

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ  
ТОНКИХ ПЛЕНОК, СФОРМИРОВАННЫХ  
МЕТОДОМ ИОННО-АССИСТИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ**

**Ю. С. Яковенко<sup>1</sup>, С. М. Барайшук<sup>2</sup>, И. И. Ташлыкова-Бушкевич<sup>3</sup>,  
И. С. Ташлыков<sup>1</sup>, О. М. Михалкович<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,  
Минск, Беларусь*

<sup>2</sup> *Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup> *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования топографии поверхности тонких пленок состава Al – 1,0 ат.% Cr, Al – 1,5 ат.% Fe, сформированных ионно-ассистированным осаждением на стеклянных подложках. Получены данные по шероховатости исследованных поверхностей. Обсуждается процесс формирования пленок.

**Ключевые слова:** морфология; шероховатость; тонкие пленки; ионно-ассистированное осаждение.

**Введение.** Устойчивый интерес к изучению физических свойств металлических пленок обусловлен практической ценностью получаемых результатов для различных технологических и промышленных приложений. Как следствие, это вызывает необходимость поиска перспективных методов по созданию покрытий с микро- и нанорельефом поверхности. Вакуумные методы модификации поверхности материалов являются неотъемлемой частью в целом ряде прикладных технологических процессов в различных отраслях промышленности. Они используются для нанесения различного рода тонкопленочных покрытий в электронике и других направлениях [1].

В данной работе проводились исследования особенностей морфологии поверхности тонкого покрытия, создаваемого методом ионно-ассистированного осаждения покрытий в условиях самооблучения (ОПАСИ) [2] на стекло сплавов Al.

**Методика эксперимента.** Эксперименты по ионно-ассистированному осаждению металлических пленок на стекло проводились с использованием вакуумного резонансного плазменно-дугового источника (вакуум  $10^{-2}$  Па) [2], который одновременно генерирует как нейтральный поток частиц, так и поток положительных ионов. В ионном источнике в качестве электродов установки использовали сплавы Al – 1,0 ат.% Cr, Al – 1,5 ат.% Fe. Время осаждения покрытий составило 3, 6, 9 ч для каждого элементного состава образцов. Рассчи-

танные скорости осаждения тонких металлсодержащих покрытий составляли от 0,1 до 0,2 нм/мин.

Расчеты плотности энергии, выделенной в каскадах атомных столкновений ( $\theta$ ), формирующихся при торможении ассистирующих ионов в осаждаемой пленке, выполнены в соответствии с методикой, предложенной P. Sigmund [3]. Получено, что  $\theta = 0,25-0,42$  эВ/ат. Такие значения  $\theta$  соответствуют температурному эквиваленту  $\sim 10^3$  К. Учитывая время развития каскада атомных столкновений при торможении ассистирующих ионов, получаем гипервысокие скорости «кристаллизации» (охлаждения каскадов)  $\sim 10^{12}-10^{13}$  К/с.

Изучение топографии поверхности образцов и определение ее шероховатости было выполнено с применением сканирующей зондовой микроскопии на атомно-силовом микроскопе NT-206 с использованием зондов CSC-38. Значение шероховатости определялось по усредненным данным, полученным с 7 площадок, выбранных произвольным образом. Для обработки данных, полученных на атомно-силовом микроскопе, использовалась программа *Surface Explorer*.

**Результаты и их обсуждение. Морфология поверхности.** На рис. 1 представлено 3D-изображение топографии поверхности стеклянной подложки до нанесения пленок.

Поверхность стекла представляет собой мелкоэлементную морфологию со средней шероховатостью ( $R_a$ ) 3 нм.

Как показали полученные данные, средняя арифметическая шероховатость поверхности исследованных образцов зависит как от времени нанесения металлической пленки, так и от элементного состава электродов. Рассмотрим на примере тонкой пленки Al – 1,5 ат.% Fe некоторые особенности морфологии поверхностей, получаемых методом ОПАСИ.

Нанесение пленки Al – 1,5 ат.% Fe в течение трех часов привело к увеличению значения шероховатости до 21,6 нм, что на 88% больше по сравнению с шероховатостью исходной стеклянной подложки. На рис. 2 представлены типичные 2D и 3D-изображения морфологии поверхности данного образца.

На рис. 2, а хорошо видно, что при небольшом времени нанесения покрытия методом ОПАСИ наблюдается островковый механизм роста пленки или рост Фольмера–Вебера. Условием его реализации является преобладание взаимодействия между ближайшими атомами над взаимодействием этих атомов с подложкой. При островковом механизме роста вещество с самого начала образует на поверхности многослойные конгломераты атомов [4]. Проведением анализа проекций площадок различных высот

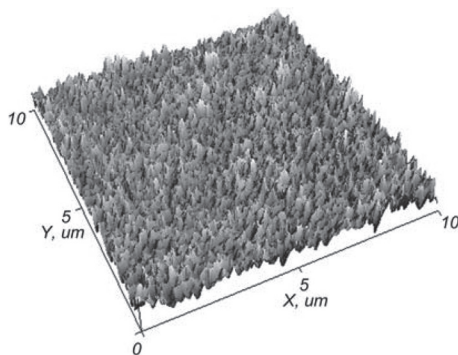


Рис. 1. 3D-изображение топографии поверхности исходной стеклянной подложки

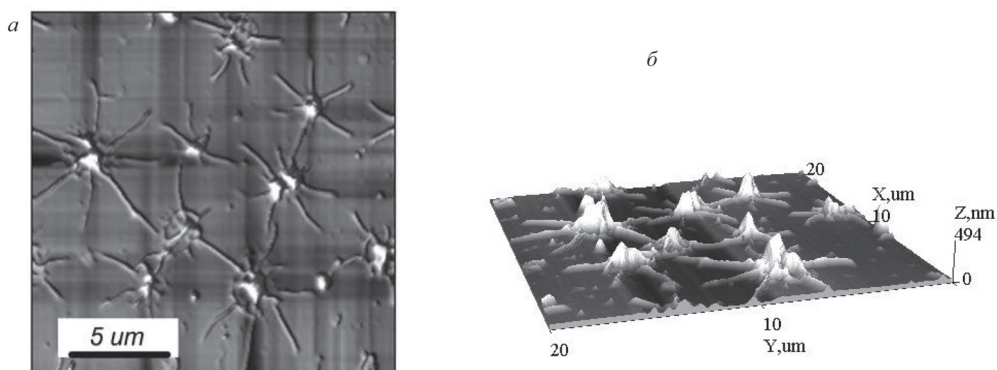


Рис. 2. 2D (а) и 3D (б) АСМ-изображения топографии поверхности пленки Al – 1,5 ат.% Fe, нанесенной на стекло методом ОПАСИ при отсутствии ускоряющего напряжения за три часа

с использованием инструментов *Surface Explorer* нами было установлено, что средние диагональные размеры островка колеблются в диапазоне 4–7 мкм. Средняя высота островков  $\sim 200$  нм, что хорошо коррелирует с моделью островкового роста пленки, схематическое представление которого для различной степени покрытия  $\theta$  (в долях монослоев) приведено на рис. 3, б.

Дальнейшее увеличение времени нанесения покрытия для пленки состава Al – 1,5 ат.% Fe до 9 ч привело к постепенному уменьшению значения шероховатости ее поверхности. После пассивного (без приложения потенциала) нанесения данного покрытия среднее измеренное значение шероховатости поверхности уменьшилось и составило  $R_a = 17,5$  нм. Подобная тенденция, выражающаяся в уменьшении значения шероховатости при увеличении времени нанесения покрытия методом ОПАСИ, наблюдалась и ранее при нанесении пленки Mo на стеклянную подложку [5, 6]. Полученная функциональная зависимость значения шероховатости поверхности от времени нанесения может быть объяснена в рамках существующих теорий роста металлических пленок [6]. По видимому, при увеличении времени нанесения пленки наряду

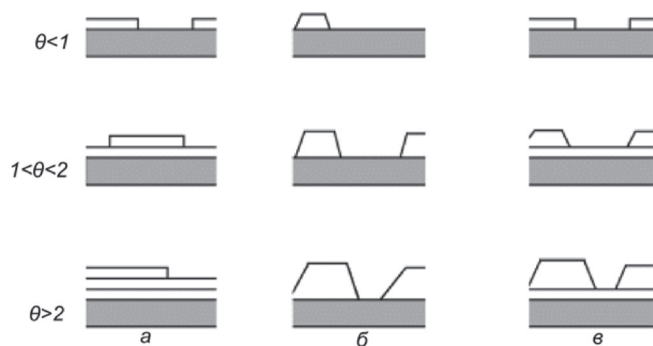


Рис. 3. Схематическое представление трех важнейших механизмов роста [4]: а – послойный рост; б – островковый рост; в – рост слоя с островками

с островковым механизмом образования включается и ее послойный рост (рост Франка – ванн дер Мерве). Таким образом, происходит замедление роста островковых структур и металлическая пленка начинает заполнять области между островками (рис. 3, *a*). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного роста предыдущего слоя. Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов больше, чем между ближайшими атомами в слое [4]. Схематическое представление послойного и комбинации механизмов послойного и островкового роста пленки приведено на рис. 3, *a* и *в* соответственно.

Включение механизма послойного роста приводит к тому, что островки становятся не так ярко выражены (рис. 4) и постепенно превращаются в сглаженные структуры неправильной формы (рис. 4, *б*). После 6 ч нанесения пленки Al – 1,5 ат.% Fe островковые структуры имеют средний диаметр ~ 2 мкм и среднюю высоту ~ 90 нм, что в 2 раза меньше высоты аналогичных структур после 3 ч нанесения. После 9 ч нанесения покрытия морфология поверхности резко меняется на качественном уровне. Теперь она представлена, главным образом, каплеобразными структурами, средний диаметр основания которых составляет 0,5 мкм, а средняя высота ~ 150 нм.

Аналогичные исследования морфологии поверхности проведены и для сплава Al – 1,0 ат.% Cr на стекле. В зависимости от элементного состава на-

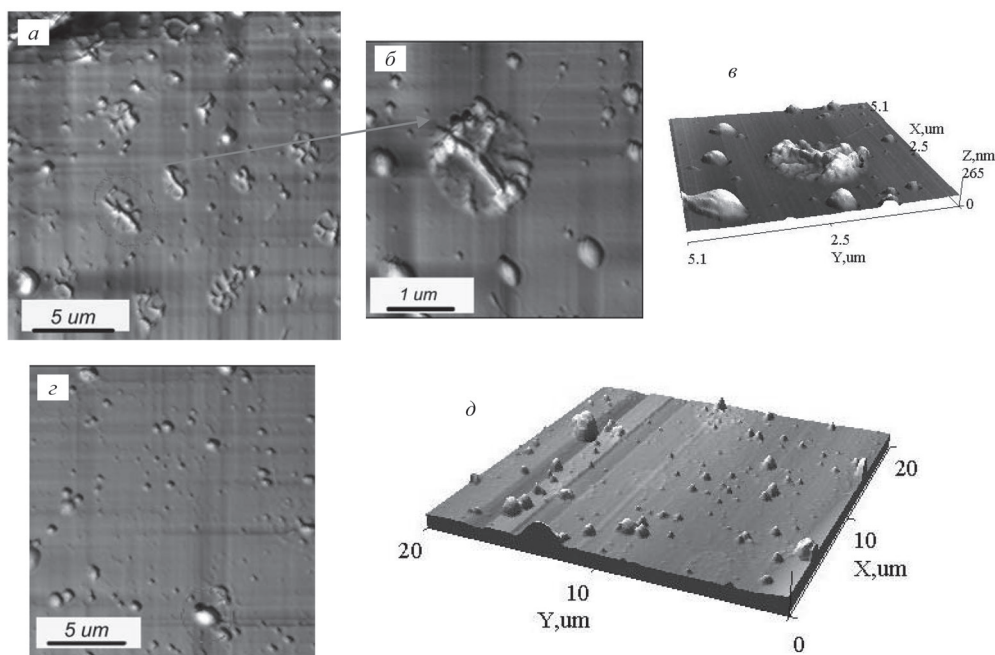


Рис. 4. 2D (*a*, *б*, *з*) и 3D (*в*, *д*) АСМ-изображения топографии поверхности пленки Al – 1,5 ат.% Fe, нанесенной на стекло методом ОПАСИ при отсутствии ускоряющего напряжения за 6 ч (*a*, *б*, *в*) и 9 ч (*з*, *д*) соответственно

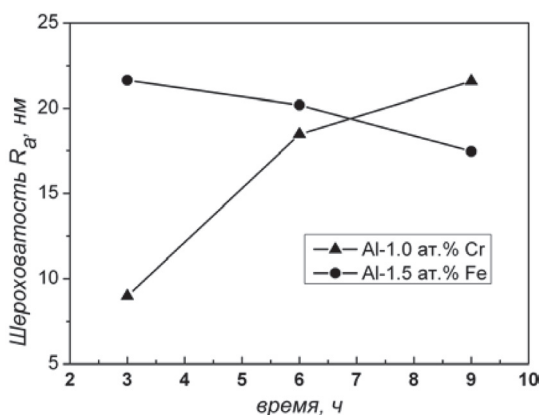


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от времени нанесения покрытия

носимого покрытия мы получили следующие функциональные зависимости (рис. 5).

Оказалось, что для пленки сплава Al – 1,0 ат.% Cr увеличение времени нанесения покрытия приводит к увеличению значения шероховатости поверхности от 9,0 нм (время нанесения 3 ч) до 21,6 нм (время нанесения 9 ч), что противоположно той картине, которую мы наблюдали для пленки Al – 1,5 ат.% Fe.

Дальнейшие исследования в данной области направлены на установление характера зависимости шероховатости от элементного состава материалов электродов и толщины наносимого покрытия.

Установление характера зависимости шероховатости от элементного состава материалов электродов и толщины наносимого покрытия.

**Заключение.** Анализ АСМ-изображений позволил определить изменение морфологии поверхности тонких металлических пленок на стекле, сформированных ионно-ассистированным осаждением в условии самооблучения. Установлено, что значение шероховатости поверхности тонких пленок сплавов Al – 1,0 ат.% Cr, Al – 1,5 ат.% Fe на стекле, полученных методом ОПАСИ, определяется главным образом материалом электрода и зависит от времени нанесения покрытия. Полученные результаты являются принципиально важными для дальнейшего анализа свойств смачиваемости поверхностей данной линейки образцов.

### Список использованных источников

1. Понятовский, М. Д. Определение методом РОР элементного состава многокомпонентного покрытия, осажденного на кремний / М. Д. Понятовский // Электроника, микроэлектроника и нанотехнологии: материалы II Междунар. науч. конф., Ставрополь, 2008 г. / Северо-Кавказский гос. техн. ун-т. – Ставрополь, 2008. – Ч. 3. – 180 с.
2. Способ нанесения покрытий: пат. 2324 Респ. Беларусь IC1 ВУ, C23 C4/12, C4/18, C14/16 / И. С. Ташлыков, И. М. Белый; дата публ.: 1999. – 1999. – №1. – С. 30.
3. Sigmund, P. // Appl. Phys. Lett. – 1974. – Vol. 25, №3. – P. 169–171.
4. Фельдман, Л. Основы анализа поверхности тонких пленок / Л. Фельдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
5. Барайшук, С. М. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением хромовых покрытий / С. М. Барайшук, И. С. Ташлыков // Известия вузов. Сер. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. – № 1. – С. 30–35.
6. Михалкович, О. М. Морфология и смачиваемость поверхности структур пленка Mo, Al, Al+1 ат.% Cr / стекло, сформированных ионно-ассистированным осаждением / О. М. Михалкович, И. С. Ташлыков // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 11-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сентября 2015 г. / БГУ. – Минск, 2015. – С. 248–250.