

В. П. Кирьянов, В. Г. Никитин

(Новосибирск)

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЗАПИСИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПЛЕНКАХ ХРОМА

Рассмотрена модель механизма записи скрытых изображений в пленках хрома, основанная на свойствах явления взрывной кристаллизации. Показано, что применение этой модели записи изображений, осуществляемой с помощью лазерных генераторов изображений типа CLWS-300/С, позволяет описать различия в форме переднего и заднего края следа взаимодействия, объяснить изменения положения переднего края следа относительно угловой координаты, соответствующей моменту подачи сигнала включения. Утверждается, что доминирующим процессом при записи скрытых изображений в пленках хрома является их рекристаллизация.

Введение. При записи микроизображений желательно использовать малостадийные технологии, т. е. такие процессы, когда число промежуточных этапов записи минимально. К таким процессам относят термохимическую запись скрытых изображений в пленках хрома [1]. Согласно этой технологии требуются только три этапа: нанесение в вакууме пленки хрома, ее экспозиция сфокусированным лучом лазера и обработка пленки хрома в селективном травителе. В результате травления происходит проявление скрытого изображения, сформированного на стадии экспозиции пленки. Принято считать [2, 3], что при экспозиции хромовых пленок доминирующим процессом в формировании скрытого изображения является процесс окисления поверхностного слоя пленки при ее нагреве. Хотя в [4] не исключается, что «... селективность травления облученных и необлученных участков хрома может быть вызвана ... рекристаллизацией пленки, а также диффузией на границе хрома с подложкой», считается, что эти процессы «... не играют решающей роли в появлении селективности травления».

Экспериментально выявлено [5–8], что в результате воздействия интенсивного лазерного излучения свойства пленки изменялись по всей толщине, а не только на ее поверхности. Однако приоритет поверхностных окислительных процессов в формировании скрытого изображения в этих работах сомнению не подвергался. Данная технология была широко использована при изготовлении прецизионных компьютерно-синтезированных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и измерении угловых величин в лазерных технологических комплексах, созданных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН и Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН (КТИ НИ СО РАН) [9–12]. В [8] показано, что с помощью созданной технологии и аппаратуры удастся обеспечить изготов-

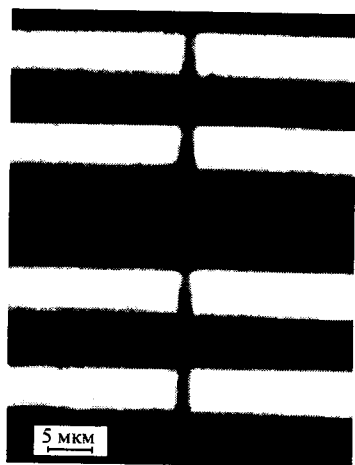


Рис. 1. Разрывы в кольцевых структурах на стыке начала и конца оборота при записи в пленках хрома с помощью круговых лазерных генераторов изображений

ление уникальных ДОЭ, формирующих волновые фронты со среднеквадратичным отклонением, например, от сферы не более $\sigma = 5$ нм. При этом выявились эффекты, которые искажают топологию синтезируемых изображений. Их трудно интерпретировать, используя окислительную модель формирования скрытых изображений в пленках хрома, например, дефекты в кольцевых структурах на стыке начала и конца оборота в «стартстопном» режиме записи (в некото-

рых работах его называют режимом кольцевых треков) (рис. 1) или различия в ровности передней и задней кромок штрихов при записи радиальных структур (лимбов, шкал и других).

В работе [8] для устранения разрывов на стыке треков предложено использовать разброс начала записи треков по случайному закону. В этой же ситуации зачастую используют режим записи по спирали.

В обоих случаях предложенные решения не устраняют данный эффект, а только скрывают его наличие. Еще более сложно разработать, не зная особенностей механизма записи, адекватные меры, надежно устраняющие различия в ровности обоих краев радиальных линий, хотя эмпирически удается подбирать режимы записи, при которых этот недостаток существенно сглаживается.

С позиций практического использования данной технологии проблема устранения нежелательных эффектов по-прежнему актуальна.

1. Объяснение природы появления дефектов в топологии элементов на основе окислительной модели. Попытка дать объяснение природы дефектов в топологии элементов, синтезируемых на основе термохимической технологии, предпринята в работе [13]. Важнейшим отличием данной работы от [1, 5–8] является то, что в ней сделан особый акцент на пороговом характере процесса записи скрытых изображений в пленках хрома. Предложена пороговая модель механизма термохимической записи. На ее основе «проведены оценки искажений простейших дифракционных структур», отмечено различие процессов в пленках хрома при включении и выключении движущегося лазерного пучка. Как и в [1], в работе [13] утверждается, что «основной вклад в формирование изображений ... вносит тонкая пленка (толщиной 1–5 нм) из окислов хрома, которая образуется на поверхности пленки хрома под действием нагрева, инициированного лазерным излучением, а также физико-химических изменений в самой пленке». К сожалению, в этой работе не определены эти самые физико-химические изменения и их природа и не дана трактовка эффекта появления порогового механизма в окислительных процессах. Следует отметить, что из выражения (4) в [13] для температурного распределения вдоль центра записанного трека не следует вывод о том, что координата конца трека должна всегда находиться после координаты, соответствующей выключению излучения. Данное замечание уместно проиллюстрировать диаграммой изменения температурного распределения

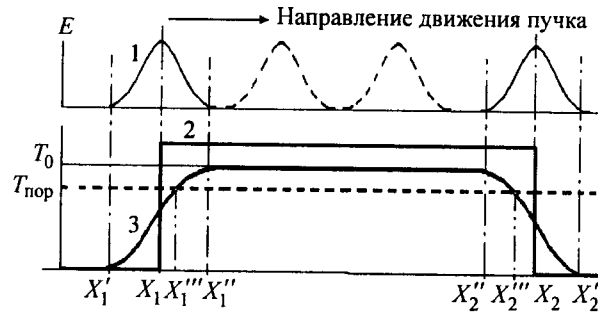


Рис. 2. Диаграммы процесса формирования скрытого изображения: распределение энергии в пучке E (кривая 1), форма импульса управления (кривая 2), распределение температуры пленки вдоль направления движения пучка (кривая 3)

(рис. 2). Переходные режимы в диаграмме связаны с моментами включения и выключения излучения и занимают интервалы от X_1' до X_1'' при включении излучения и от X_2'' до X_2' при выключении. Сами моменты включения и выключения, представленные координатами X_1 и X_2 соответственно, приходятся на середины этих интервалов. Ширина же интервалов зависит от выбранного значения мощности излучения в пучке. Согласно данной модели координаты X_1''' и X_2''' (положение начала и конца записанного трека) определяются выбранным уровнем порогового значения $T_{\text{пор}}$ и в принципе могут располагаться как между координатами X_1 и X_2 , так и вне их.

Еще одно замечание. На практике при записи структур для каждого радиуса r определяют $E_{\text{отт}}(r)$ – мощность, при которой параметры следа (прежде всего, его ширина) воспроизводятся с заданной точностью на всем поле записи. Если подставить это значение в выражение (4) из работы [13] для температурного распределения, то нормированной энергии излучения на текущую линейную скорость будет соответствовать одинаковый отклик материала, в то время как на практике форма начала и конца записываемых треков получается разной на разных радиусах записи. Следовательно, учета только пороговых свойств процесса взаимодействия явно недостаточно для адекватного описания реального механизма записи.

2. Феноменологическая модель механизма записи скрытых изображений в пленках хрома на основе фазовых переходов (взрывной рекристаллизации). Для создания адекватной модели записи рассмотрим другую модель механизма записи скрытых изображений в пленках хрома.

Предположим, что в основе механизма записи скрытых изображений в пленках хрома лежит процесс рекристаллизации пленок в ходе лазерного отжига. Для этого процесса характерны и четко выраженные пороговые механизмы плавления и кристаллизации, и наличие аддитивного, зависящего только от свойств пленки, процесса распространения фронта кристаллизации, и присутствие значительных нелинейностей в процессах поглощения и испускания тепла.

Для обоснования выдвинутой гипотезы проанализируем процесс образования характерных дефектов, которые, как уже отмечалось в [13], возникают из-за различий в отклике материала пленки на воздействие лазерного излучения при его подаче на пленку и выключении. Различия в форме начала и конца следа взаимодействия, изменения реальных размеров следа и положения краев следа относительно моментов подачи управляющих воздействий будут основным объектом исследования в данной работе.

2.1. *Объект исследования.* Для исследований используются тестовые изображения (тесты) (рис. 3), которые представляют собой дуплеты из двух серий коротких дуг. Линейные размеры дуг 10 мкм, период следования 20 мкм. Тесты записаны в пленках хрома толщиной порядка 80–100 нм при скорости вращения 10 об./с на радиусах 63 и 1 мм и при различных уровнях подводимой к пленке мощности лазерного излучения.

В каждом дуплете дуги второй серии записаны относительно дуг первой серии со сдвигом в тангенциальном направлении на половину периода следования, а в радиальном направлении на величину порядка 1 мкм. Мощность лазерного излучения изменялась от максимально допустимой, когда в центральных зонах следа взаимодействия начинали появляться следы повреждения поверхности, до минимальной, когда после селективного травления еще наблюдается более или менее устойчивый след взаимодействия.

Выделим основные особенности этих тестов. На большинстве записей, выполненных на радиусе 63 мм (рис. 3, *a*), хорошо просматриваются асимметрия дуг в окрестностях фронтов включения и выключения и наличие разрывов между концами дуг первой серии и началом дуг второй серии. Асимметрия состоит в том, что в области включения светового импульса след взаимодействия более обострен, чем в области выключения. Углы между касательными к «скулам» обострений для тестов с разной мощностью несколько отличаются, но в основном они лежат между 40 и 60°. Один из увеличенных фрагментов приведен на рис. 3, *c*. Величина разрывов на тестах, записанных на радиусе 63 мм, растет по мере убывания мощности. Для определения первопричины роста величины разрывов проведены три линии: линия 1 – вдоль оси дуг и совпадает с направлением движения пленки, 2 – через конечные точки дуг первой серии и 3 – через начальные точки дуг второй серии. При этом оказывается, что между линиями 1 и 2 образуется прямой угол, в то время как между линиями 1 и 3 образуется угол, отличающийся от прямого

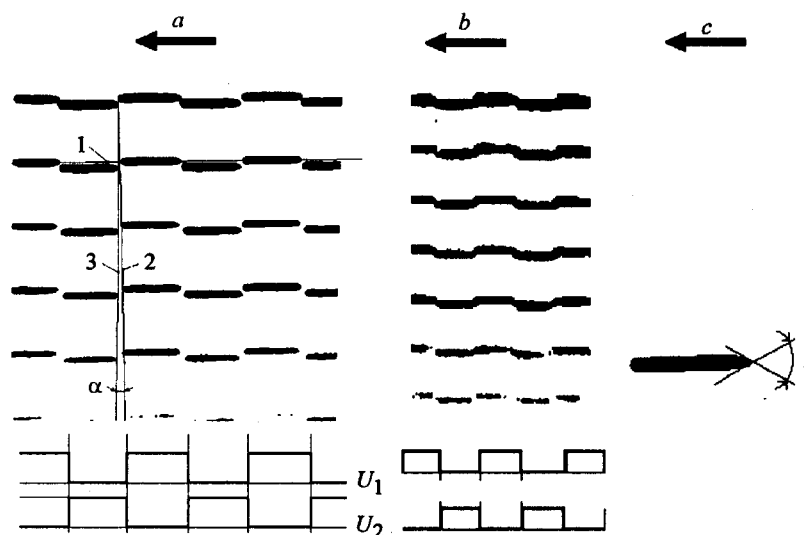


Рис. 3. Микрофотографии тестов в виде дуплетов из коротких дуг: записи на радиусе 63 мм (*a*); записи на радиусе 1 мм (*b*); оценка угла заострения (*c*). U_1 и U_2 – сигналы управления включением и выключением записывающего пучка соответственно. Стрелками обозначено направление движения лазерного пучка относительно пленки хрома

на α . Согласно программе записи тестов фронты выключения световых импульсов первой серии и фронты включения импульсов второй серии в пространстве привязаны к одной и той же координате (см. эпюры соответствующих управляющих напряжений U_1 и U_2 на рис. 3, *a, b*), поэтому линии 2 и 3 должны были совпадать между собой, т. е. иметь прямой угол с линией 1. И так как это не выполняется только для второй пары линий, то можно утверждать, что на данных записях именно передние концы дуг второй серии смещены в пространстве относительно координаты подачи сигнала начала записи, причем величина этого смещения переменна и зависит от уровня подводимой мощности. Задние же концы дуг первой серии при изменении уровня подводимой мощности излучения не имеют смещения в пространстве относительно координаты подачи сигнала выключения светового импульса.

В записях, выполненных на радиусе 1 мм (см. рис. 3, *b*), эффект асимметрии практически незаметен и нет разрывов между началами и концами дуг первой и второй серий.

Различие в отклике материала пленки на разных радиусах записи (при постоянной скорости вращения образца) нетрудно связать с разной линейной скоростью движения пленки (3,8 м/с на радиусе 63 мм и 0,06 м/с на радиусе 1 мм).

2.2. Модель фазовых переходов (взрывной рекристаллизации). Известно, что при воздействии на пленки интенсивного лазерного излучения кроме окислительных процессов в них происходит так называемый лазерный отжиг [14], под которым в широком смысле понимают структурные изменения, возникающие в полупроводниках, металлах и диэлектриках, под действием как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения. Когда интенсивность импульсного лазерного излучения велика ($\sim 10^6 - 10^{12}$ Вт/см²), в слое, поглотившем это излучение, происходят быстрые (в нано-, пико- и даже субпикосекундном масштабах времени) фазовые превращения (плавление–отвердевание) и фазовые переходы (аморфное тело–кристалл и кристалл–аморфное тело). Эти процессы ведут к структурным превращениям в пленках, например к восстановлению регулярной кристаллической структуры.

Хромовые пленки, как и другие, напыленные в вакууме, «... содержат много дефектов (типа вакансий и избыточных атомов) и поэтому находятся в состоянии неустойчивого равновесия. ... Воздействие лазерного излучения на пленку хрома приводит к изменению ее структуры» [4]. В зависимости от плотности энергии импульса W , его длительности $\tau_{\text{имп}}$ (в случае использования импульсных лазеров) или скорости сканирования (для непрерывных лазеров) выделяют два режима лазерного отжига: импульсный, при котором $T_{\text{отж}} > T_{\text{пл}}$, и непрерывный, при котором $T_{\text{отж}} < T_{\text{пл}}$ (здесь $T_{\text{отж}}$ – температура отжига, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления вещества пленки). Один из наиболее важных факторов, определяющих характер отвердевания расплава при лазерном отжиге, – это $v_{\text{кр}}$ (скорость движения фронта раздела жидкой и твердой фаз).

Интересным физическим эффектом, связанным с изменением структуры решетки при лазерном отжиге, является взрывная кристаллизация [15, 16]. В этих работах явление взрывной кристаллизации достаточно подробно исследовано на примере аморфных пленок кремния. Кремний в аморфном и кристаллическом состояниях обладает рядом отличий. Так, температура плавления кремния в аморфной фазе составляет (по разным источникам) от 925 до 1240 °С, а в кристаллической – от 1410 до 1420 °С. При нагреве аморфного кремния выше температуры плавления он переходит в жидкую фазу, темпе-

ратура которой оказывается ниже температуры его плавления в кристаллической фазе. В результате жидкая фаза оказывается сильно переохлажденной и быстро переходит в кристаллическую. Фактически процесс преобразования аморфного состояния в кристаллическое происходит в твердой фазе. Известно, что кристаллизация жидкой фазы – экзотермический процесс, а плавление – эндотермический. В данном случае возникает ситуация, когда количество тепла, поглощаемого при плавлении аморфной фазы, оказывается меньшим количества тепла, выделяемого при кристаллизации. Следовательно, происходит дополнительный разогрев и плавление пленки, в результате чего кристаллизация аморфной фазы, однажды начавшись, может далее протекать самостоятельно. При наличии внешнего постоянного притока энергии процесс рекристаллизации резко нарастает. Такой процесс рассматривают как взрывную неустойчивость. Это явление и получило название «взрывной кристаллизации», которое может протекать со скоростью порядка 1 м/с и выше. В целом процесс чувствителен к тепловым потерям и требует предварительного разогрева образца, прежде чем фронт кристаллизации начнет распространяться самопроизвольно.

Применим явление взрывной кристаллизации для апробирования другой возможной модели механизма записи скрытых изображений в напыленных пленках хрома.

Цикл «расплав–кристаллизация» при воздействии лазерного излучения может начаться с расплава пленки в аморфном состоянии в малой круговой области вблизи центра пучка (рис. 4). Переход в кристаллическое состояние будет сопровождаться дополнительным подогревом участка пленки вокруг зоны максимума плотности мощности лазерного пучка. Суммарное действие двух процессов увеличивает зону расплавления. Перемещение приводит к тому, что условия для увеличенной зоны расплавления и кристаллизации возникают в новой области пленки. В свою очередь, в этой области происходит увеличение количества выделяющегося тепла, что способствует расширению зоны расплава. Новое перемещение слоя способствует еще большему расширению следа взаимодействия. Процесс нарастания ширины зоны расплава увеличивается лавинообразно и остановится на некотором значении $d_{сл}$, когда количество выделяемой скрытой теплоты кристаллизации уравновесится соответствующим уменьшением плотности энергии на краях зон поперечного сечения пучка. Процесс кристаллизации характеризуется сравнительно малыми скоростями движения фронта раздела жидкой и твердой фаз (например, для пленок кремния $v_{кр} \geq 1$ м/с). В результате при скоростях ли-

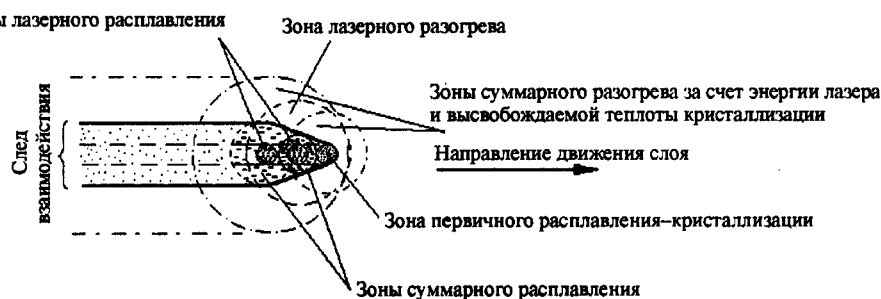


Рис. 4. Схема формирования следа взаимодействия, учитывающая эффект взрывной кристаллизации

нейного перемещения регистрирующего слоя, соизмеримых с $v_{кр}$, в конфигурации следа взаимодействия отобразятся и первоначальная инициализация процесса рекристаллизации, и процесс нарастания ширины следа взаимодействия, и последующая ее стабилизация на некотором установившемся значении $d_{сл}$ (см. рис. 4). В принципе для скорости вращения подложки с пленкой хрома, равной 10 об./с, переходный процесс нарастания ширины следа должен устойчиво отображаться при записях структур на радиусах, больших 20 мм. По этой причине тесты, записанные на радиусе 63 мм (см. рис. 3, а), можно попытаться использовать для оценки скорости движения фронта кристаллизации в хромовых пленках. Воспользуемся измерениями значений угла β (угла между касательными к «скулам» обострений), которые, как уже отмечалось, лежат в интервале $40-60^\circ$. Скорость движения фронта $v_{фр}$ оценим из следующего соотношения:

$$v_{фр} = v_{сл} \operatorname{tg}(\beta/2),$$

где $v_{сл} = 3,8$ м/с (линейная скорость движения пленки на радиусе 63 мм при скорости вращения 10 об./с). Для указанных выше значений β скорость движения фронта кристаллизации хрома принимает значения порядка 1,3–2,2 м/с.

При выключении лазерного излучения процесс рекристаллизации должен обрываться сразу же после подачи сигнала на выключение (так как процесс очень критичен к тепловым потерям). Тогда положение конца следа будет сдвинуто на $+d_{сл}/2$ относительно координаты подачи сигнала выключения, и этот сдвиг будет постоянным.

Совсем иначе обстоит дело с положением передней границы следа. Здесь выделяются два независимых процесса: первичная инициализация и взрывная рекристаллизация.

Первичная инициализация связана с появлением локального (лазерного) расплавления очень ограниченной области пленки, лежащей в центре пучка, после включения излучения и подведения к пленке определенной дозы тепла. Конкретное значение этой дозы связано с многими параметрами, в том числе с теплоемкостью пленки, ее толщиной и теплопроводностью, теплоемкостью и теплопроводностью подложки, на которую напылена пленка. Поставим ей в соответствие параметр $E_{пл}$ – энергию излучения, при которой происходит локальное расплавление пленки (рис. 5, линия 1). В зависимости от значения подводимой энергии света и с учетом гауссова распределения плотности мощности излучения в поперечном сечении пучка положение передней границы зоны первичного расплавления варьируется в широких пределах. Распределение тепловой энергии $E(l)$ в соответствующих точках поверхности пленки в сечении пучка на рис. 5 представлено кривой 2. Тогда, если $E_{\max}(l) < E_{пл}$ (рис. 5, а), зона расплавления вообще отсутствует. При $E_{\max}(l) = E_{пл}$ (рис. 5, б) возникает зона минимальной ширины $d_{сл, \min}$, а смещение передней границы этой зоны относительно координаты включения светового импульса ($x = 0$) достигает максимального значения (см. рис. 5, б, линия 3). При дальнейшем росте $E_{\max}(l)$ относительно $E_{пл}$ следует ожидать увеличения ширины первичного расплавления и уменьшения величины смещения передней границы зоны относительно момента подачи импульса света (рис. 5, с). И, наконец, при $E_{\max}(l) \gg E_{пл}$ (рис. 5, д) положение передней границы этой зоны даже опережает истинную координату подачи импульса включения.

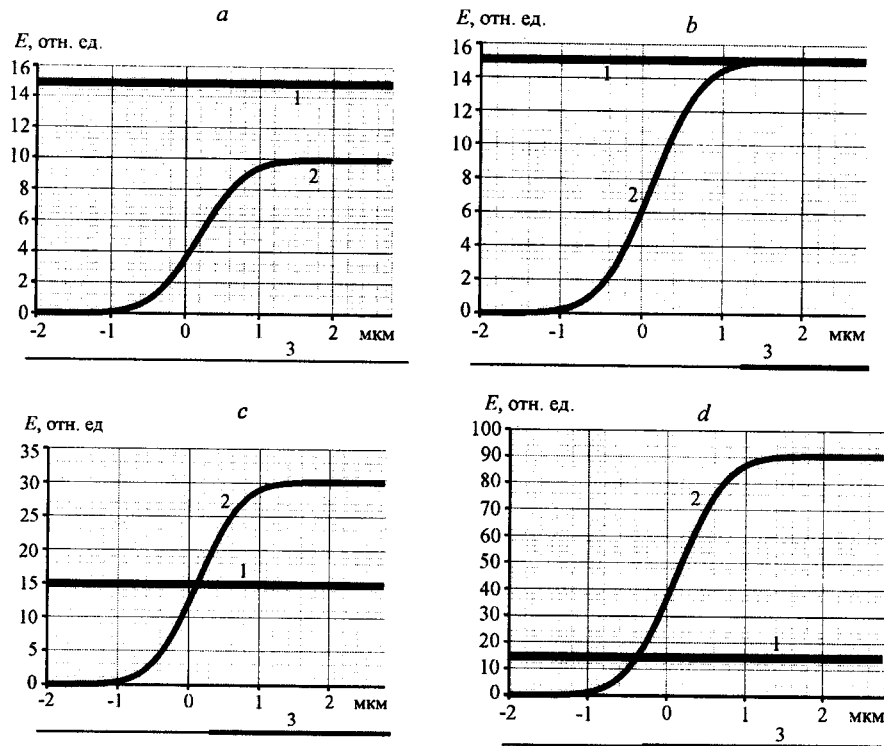


Рис. 5. Формирование передней границы следа взаимодействия: уровень энергии плавления пленки $E_{пл}$ (линия 1); кривая распределения тепловой энергии $E(I)$, поглощенной в сечении пучка (2); след взаимодействия (3)

В последнем случае разогрев пленки в центре пучка, как правило, превышает порог расплавления кристаллической фазы. Пленка здесь находится в жидком состоянии и вначале за счет сил поверхностного натяжения, а затем за счет энергии паровой фазы происходит деформация поверхности пленки. Эти процессы хорошо видны в ходе тестирования материала пленки, когда текущий уровень подводимой энергии излучения много больше $E_{опт}$ — энергии, которая используется для записи структур. Как показала практика, для большинства пленок $E_{опт} = (0,7 - 0,85)E_{пл}$. Этому значению подводимой энергии излучения соответствует диаграмма, в которой центр зоны расплавления смещен по ходу движения пленки относительно координаты подачи сигнала включения (см. рис. 5, c). Положение же переднего края результирующего следа взаимодействия целиком определяется соотношением $v_{пл}$ и $v_{фр}$, где $v_{пл}$ — скорость движения пленки, а $v_{фр}$ — скорость движения фронта кристаллизации. Так, если $v_{пл} > v_{фр}$, то передняя граница зоны дополнительного разогрева находится внутри зоны первоначального разогрева и передняя граница результирующего следа совпадает с передней границей зоны лазерного расплавления. Если же $v_{пл} < v_{фр}$, то передняя граница зоны дополнительного разогрева выйдет (спереди) за пределы зоны первоначального разогрева и, как следствие, передняя граница результирующего следа сместится в направлении, противоположном движению пленки. При $v_{пл} \ll v_{фр}$ возможна ситуация, когда передняя граница результирующего следа будет

располагаться левее X_1 – координаты момента включения излучения (при $E = E_{\text{отг}}!$).

Итак, применение явления взрывной кристаллизации в процессе записи скрытых изображений в пленках хрома дает вполне правдоподобное описание развития процессов, происходящих при взаимодействии мощного излучения с данными пленками. Для этого явления характерны явно выраженные пороговые характеристики (температура плавления и отвердевания аморфной и кристаллической фаз), наличие составляющей (скорость движения фронта раздела жидкой и твердой фаз), аддитивно входящей в процесс формирования следа взаимодействия. Их учет позволяет объяснить, во-первых, регистрируемые на практике различия формы обоих концов следа взаимодействия, соответствующих включению и выключению светового импульса при движении регистрирующего слоя; во-вторых, вариацию в широких пределах положения переднего края следа взаимодействия (фронта включения) относительно координаты подачи сигнала управления; в-третьих, стабильность заднего края следа взаимодействия (фронта выключения). Количественные оценки, вытекающие из данной модели, неплохо согласуются с результатами экспериментов по записи серии тестов в пленках хрома.

Это позволяет сформулировать тезис о том, что доминирующим процессом при записи скрытых изображений в пленках хрома является рекристаллизация.

Косвенным подтверждением приоритетности процесса рекристаллизации является процедура выбора оптимального уровня мощности записи, выработанная эмпирически в ходе многолетних применений технологии и положенная в основу Инструкции по эксплуатации установок типа CLWS-300/С [8, 17]. Согласно этой процедуре для установленной скорости вращения шпинделя и выбранных радиальных границ поля записи определяют критический уровень мощности, при котором начинается повреждение поверхности слоя хрома из-за плавления и испарения материала, а затем устанавливают значение мощности на 25–30 % меньше критического, которое и используют для расчета функции управления мощностью при записи. Этим практическим рекомендациям можно поставить в соответствие вполне определенный физический факт: температура плавления пленки металла, находящегося в аморфной фазе, на 15–30 % ниже, чем температура плавления пленки металла, находящегося в кристаллической фазе.

Утверждение о приоритетности процесса рекристаллизации можно рассматривать в качестве рабочей гипотезы, которая, естественно, требует экспериментального подтверждения, на основе чего может быть создана новая физическая модель механизма записи скрытых изображений в пленках хрома. Такая модель позволит более точно учитывать специфику процесса записи. В конечном счете это должно повысить точность изготовления элементов топологии с произвольной ориентацией до уровня ДОЭ с осевой симметрией, для которых, как указывалось ранее, удается достичь высокой точности формирования волновых фронтов.

Заключение. Рассмотрена феноменологическая модель механизма записи скрытых изображений в пленках хрома, в основу которой положено явление взрывной кристаллизации. Использование этой модели записи изображений, осуществляемой с помощью лазерных генераторов изображений типа CLWS-300/С, позволяет описать появление различий в форме переднего и заднего края следа взаимодействия излучения и пленки при ее движении, объяснить изменение положения переднего края следа в широких пре-

делах относительно угловой координаты, соответствующей моменту подачи сигнала включения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома // Квантовая электроника. 1985. 12, № 4.
2. Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. Н., Никитин М. И. Термохимическое действие лазерного излучения // ДАН СССР. 1973. 208, № 3. С. 587.
3. Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. Н. Окисление тонких пленок хрома при нагревании импульсным лазерным излучением // Электронная техника. Сер. 3. 1974. Вып. 4. С. 48.
4. Вейко В. П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986.
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, вып. 3. С. 144.
6. Ведерников В. М., Кирьянов В. П., Корольков В. П. и др. Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков. Новосибирск, 1986. С. 39. (Препр. /СО АН СССР. ИАиЭ: 319).
7. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автометрия, 1998. № 6. С. 5.
8. 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.
9. Kiryanov V. P. Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution // Proc. SPIE. 1997. 3091. P. 66.
10. Cherkashin V. A., Churin E. G., Kiryanov V. P. et al. Circular laser writing system – CLWS-300/C // Topical Meeting Digests Series. 1997. 12. P. 222.
11. Анциферов А. П., Ведерников В. М., Кирьянов В. П. и др. Специализированный лазерный генератор изображений для синтеза прецизионных фотошаблонов оптических элементов с произвольной топологией // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 13.
12. Poleshchuk A. G., Koronkevich V. P., Kiryanov 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.
13. Полещук А. Г. Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // Автометрия. 2003. 39, № 6. С. 39.
14. Маркевич М. И., Чапланов А. М., Подольцев А. С. Окисление тонких металлических пленок многоимпульсным лазерным нагревом // Материалы, технологии, инструменты. 2001. 6, № 2. С. 88.
15. Gilmer G. H., Leamy H. J. Laser and Electron Beam Processing of Materials. N. Y.: Academic Press, 1980.
16. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками /Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона. М.: Машиностроение, 1987.
17. Инструкция по эксплуатации установки CLWS-300/C. Новосибирск: КТИ НПО СО РАН, 2001.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: kiryanov@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
8 августа 2003 г.*