

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОПОРОГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК ХРОМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2011 г. В. П. Вейко, доктор техн. наук; М. В. Ярчук; А. И. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: vadim.veiko@mail.ru, chukforyou@ya.ru

Рассмотрен термохимический метод записи информации, основанный на локальном лазерном окислении тонких пленок хрома, с последующим травлением необлученной области. Этот способ является альтернативой лазерной фотолитографии и прямому лазерному удалению пленки хрома. Он применяется в основном для изготовления дифракционных оптических элементов. В термохимическом способе записи информации отсутствуют термические и гидродинамические искажения рисунка, как при лазерной абляции, а количество технологических операций существенно меньше, чем в фотолитографии. В настоящее время дифракционные оптические элементы используются в больших телескопах, матрицах микролинз, лазерной оптике и т. д. Основным требованием ко всем типам дифракционных оптических элементов является высокое пространственное разрешение. Поиск методов повышения разрешения дифракционных оптических элементов является основной мотивацией исследования структуры облученных пленок хрома.

Ключевые слова: модификация поверхности, тонкие пленки хрома, оксиды хрома, фемтосекундные лазерные импульсы.

Коды OCIS: 310.6628, 310.6860

Поступила в редакцию 14.02.2011

Введение

Тонкие металлические пленки широко применяются при изготовлении оптических носителей информации абсолютного контраста, таких как фотошаблоны интегральных схем (ФШ), дифракционные оптические элементы (ДОЭ), оптические диски (ОД) и т. п. Наиболее популярным материалом пленок для записи информации является хром благодаря его хорошей адгезии к стеклянной подложке и прочности к истиранию. При этом в каждой области применения сложились свои предпочтения по методам формирования топологии на упомянутых изделиях. В микроэлектронике наиболее распространенным методом является фотолитография по причине своей точности и стабильности. Популярным методом при изготовлении ОД является лазерная абляция из-за своей простоты и достаточной точности при записи в фокальной плоскости. Иная ситуация складывается в технологии изготовления ДОЭ. Здесь необходимо часто

менять конфигурацию и размеры элементов, каждый из которых может быть уникальным, обеспечивая их особо высокую точность, так как дальнейшие применения в сложных оптических трактах выявляют их малейшие погрешности.

ДОЭ широко используются в различных устройствах, таких как принтеры, аппараты для чтения штрих-кодов и т. д. Новые виды ДОЭ применяются в технологических системах, лазерных скальпелях, искусственных хрусталиках глаза и т. д. Точность изготовления ДОЭ с каждым годом растет, что позволяет решать уникальные проблемы, например, создание волновых корректоров для контроля асферической оптики основного зеркала больших современных телескопов [1]. Создание ДОЭ с предельным разрешением в настоящее время является весьма актуальной проблемой, так как это позволяет ставить и решать задачи совершенно нового уровня, такие, как контроль глубокой асферики, ВУФ и рентгеновская оптика и т. д.

В этих условиях особое место занял термохимический метод (ТМ) записи изображений ДОЭ. Он основан на лазерном облучении пленок хрома в доиспарительных режимах, когда металл в облученной зоне окисляется и приобретает высокую устойчивость к растворению по сравнению с исходными пленками хрома [2]. Такой способ записи оптических изображений намного проще фотолитографии и значительно точнее лазерной абляции. Термохимический метод приобрел большую известность после разработки кольцевого генератора изображений, который оказался способным реализовать потенциально высокую точность ТМ при изготовлении ДОЭ [3]. Исследование термохимического воздействия лазерного излучения, а также близких по механизму воздействия электронных и ионных пучков и даже зондов атомно-силового микроскопа на тонкие пленки хрома посвящены работы [4–6].

Однако предел разрешающей способности термохимического метода записи информации до сих пор не выяснен. Понятно, что при этом надо рассматривать две группы процессов: оптические процессы локализации лазерного излучения и физико-химические процессы переноса изображения на материал пленки хрома.

Основной целью данного исследования явилось изучение физических и химических процессов в тонких металлических пленках, ограничивающих пространственное разрешение при наноструктурировании хрома.

Объект и методы исследования

Облучение тонких пленок хрома (ТПХ) производили на установке с использованием лазера *TIF-100-F4*. Лазер генерировал излучение на длине волны 810 нм при частоте следования импульсов 80 МГц. Длительность отдельного импульса составляла 100 фс, средняя мощность излучения 250 мВт. Излучение фокусировалось при помощи оптической системы в пятно диаметром $d = 10$ мкм. Данный лазер можно считать квазинепрерывным, так как несмотря на заявленную длительность импульса 1×10^{-13} с, суммарное время воздействия на ТПХ в фокальном пятне составляет от $3,2 \times 10^{-7}$ до $2,9 \times 10^{-8}$ с, в зависимости от скорости сканирования. В качестве образцов использовали пленки хрома толщиной 80 нм, нанесенные на стекло методом магнетронного распыления. С помощью координатного стола на поверх-

ности образца были проведены 5 линий с различным временем экспозиции (т. е. с различной энергией облучения) – от минимального до максимального. Среднее количество импульсов в фокальном пятне в первой и последней линиях отличалось в 11 раз: от $2,9 \times 10^5$ импульсов (минимальное количество – пятая линия) до $3,2 \times 10^6$ импульсов (максимальное количество – первая линия). Облучение проводилось как в нормальных условиях, так и в вакууме, для исключения взаимодействия с атмосферными газами.

В результате кратковременного лазерного воздействия облученные области приобретали большую устойчивость к химическому растворению, чем исходные. При этом были получены зоны с различным коэффициентом селективности (отношение скоростей травления экспонированной и неэкспонированной пленки) от $k_{\text{сел}} = 1,3$ – у пятой линии, облученной с минимальным временем экспозиции, до $k_{\text{сел}} > 5$ – у первой линии при максимальном времени экспозиции.

Для выявления структуры облученного хрома было проведено травление образца с различным временем (рис. 1). Травление указанных на рис. 1 областей 1–4 велоось 6, 8 и 12 мин соответственно, в смеси водных растворов $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ и NaOH [7].

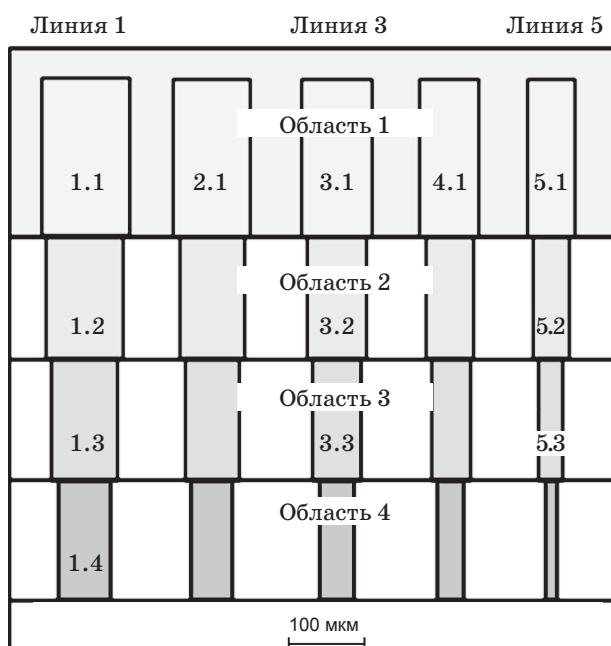


Рис. 1. Образец для исследования структуры хрома. Область 1 – до травления, области 2, 3 и 4 – после травления в течение 6, 8 и 12 мин соответственно.

Для изучения результатов воздействия лазерных фемтосекундных импульсов было использовано и методически отработано несколько методов исследования химического состава и структуры облученных пленок хрома.

1. Микро-рамановская спектроскопия и электронная спектроскопия химического анализа (ЭСХА) применялись для изучения химического состава, т. е. идентификации термохимического воздействия. С помощью микро-рамановской спектроскопии были получены изменения интегральных интенсивностей полос комбинационного рассеяния (КР) при сканировании области возбуждения поперек полоски.

2. Для определения структурных изменений в пленках использовали метод малоугловой рентгеновской дифракции.

3. Геометрические размеры облученных участков, в том числе и толщину исходных и образующихся тонких пленок, контролировали сканирующей зондовой микроскопией (СЗМ).

4. Для идентификации модифицированных структур и измерения их геометрических размеров применяли оптическую микроскопию в отраженном свете.

5. Латеральная зондовая микроскопия, нематические жидкые кристаллы и ряд других методов и приемов были использованы для изучения структуры и идентификации облученных поверхностей.

Спектры комбинационного рассеяния были получены с использованием спектрометра микро-комбинационного рассеяния света (КР) "inVia Renishaw", в котором используется аргоновый лазер с длиной волны 514,5 нм. Условия всех измерений были следующими: мощность возбуждающего излучения на образце – 0,2 мВт, время накопления одного спектра составляло 2–3 мин.

Результаты экспериментов

Окисление пленок хрома.

Многочисленные исследования, проведенные ранее [2–4, 7], указывают на то, что основной причиной возникновения селективности при травлении хрома в нормальных условиях должно быть его окисление с образованием наиболее устойчивого из окислов Cr_2O_3 . Поэтому в начале исследования были предприняты попытки поиска соответствующих свидетельств наличия этого окисла. Наиболее подходящим для этой цели был признан метод микро-рамановской спектроскопии. В рамановском

спектре окислу Cr_2O_3 соответствует пик на 554 см^{-1} [8].

Спектр КР необлученной пленки хрома показал слабую асимметричную широкую полосу с максимумом на 660 см^{-1} (рис. 2а). При минимальном времени экспозиции (пятая линия), интенсивность пика на 660 см^{-1} увеличивается, а его ширина уменьшается (рис. 2б). Увеличение интенсивности пиков указывает на увеличение количества вещества (толщины пленки), а уменьшение ширины пика говорит об упорядочении структуры пленки.

С увеличением времени экспозиции (третья линия) метод микро-КР показал дальнейший рост интенсивности пика на 660 см^{-1} , а также появление в спектре пика на 554 см^{-1} (рис. 2в), характерного для оксида хрома Cr_2O_3 . С увеличением времени экспозиции, интенсивность пика на 554 см^{-1} , становится значительно больше интенсивности пика на 660 см^{-1} . При максимальном количестве импульсов (первая линия) (рис. 2г) полоса Cr_2O_3 полностью доминирует в спектре КР образца, в то время как полоса 660 см^{-1} либо чрезвычайно слаба, либо не наблюдается.

Сложность интерпретации пика на 660 см^{-1} методом рамановской спектроскопии (на пленках хрома ранее он не встречался) потребовала проведения ряда дополнительных исследований.

Образец был изучен методом рентгеноспектрального микронализа на растровом электронном микроскопе JEOL 7000F с рентгеноспектральным энергодисперсионным спектрометром. Для обеспечения проводимости на образец дополнительно был напылен тонкий слой углерода (~30 нм). Проводились измерения трех линий образца при двух энергиях электронного зонда – 8 и 15 кэВ. Результатом стало определение слабо облученной области (линии 5), как соответствующей соединению CrO_2 . Причем, исходя из полученных данных, при уменьшении глубины проникновения зонда увеличивалась концентрация кислорода. Это также указывает на поверхностный характер окисления хрома при многократном действии фемтосекундных импульсов.

Кроме того, наличие окисла CrO_2 было подтверждено рентгеновской дифрактометрией на приборе Bruker "Advance D8".

Полученные результаты показывают, что полоса 660 см^{-1} на необлученном хроме соответствует сильно разупорядоченному приповерхностному слою CrO_2 , который, по-види-

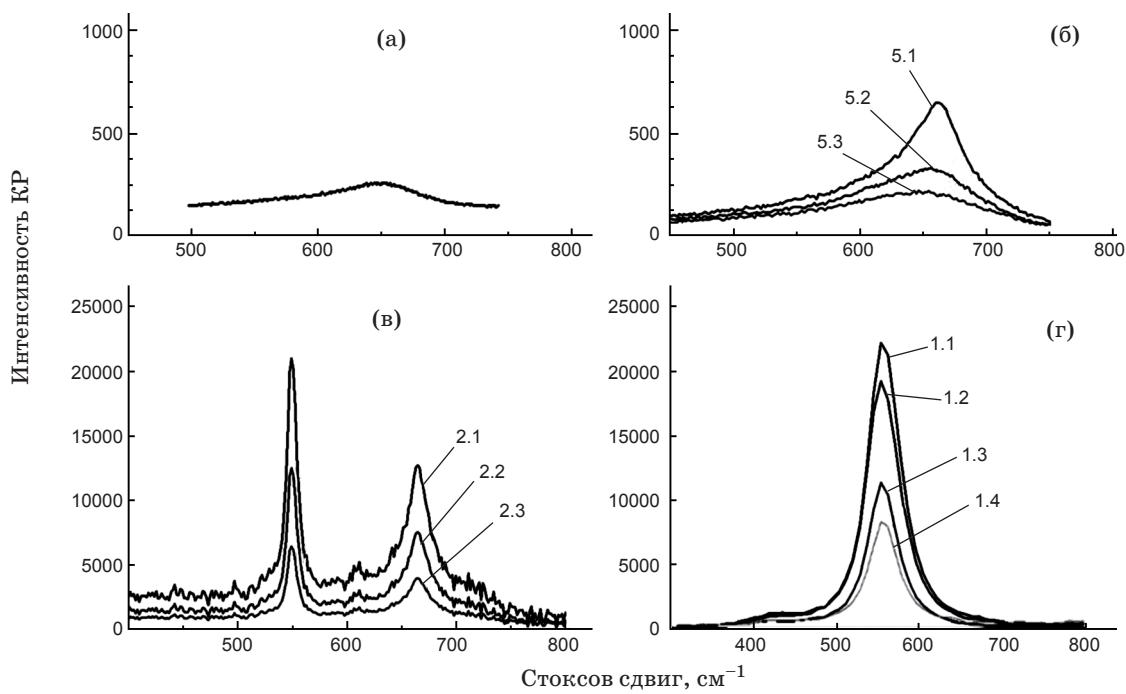


Рис. 2. Спектры микро-КР, полученные от исследуемых образцов (номера линий соответствуют номерам на рис. 1): а) пленка хрома до облучения лазером, содержит пик на 660 cm^{-1} (разупорядоченный CrO_2); б) 5 линия. Содержит пик 660 cm^{-1} (5.1 – CrO_2 до травления; 5.2 – CrO_2 , травление 4 мин; 5.3 – CrO_2 , травление 8 мин); в) 3 линия. Содержит два пика: 554 cm^{-1} (2.1 – Cr_2O_3 до травления; 2.2 – Cr_2O_3 , травление 4 мин; 2.3 – Cr_2O_3 , травление 8 мин); г) 1 линия. Содержит пик на 554 cm^{-1} (1.1 – Cr_2O_3 до травления; 1.2 – Cr_2O_3 травление 4 мин; 1.3 – Cr_2O_3 , травление 8 мин; 1.4 – Cr_2O_3 , травление 12 мин).

мому, не является сплошным, судя по скорости растворения, и образуется на воздухе при спонтанном окислении пленок хрома [9, 10]. С увеличением времени экспозиции и ростом температуры растет и упорядочивается пленка окисла CrO_2 , с $k_{\text{сел}}$ от 1,2 до 3. При дальнейшем увеличении количества фемтосекундных импульсов, попавших на образец, диоксид хрома разлагается до Cr_2O_3 , $k_{\text{сел}}$ которого лежит в пределах от 3 до 5. Степень устойчивости к травлению данных окислов тем больше, чем больше энергия облучения, т. е. чем дольше в нашем случае происходит облучение образца. Отметим, что для всех исследованных линий типична ситуация ослабления интенсивности пика КР в зависимости от того, как долго облученная область находилась в травителе, что говорит о поверхностном (в противовес объемному) характере окисления хрома.

Данные микро-КР также были применены для изучения топологии окисленного хрома. Была получена карта распределения окислов

хрома по поперечному сечению первой полоски (рис. 3а, б). В результате измерений было получено следующее распределение рамановских спектров по поперечному сечению полосы: в центре находится слой Cr_2O_3 , который, по мере снижения температуры существует вместе с CrO_2 . На краях полоски остается только CrO_2 . Такие результаты обусловлены разницей температур при облучении образца из-за гауссова распределения энергии в фокальном пятне лазера. Похожее изменение спектров микро-КР было получено при измерении линий, полученных при различных экспозициях (рис. 2).

Карта распределения окислов в пятой линии показывает изменение интенсивности отклика от CrO_2 (рис. 4а), однако атомно-силовая микроскопия изменения высоты окисла не показала (рис. 4б), при этом $k_{\text{сел}}$ облученных областей составляет более чем 1,3.

Необходимо отметить также тот важный факт, что на образцах, облученных в сверх-

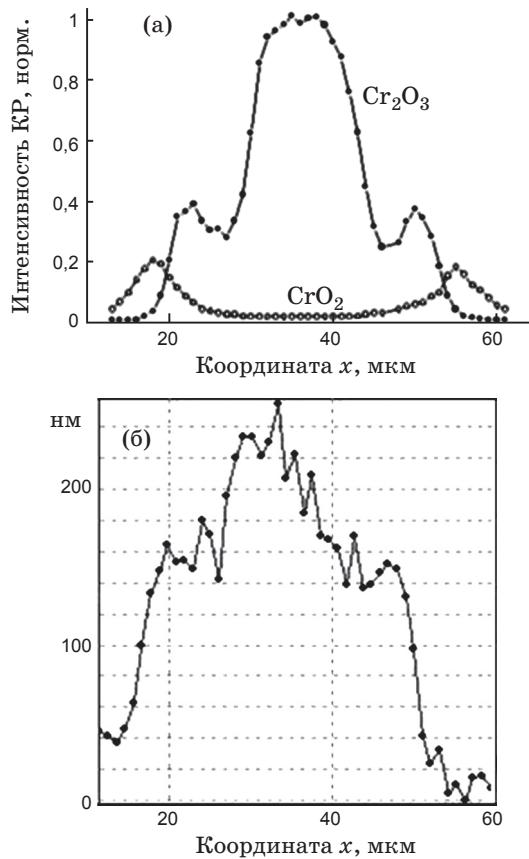


Рис. 3. Изменение интегральных интенсивностей полос КР Cr_2O_3 (554 см^{-1}) и CrO_2 (660 см^{-1}) при сканировании области возбуждения поперек первой линии образца (а), профиль того же участка полоски, полученный на АСМ (б).

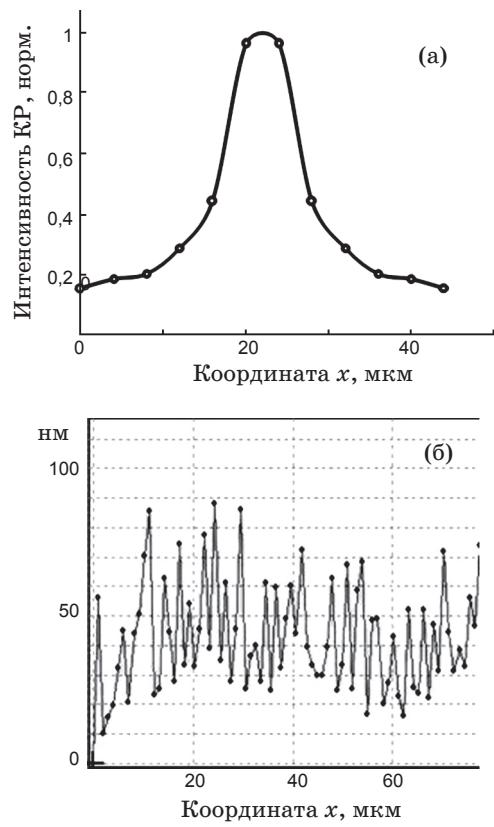


Рис. 4. Изменение интегральной интенсивности полосы КР CrO_2 ($\sim 660 \text{ см}^{-1}$) при сканировании области возбуждения поперек пятой полосы (а), профиль того же участка полоски, полученной на АСМ (б).

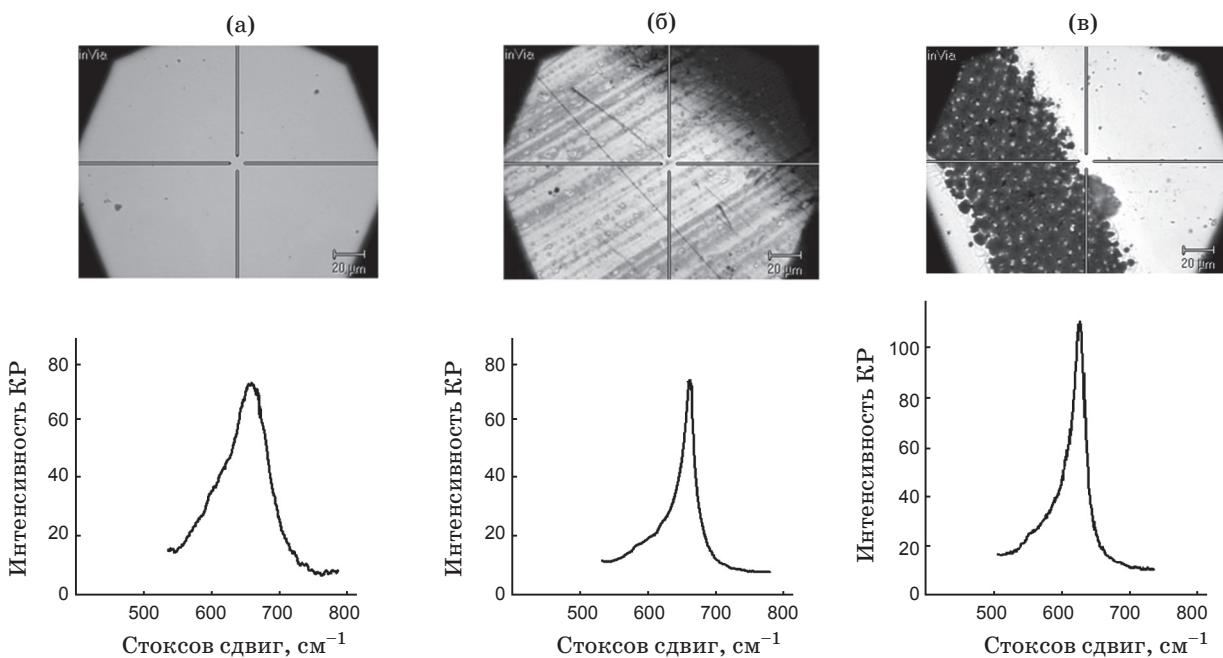


Рис. 5. необлученный хром и его раман-спектр (а); хром, облученный в сверхвысоком вакууме до температуры плавления и его раман-спектр (б); хром, полученный при температуре плавления и его раман-спектр (в).

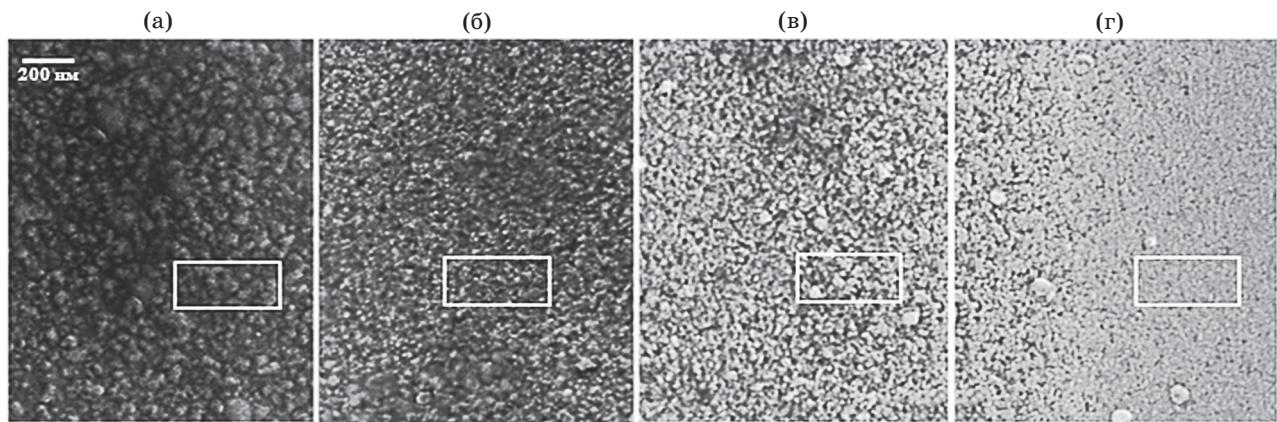


Рис. 6. Фотография участков пленки хрома, облученных гауссовым пучком излучения (а – край пучка, г – центр пучка) после травления. Виден рост числа кристаллитов на единицу площади из-за роста температуры облучения по мере смещения к центру пятна.

высоком вакууме (10^{-9} мм. рт. ст.), в зоне воздействия лазерного излучения был зарегистрирован только слабый пик на 660 cm^{-1} , характерный для необлученных пленок хрома (рис. 5а), однако существенно суженый (рис. 5б). Сужение пика говорит об упорядочении структуры вещества в зоне облучения. Никаких других пиков обнаружено не было, вплоть до режимов облучения, вызывающих абляцию хрома (рис. 5в). При этом $k_{\text{сел}}$ облученных областей был достаточен для выявления топологии облученных областей пленки травлением. Облучение в вакууме указывает на то, что, помимо окисления, достаточную ($k_{\text{сел}} > 1,2$) селективность травления обеспечивают его процессы, в качестве которых может выступать структурная модификация пленок хрома или его окисла (рис. 4, рис. 5б) [5].

Структурная модификация пленок хрома. Для наблюдения структурной модификации пленок хрома использовали метод электронной микроскопии. Измерения проводили на растровом электронном микроскопе *CrossBeam Neon 1040 Carl Zeiss*. Были получены 4 изображения поверхностной структуры пятой линии (рис. 1) после травления: от необлученного хрома (рис. 6а) до образования CrO_2 в середине линии, соответствующей центру фокального пятна с максимальной температурой (рис. 6г). Видно, что с ростом температуры лазерного нагрева увеличивается степень структурной модификации облученного хрома, в частности, растет число кристаллитов на единицу площади что, по-видимому, сопровожда-

ется образованием более напряженной структуры и приводит к повышению устойчивости пленки к травлению.

Измерения показали, что количество кристаллитов увеличивается от 32 до 450, на площади 300×150 нм. То есть, чем больше температура, тем меньше становится размер кристаллита. Минимальный размер кристаллита, полученный в центре линии, составляет 10–15 нм (рис. 6г). Вероятно, именно этот “размер зерна” и будет ограничивать разрешающую способность термохимического метода [12, 13].

Определение геометрических границ структурно модифицированных участков (СМУ), иначе говоря, областей, микро-КР которых дает пик на 660 cm^{-1} , до процедуры травления, является нетривиальной задачей. Ни методы оптической микроскопии, ни атомно-силовая микроскопия не позволяют определить границы облученных областей. Использование для этих целей микро-КР и электронной микроскопии не целесообразно. Поэтому нами был опробован метод латерально-силовой зондовой микроскопии, который позволяет различать области с различными коэффициентами трения. Игла АСМ сканирует образец, и, по отклонениям кантителевера в местах с различным коэффициентом трения, строит карту модифицированных участков (рис. 7а). На рис. 7б приведена фотография образца после травления.

Для определения геометрических границ термического профиля на ТПХ были сформированы области с минимальным $k_{\text{сел}}$. Облученные, но не протравленные элементы были

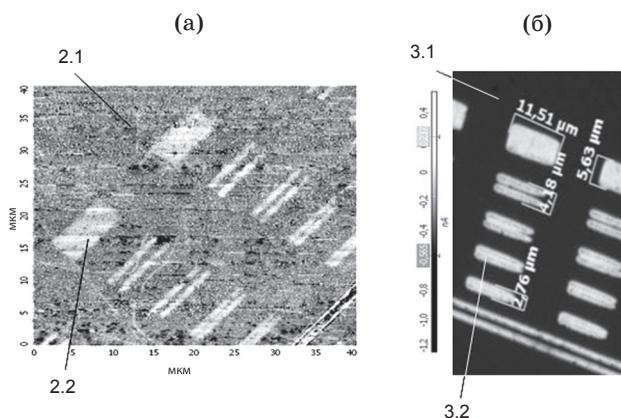


Рис. 7. Применение силовой зондовой микроскопии для выявления структуры облученных областей: а) изображение поверхности образца с областями, имеющими различный коэффициент трения, где 2.1 – необлученный хром, 2.2 – облученный хром; б) образец после травления, где 3.1 – стекло, 3.2 – облученный хром после травления.

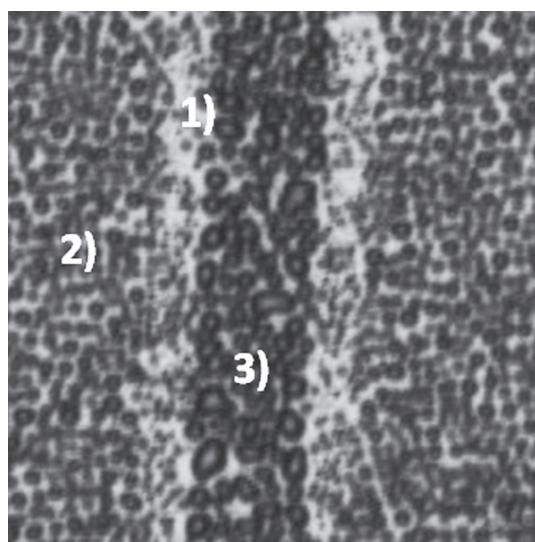


Рис. 8. Нанесение водяного пара на поверхность облученного хрома, 3 линия: 1) область, покрытая CrO_2 ; 2) необлученный хром; 3) область, покрытая Cr_2O_3 .

отсканированы с помощью атомно-силового микроскопа, работающего в режиме латеральной микроскопии. Результатом стала карта поверхности ТПХ (рис. 7б), где $k_{\text{тр}}$ светлых участков меньше, чем $k_{\text{тр}}$ темных участков.

Более простой, но менее точный метод определения границ СМУ – это нанесение водяного пара на поверхность (рис. 8). В областях, где хром слабо модифицирован (CrO_2), пар конденсируется в капли размером 5–15 мкм (рис. 8, область 1), чистый хром покрываеться каплями 15–25 мкм (рис. 8, область 2), а области с Cr_2O_3 – каплями более 30 мкм (рис. 8, область 3). Это позволяет визуально различать облученные участки на образце. Различная смачиваемость обработанных лазерным излучением ТПХ, по-видимому, зависит от изменения микроструктуры поверхности, что подтверждает различный размер кристаллитов в областях облучения при разной экспозиции.

Представляет также интерес способ визуализации неоднородностей структуры материала с использованием нематических жидкких кристаллов, наносимых тонким слоем на поверхность исследуемого образца [11] (рис. 9). При наблюдении в микроскоп с поляризационными фильтрами такой образец имеет различные коэффициенты пропускания света. Это связано с тем, что в местах изменения структуры материала жидкие кристаллы меняют свою поляризацию.

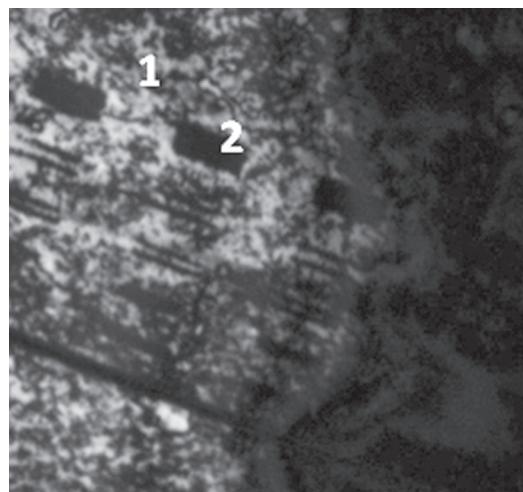


Рис. 9. Оптическая микроскопия в поляризованном свете с применением жидкких кристаллов. 1 – необлученный хром, 2 – область, содержащая CrO_2 .

Для контроля геометрических параметров (прежде всего высоты) структур до и после травления был использован метод атомно-силовой микроскопии. Было показано, что зона образования Cr_2O_3 (1–2 линия) по высоте превышает исходную толщину хрома в 2 раза. В этом случае устойчивость к травлению была максимальной. В областях с двумя пиками (3–4 линия) устойчивость к травлению средняя, высота области относительно исходной толщины хрома увеличивается в 1,5 раза. При минимальном количестве импульсов (5 ли-

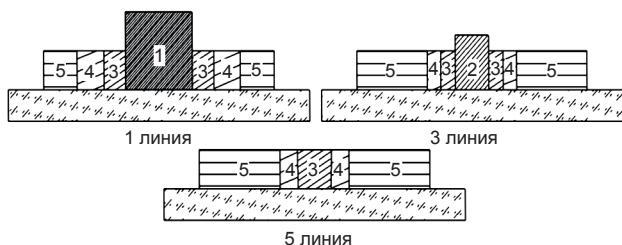


Рис. 10. Структура облученных пленок хрома в режимах до плавления (1, 3 и 5 линии на рис. 1), где 5 – необлученный хром, 4 – слабо модифицированный хром и оксид CrO_2 , 3 – сильно модифицированный хром и оксид CrO_2 , 2 – модифицированный хром с двумя рамановскими пиками: CrO_2 и Cr_2O_3 , 1 – расплав с образованием оксида Cr_2O_3 .

ния) – устойчивость к травлению наименьшая, но достаточная для выявления топологии облученной области и изготовления ДОЭ. Высота линии не изменяется по сравнению с исходной толщиной пленки. Определить наличие модифицированной области здесь возможно, применяя метод латеральной зондовой микроскопии. После 12 мин травления, область 4 (рис. 1), высота всех линий уменьшилась на $1/4$, тогда как ширина – более чем в 2 раза. Это происходит, по-видимому, вследствие гауссового распределения интенсивности в пятне лазера, приводящего к разной температуре облучения и, соответственно, к разной структуре облученной области по сечению пятна и различной скорости травления.

Полученные данные позволяют говорить о структуре облученных областей хрома, которая состоит из 4-х участков, обладающих различными физико-химическими свойствами (рис. 10).

Выводы

1. Проведено исследование структур, которые образуются в тонких пленках хрома при воздействии излучения квазинепрерывного фемтосекундного лазера. Для исследования структуры и состава облученных областей

были впервые использованы методы Раман-спектроскопии, рентгено-спектрального анализа, рентгеновской дифрактометрии. Для исследования свойств структурно модифицированных участков (СМУ) применялись методы электронной и сканирующей зондовой микроскопии. Для визуализации СМУ впервые были использованы методики на основе латеральной зондовой микроскопии, нематических жидких кристаллов и конденсации паров воды, а также оптическая микроскопия в поляризованном свете.

2. Показана возможность получения устойчивых к воздействию травителя структур на тонких пленках хрома под действием излучения квазинепрерывного фемтосекундного лазера как на воздухе (термохимический режим), так и в вакууме (режим структурной модификации).

3. Показано, что низкотороговый и малоинерционный режим структурной модификации хрома с образованием CrO_2 (5 линия) является наиболее перспективным для получения высокой разрешающей способности. Предел разрешающей способности при термохимической записи информации в низкотороговых малоинерционных режимах, по-видимому, будет определяться размерами кристаллитов оксида хрома, размер которых зависит от режимов напыления исходной пленки хрома и ее последующего лазерного отжига (модификации).

Авторы благодарят: Заморянскую М.В. за помощь в определении структуры образцов методом ЭСХА, Первухину М.С. за помощь при рентгенографическом исследовании структуры кристаллов облученного хрома, Левичева В.В. за помощь в исследовании поверхности образцов методами латеральной микроскопии, Юльметову О.С. за подготовку образцов для облучения в вакууме, Томилина М.Г. за предоставленную возможность измерения образцов с применением ЖК.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-02-01065а и государственным контрактом РФ ГК № П1134.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mallik C.V., Zehnder R., Burge J.H., Poleshchuk A.* Absolute calibration of null correctors using dual computer-generated holograms // Proc. of SPIE. V. 6721. P. 16.
2. *Вейко В.П., Котов Г.А., Либенсон М.Н., Никитин М.Н.* Термохимическое действие лазерного излучения // Доклады АН СССР. 1973. Т. 208. С. 587–590.

3. Koronkevich V.P., Kirianov V.P., Poleshchuk A.G. Fabrication of diffractive Optical elements by direct laser-writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. V. 2363. P. 290–297.
4. Stanoi D., Socol G., Grigorescu C., Guinneton F., Monnereau O., Tortet L., Zhang T., Mihailescu I.N. Chromium oxides thin films prepared and coated in situ with gold by pulsed laser deposition // Materials Science and Engineering 2005. V. 118. P. 74–78.
5. Корешев С.Н., Белых А.В., Ратушный В.П. Голографическая фотолитография на основе тонких пленок халькогенидного стеклообразного полупроводника // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 7. С. 80–85.
6. Новый метод нанолитографии. Электронный ресурс / Lenta.ru. Режим доступа: <http://www.lenta.ru/news/2007/09/10/nano/>.
7. Коронкевич В.П., Полещук А.Г., Чурин Е.Г., Юрлов Ю.И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 4. С. 755–761.
8. Baranov A.V., Bogdanov K.V., Fedorov A.V., Yarchuk M.V., Ivanov A.I., Veiko V.P., Berwick K. Micro-Raman characterization of laser-induced local thermo-oxidation of thin chromium films // J. Raman Spectroscopie, 2011. Web: <http://www.wileyonlinelibrary.com> DOI 10. V. 2920 (to be published).
9. Metev M., Savtchenko S., Stamenov K., Veiko V. Thermochemical action of laser radiatoin thin metal films // IEEE Journal of QE. 1981. V. 17. № 10. P. 2004–2007.
10. Фирстов С.А., Рогуль Т.Г. Теоретическая (предельная) твердость. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007. № 4. С. 100–114.
11. Томилин М.Г. Новый поляризационно-оптический микроскоп на основе жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света и его применения // Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. 115 с.
12. Вейко В.П., Дряхлушкин В.Ф., Вознесенский Н.Б. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия и ближнепольные оптические зонды: свойства, изготовление и контроль параметров // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 2. С. 193–203.
13. Betzig E., Trautman J.K., Harris T.D., Weiner J.S., Kostelak R.L. Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale // Science. 1991. V. 251. P. 1468.