

УДК 536:621.37

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЛЕНОК ХРОМА  
И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО  
ОКИСЛЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А.Н. Агафонов

Рассмотрены вопросы влияния параметров микроструктуры пленок хрома на результаты локального термохимического окисления под действием лазерного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и элементного состава пленок толщиной от 50 до 140 нм. Приведены результаты исследования лазерной записи по пленкам хрома с различным размером кристаллита. Проведено сравнение результатов численного моделирования и натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** термохимическое окисление, пленки хрома, кристаллит.

**Введение**

В настоящее время существует возрастающая потребность в изготовлении микро- и наноструктур различного функционального назначения. Одним из базовых технологических процессов их изготовления является фотолитография [1].

Существует ряд приложений, специфика которых не позволяет считать традиционные технологии получения фотосаблонов экономически целесообразными. Такая ситуация складывается в случае, когда требуется изготовить широкую номенклатуру элементов при штучном или мелкосерийном производстве, например, при изготовлении уникальных дифракционных оптических элементов (ДОО). Известен ряд методов формирования топологического изображения непосредственно в слое рабочего материала, без использования фоторезистов [2]. Они основаны на локальной обработке материала лазерным излучением, что позволяет снизить себестоимость изготовления микроструктур произвольной конфигурации. Одним из наиболее перспективных методов прямой записи является локальное термохимическое окисление пленок хрома под действием лазерного излучения [3]. Этот метод формирования микроструктур основан на локальном окислении тонких пленок хрома под действием лазерного излучения. Последующее жидкостное травление образца приводит к формированию микрорельефа за счет существенного различия скоростей травления хрома и его окисных форм.

Известные теоретические подходы [4, 5] к анализу кинетики термохимического окисления, стимулированного лазерным излучением, хорошо описывают процессы в относительно толстых (более 150 нм) пленках и базируются на следующих общих основных предположениях:

1. материал пленки хрома и оксидной пленки считается однородным;
2. основным фактором, лимитирующим окисление, является диффузия атмосферного кислорода в пленку хрома.

Использование перспективных, с точки зрения повышения разрешающей способности, тонких пленок хрома (менее 50 нм), вызывает необходимость более подробного исследования процессов окисления, в частности, учета влияния структуры пленки хрома и роли растворенного в ней кислорода.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров микроструктуры пленок хрома и растворенного в них кислорода на разрешающую способность технологии термохимического окисления.

**Экспериментальное исследование микроструктуры пленок хрома**

Для исследования микроструктуры пленок хрома были использованы методы рентгеновской дифрактометрии [6], измерения проводились на дифрактометре Bruker D8 методами скользящего падающего луча и на отражение (рис. 1), а также методы просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР), на электронном микроскопе JEM-2010 (рис. 2, 3).

На рис. 3 выделены области с регулярной кристаллической решеткой (кристаллиты). Видна дифракция электронов на кристаллической решетке.

Полученные результаты позволили определить характерный размер кристаллита в пленках, используемых для записи, с точностью до единиц нанометров.

Локальный анализ элементного состава образцов проводили с использованием энергодисперсионного EDAX спектрометра «Phoenix» с Si(Li) детектором и разрешением по энергии не более

130 эВ. Результаты исследования пленки толщиной 140 нм с характерным размером кристаллитов  $\approx 15$  нм до лазерной обработки приведены на рис. 4.

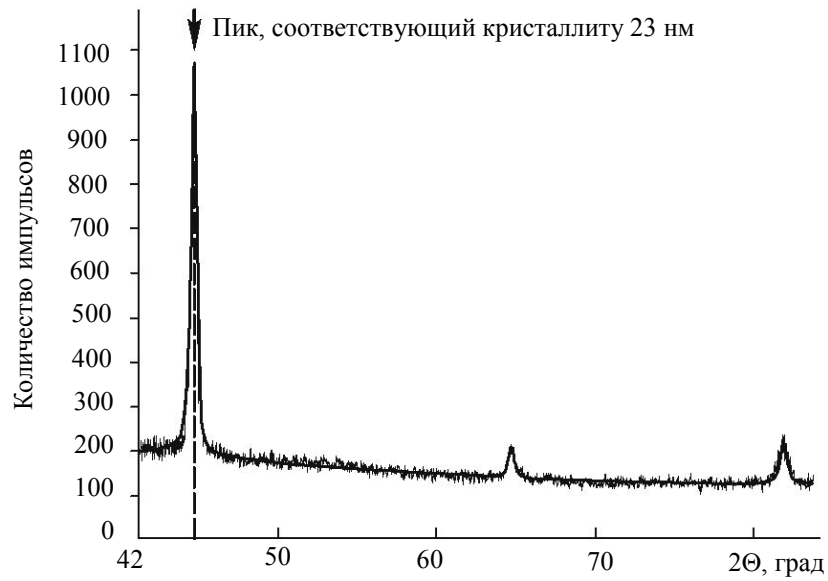


Рис. 1. Дифрактограмма образца с использованием техники скользящего падающего луча, величина угла скольжения –  $5,1^\circ$ . Дифракционные максимумы от подложки ( $2\Theta = 40-90^\circ$ ) отсутствуют

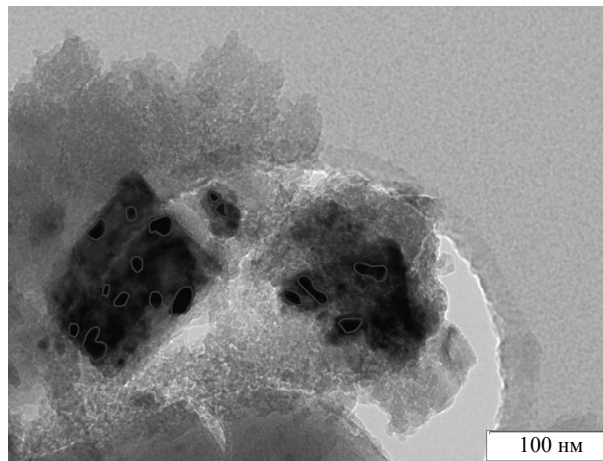


Рис. 2. Результаты ПЭМВР. Образец пленки с характерным размером кристаллитов около 15 нм. Выделены отдельные кристаллиты (обведенные темные области)

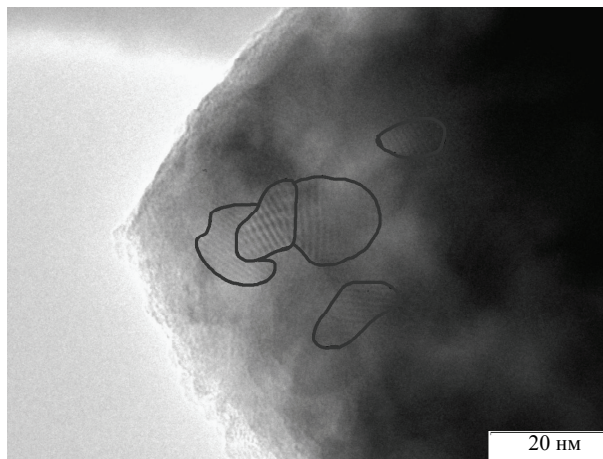


Рис. 3. Результаты ПЭМВР. Образец пленки с характерным размером кристаллитов около 15 нм

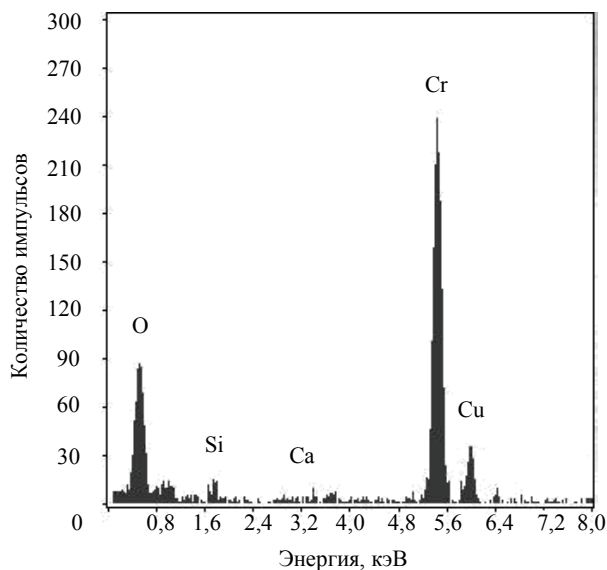


Рис. 4. Результаты анализа элементного состава (энерго-дисперсионный EDAX спектрометр «Phoenix»)

Для различных образцов количество кислорода составило величину от 6% до 20%. Однако данный эксперимент не позволил получить сведения о том, какая доля кислорода находится в связанном состоянии (в оксидах хрома).

#### Экспериментальное исследование результатов лазерной записи

Тестовые структуры были записаны на пленках хрома толщиной приблизительно 120 нм с различным характерным размером кристаллита (менее 2 нм (квазиаморфная пленка), приблизительно 25 нм). Нанесение пленок хрома производилось термовакуумным методом при различной температуре подложек.

Для исследования влияния структуры пленки хрома на кинетику термохимического окисления на каждую подложку на станции лазерной записи CLWS 200 была записана тестовая структура, состоящая из 200 кольцевых треков максимальным диаметром 4 мм. Мощность при записи изменялась от максимальной (700 мВт) на внешнем треке до 0 на внутреннем с шагом в 0,5%, диаметр записываемого пятна  $d=0,8$  мкм, период структуры 3 мкм.

Были проведены сканирующие зондо-микроскопические исследования (СЗМ) образцов как после лазерной записи скрытого изображения в пленке хрома, так и после химического травления (СЗМ Solver Pro, режим атомно-силовой микроскопии (АСМ)). Некоторые результаты АСМ представлены на рис. 5, 6. Результаты АСМ хорошо согласуются с результатами, полученными автором ранее для пленок толщиной приблизительно 50 нм [7], и позволяют сделать следующие выводы.

- Окисление идет по границам кристаллитов, а не по всему объему пленки.
- Пленки с малым размером кристаллитов демонстрируют более высокую чувствительность и разрешающую способность, в сравнении с пленками с большим размером кристаллитов за счет окисления большего количества хрома.

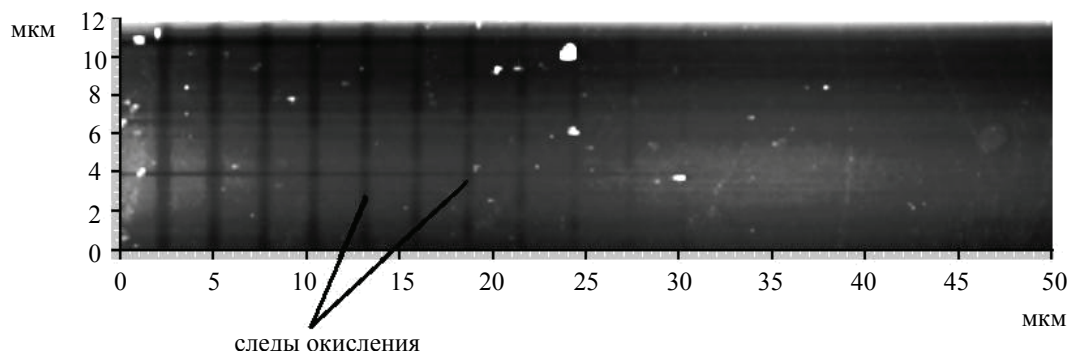


Рис. 5. Результаты атомно-силовой микроскопии

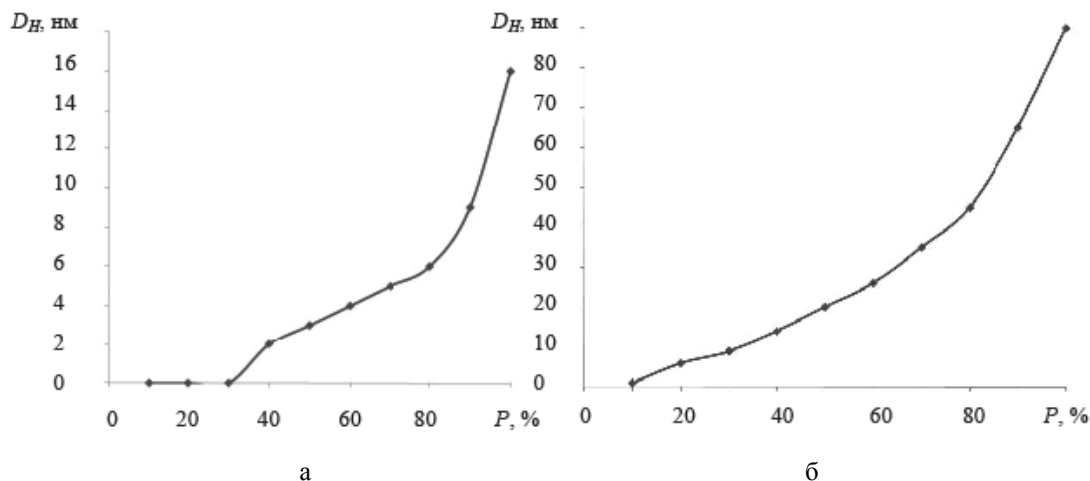


Рис. 6. Экспериментальная зависимость высоты следов окисления, определенных АСМ, от мощности лазерного излучения: а – для пленки с характерным размером кристаллитов приблизительно 25 нм; б – для квазиаморфной пленки

### Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Для теоретического описания процессов окисления различных по структуре пленок хрома была использована ранее разработанная автором физико-математическая модель [8, 9]. Новизна предложенной модели заключается в следующем.

- Пленка считается неоднородной, выделяются отдельные кристаллиты.
- Считается, что окисление идет как атмосферным кислородом, так и кислородом, растворенным в пленке хрома.
- Для описания физико-химических процессов, проходящих в системе, использован метод вероятностного клеточного автомата (ВКА).

Применение метода ВКА для моделирования физико-химических процессов в пленке хрома позволило учесть влияние структуры пленки хрома на процессы окисления под действием лазерного излучения.

Выполнен ряд численных экспериментов, направленных на выяснение влияния структуры пленки хрома на процессы ее окисления, стимулированного лазерным излучением. Для этого было проведено три серии вычислений, в которых моделировалось окисление пленок с различным характерным размером кристаллитов – 2 нм, 15 нм и 25 нм.

Для проверки адекватности предложенной физико-математической модели были использованы результаты АСМ исследования тестовых структур, описанные в предыдущем разделе. Результаты сравнения теоретических и экспериментально полученных высот следов окисления приведены на рис. 7.

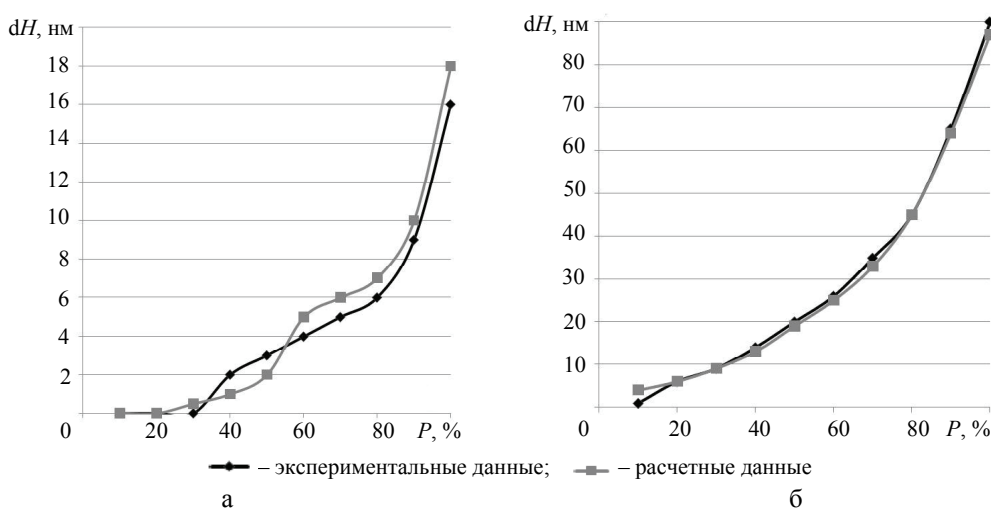


Рис. 7. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов: а – для пленки с характерным размером кристаллитов приблизительно 25 нм; б – для квазиаморфной пленки

Для пленок толщиной около 80 нм максимальное отклонение расчетной высоты следов окисления от полученных в эксперименте составило менее 5 нм, что позволяет сделать вывод об адекватности предложенной модели.

### **Заключение**

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что окисление преимущественно идет по границам кристаллитов, а не по всему объему пленки, причем окисление идет растворенным в пленке кислородом. Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности предложенной физико-математической модели.

Таким образом, в ходе проделанной работы были получены следующие основные результаты.

- Впервые установлено, что основное влияние на профиль полученного микрорельефа для пленок хрома толщиной менее 100 нм оказывает окисление границ кристаллитов, а не объема материала.
- Предложена и экспериментально подтверждена новая модель термохимического окисления пленок хрома толщиной 20–150 нм под действием лазерного излучения, учитывающая неоднородность пленки хрома.
- Теоретически обоснована перспективность использования квазиаморфных пленок хрома для увеличения разрешающей способности.

### **Литература**

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. – СПб: Лань, 2008. – 384 с.
2. Вейко В.П. Структурно-фазовая модификация стеклокерамических материалов под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера / В.П. Вейко, Г.К. Костюк, Н.В. Никоноров, Е.Б. Яковлев // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 184–188.
3. Poleshchuk A.G. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous-relief diffractive optical elements / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov // Intl. Conf. on Lasers, Applications and Technologies, 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnology // Proc. of SPIE. – 2007. – V. 6732, 67320X.
4. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
5. Либенсон М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимовлияние. – СПб: Наука, 2007. – 423 с.
6. Боуэн Д.К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. – СПб: Наука, 2002. – 274 с.
7. Агафонов А.Н. Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров микроструктуры светочувствительной пленки хрома / А.Н. Агафонов, О.Ю. Моисеев, А.А. Корлюков // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 101–108.
8. Агафонов А.Н. Разработка физических принципов и алгоритмов компьютерного моделирования методами вероятностного клеточного автомата базовых процессов формирования микроструктур / А.Н. Агафонов, А.В. Волков, А.Г. Саноян, С.Б. Коныгин // Вестник СамГТУ. – 2007. – № 1. – С. 99–107.
9. Агафонов А.Н. Моделирование процесса термохимического окисления тонких пленок хрома, стимулированного лазерным излучением. – Харьковская нанотехнологическая ассамблея, 2007. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2007. – С. 262.

*Агафонов Андрей Николаевич* – Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, ассистент, andr\_agafonov@mail.ru