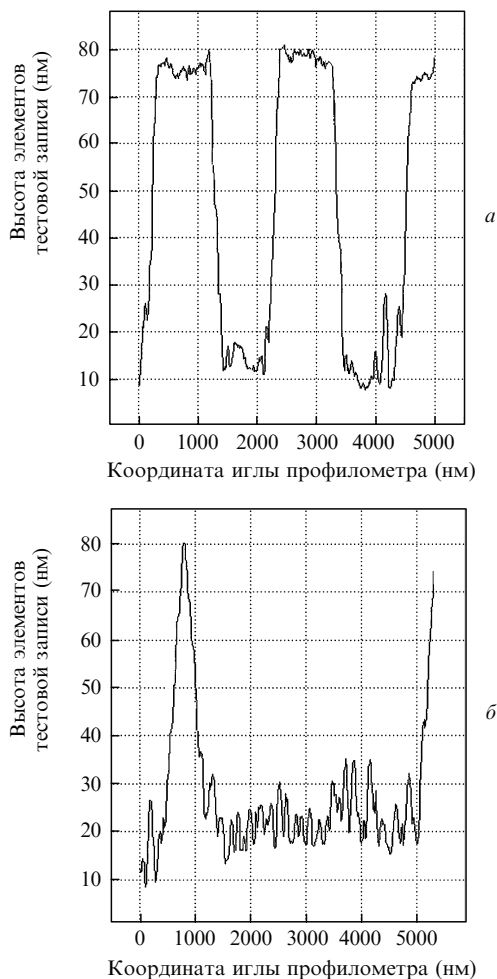
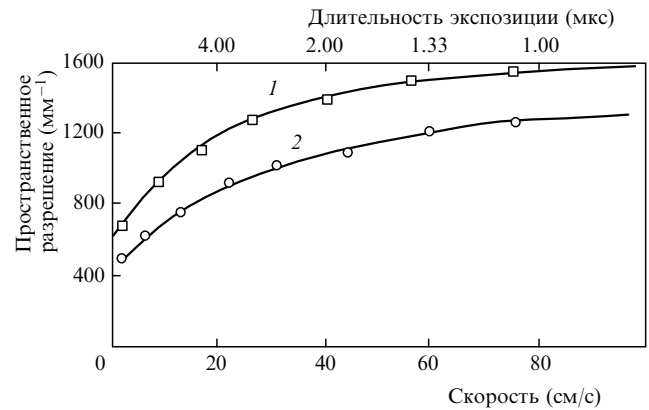


Рис.6. АСМ-профили трека на пленке хрома. Ширина треков 0.9 (а) и 0.2 мкм (б).

Рис.7. Зависимости пространственного разрешения при записи изображения  $\delta = 1/2d$  ( $d$  – минимальная ширина записанной линии) от скорости сканирования и соответствующей ей длительности экспозиции: 1 – магнетронное распыление, толщина пленки хрома 50 нм; 2 – термическое напыление, толщина пленки 80 нм.

пятно излучения (внизу слева на рис.4) имеет существенно больший диаметр (0.6 мкм на уровне 0.5) и распределение интенсивности, близкое к гауссову. Эти экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты, представленные на рис.1.

На рис.7 представлены полученные экспериментально зависимости пространственного разрешения от скорости движения записывающего пятна относительно пленки и, для сравнения, характерное время экспозиции. Приведены кривые для двух типов пленок, полученных путем термического напыления и магнетронного распыления. Микроструктуры пленок с термическим напылением имеют более низкое разрешение из-за образования микроструктур (рекристаллизации) на краях линий. Это становится особенно заметным при малых временах экспозиции.

При облучении пленок магнетронного распыления пространственное разрешение в случае больших скоростей движения превышает  $1600 \text{ мм}^{-1}$ , что близко к пределу разрешения оптической системы записи. При скоростях, меньших 30 см/с, разрешение начинает ухудшаться, что обусловлено расширением распределения температуры в пленке за счет теплопроводности.

## 6. Обсуждение результатов

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что процесс поверхностного окисления вносит существенный вклад в формирование структуры в хrome методом ЛТТ. Кроме поверхностного окисления пленки хрома, имеет место ряд других эффектов, происходящих в объеме экспонированной пленки.

Об изменениях, происходящих в объеме пленки, свидетельствуют результаты исследования кинетики травления облученной и необлученной пленок хрома (рис.8) фотометрическим методом [15]. Из рисунка видно, что в начале травления как облученной, так и необлученной пленки существует временная задержка (соответственно,  $t_1$  и  $t_3$ ), обусловленная наличием окислов хрома. На поверхности необлученной пленки толщина исходного слоя окисла составляет 1–2 нм, а при облучении его толщина увеличивается до 10–20 нм, что и приводит к изменению времени травления этого слоя с 20 до 100 с. Пропускание пленки при этом почти не меняется. Струк-

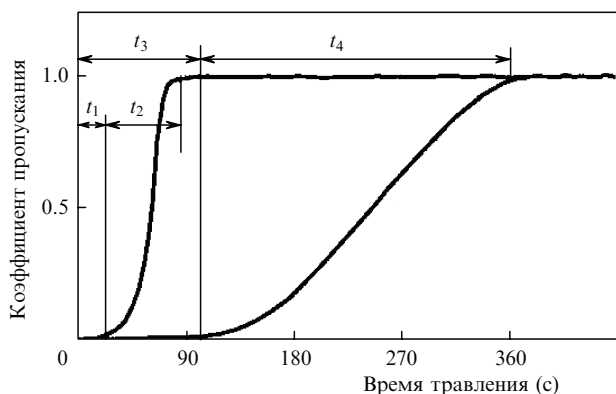


Рис. 8. Типичные зависимости пропускания неэкспонированной (кривая 1) и экспонированной (кривая 2) пленок хрома (толщина 100 нм) на длине волны 633 нм от времени травления (растворы  $K_3Fe(CN)_6$  и NaOH).

турные изменения, происходящие в тонких пленках при лазерном облучении, вызывают изменение их физических свойств (в частности, рост размеров микрокристаллов, изменение количества дефектов кристаллической решетки [14], объемное окисление) и в конечном итоге снижают скорость травления. Отметим, что при равной толщине время травления  $t_4$  облученной пленки в 2.5 раза больше, чем время травления  $t_2$  чистой пленки хрома.

Кроме разности в скоростях травления, можно указать и на существенный наклон границы экспонированного и протравленного участков (см. рис.6,б). Из рисунка видно, что ширина основания пика составляет около 500 нм при толщине пленки 80 нм, т. е. угол наклона равен  $\sim 15^\circ$ , в то время как если бы имело место только окисление, он должен быть существенно больше [5].

Детальное исследование этого процесса особенно важно при изготовлении ДОО с помощью ЛТТ, т.к. именно поверхность пленки хрома (и, соответственно, элемента) взаимодействует с оптическим излучением. Так, например, при изготовлении отражательного ДОО время травления должно быть в диапазоне от  $t_2$  до  $t_3$  (рис.8), поскольку в противном случае уменьшится как толщина, так и коэффициент отражения пленки хрома.

## 7. Выводы

1. Теоретически показано, что разрешающая способность  $\delta = 1/2d$  термохимического изображения выше, чем таковая для температурного изображения, вследствие обратной экспоненциальной зависимости скорости роста толщины окисла от температуры. Увеличение разрешающей способности, определяемое соотношением их первых производных по координате  $(1/H)|\partial H/\partial x|$  и

$(1/T)|\partial T/\partial x|$ , в нашем случае достигает 20. Реальная (экспериментальная) разрешающая способность при получении термохимического изображения может быть еще выше вследствие фототермохимической обратной связи между поглощенной плотностью мощности, толщиной окисла и температурой.

2. Теоретически и экспериментально изучена возможность термохимического формирования пленочных структур с высоким пространственным разрешением при локальном нагреве непрерывным сканирующим сфокусированным лазерным излучением. Показана возможность формирования в этом режиме высококачественных дифракционных структур с пространственной частотой до  $650 \text{ мм}^{-1}$  и выше при числовой апертуре фокусирующего объектива  $NA = 0.65$ , на длине волны излучения лазера 488 нм и при скорости сканирования пучка более  $100 \text{ см/с}$ .

3. Как теоретическое (модельное), так и экспериментальное предельное значение разрешающей способности зависит от величины минимальной толщины окисла, устойчивого к травлению.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 09-02-01065 и 10-02-00208) и Госконтрактом П1134.

1. Вейко В.П., Котов Г.А., Либенсон М.Н., Никитин М. Н. *ДАН СССР*, **208**, 587 (1973).
2. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Чурин Е.Г., Юрлов Ю.И. *Квантовая электроника*, **12** (4), 755 (1985).
3. *Методы компьютерной оптики*. Под. ред. В.А.Сойфера (М.: Физматлит, 2003).
4. Burge J.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2576**, 258 (1995).
5. Моро У. *Микротитография: принципы, методы, материалы* (М.: Мир, 1990).
6. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. *Appl. Opt.*, **38**, 1295 (1999).
7. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **45**, 6, 1018 (1981).
8. Полещук А.Г., Корольков В.П., Черкашин В.В., Райхельт С., Бёдж Дж. *Автометрия*, **3**, 3 (2002).
9. Chen C.G., Konkola P.T., Heilmann R.K. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4936**, 126 (2002).
10. Mallik P.C.V., Zehnder R., Burge J.H., Poleshchuk A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6721**, 672104 (2007).
11. Veyko V.P., Shakhno E.A., Poleshchuk A.G., Korolkov V.P., Matyzhonok V. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, **3** (3), 201 (2008).
12. Котов Г.А., Либенсон М.Н. *Электронная техника. Сер.б*, **4** (44), 56 (1973).
13. Либенсон М.Н. *Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние* (СПб.: Наука, 2007, с. 423).
14. Точицкий Э.И. *Кристаллизация и термообработка тонких пленок* (Минск: Наука и техника, 1976).
15. Cherkashin V.A., Churin E.G., Burge J.H., Korolkov V.P., Poleshchuk A.G., Kharisov A.A., Koronkevich V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3010**, 168 (1997).