

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Острийные эмиттеры электронов микроприборов и конструктивно-технологические особенности их изготовления/ Н.Н. Балан [и др.] // Вестник науки Сибири – 2012.– № 3.– С. 89–98.
2. Трубецков Д.И. Вакуумная микроэлектроника. // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 4. – С. 58–64.
3. Debabrata Biswas, A universal formula for the field enhancement factor // Physics of Plasmas– 2018.– 043113.
4. Батраков А.В. Эмиссионная электроника / А.В.Батраков – Томск: Издательство Томского государственного университета, 2008. – С. 82–85.
5. Оценка характеристик автоэмиссионных наноструктур на основе кремния и карбида кремния / А.М. Светличный [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки – 2011. - С. 27–34.
6. Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139. – Вып. 2. – С. 266-272.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СПЛАВОВ Al–Mn И Al–Ni НА СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

**И. И. Ташлыкова-Бушкевич¹, А. С. Измайлович¹, И. А. Столяр²,
В. А. Денисов¹, А. В. Деркач¹**

¹⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, 220013, Минск, Беларусь, e-mail: iya.itb@bsuir.by*

²⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220050, Минск, Беларусь*

Методами сканирующей зондовой микроскопии и растровой электронной микроскопии исследована наноструктура поверхности пленок сплавов Al–2,1 ат. % Mn и Al–1,4 ат. % Ni, сформированных осаждением покрытия на стеклянную подложку при ассистировании собственными ионами. Установлено, что при легировании алюминия степень морфологической неоднородности поверхности пленок снижается. Обнаружено, что параметры шероховатости пленок коррелируют с размером и плотностью микрочастиц капельной фракции.

Ключевые слова: ионно-ассистированное осаждение; сканирующая зондовая микроскопия; растровая электронная микроскопия; сплавы Al–Mn; сплавы Al–Ni.

STUDY OF SURFACE NANOSTRUCTURE OF THIN FILMS OF Al–Mn AND Al–Ni ALLOYS ON GLASS SUBSTRATES

**I. I. Tashlykova-Bushkevich¹, A. S. Izmailovich¹, I. A. Stoliar²,
V. A. Denisov¹, A. V. Derkach¹**

¹⁾ *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovki str. 6, 220013 Minsk, Belarus*

²⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: I. I. Tashlykova-Bushkevich (iya.itb@bsuir.by)*

Surface nanostructure of films of Al–2.1 at.% Mn and Al–1.4 at.% Ni alloys has been investigated by means of scanning probe microscopy and scanning electron microscopy. It

is obtained that alloying of aluminum results in the reduction of the level of surface morphological heterogeneity of films. Roughness parameters of films are correlated with size and density of microparticles of droplet fraction.

Key words: ion-assisted deposition; scanning probe microscopy; scanning electron microscopy; Al–Mn alloys; Al–Ni alloys.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тонкие пленки металлов, сформированные с помощью технологий ионно-ассистированного нанесения тонкопленочных покрытий [1] приобрели широкое распространение в качестве светоотражающих, упрочняющих, проводящих и диэлектрических покрытий в микроэлектронной промышленности, а также при создании определенных устройств нанoeлектроники. Целью данной работы является изучение наноструктуры поверхности пленок сплавов Al–2,1 ат. % Mn и Al–1,4 ат. % Ni на стекле, полученных методом осаждения при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ) [2], когда при осаждении нейтральной фракции металла формирующаяся пленка облучается ионами ионизированной фракции металла. Выбор сплавов Al–Mn и Al–Ni обусловлен перспективностью расширения области применения материалов на основе Al в нанотехнологиях, а также в качестве оптических пленок металлов на стекле для устройств современной электроники и приборов солнечной фотоэнергетики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ионно-ассистированное нанесение пленок алюминия (99,995) и его сплавов Al–2,1 ат. % Mn и Al–1,4 ат. % Ni было выполнено с помощью резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы ($P = 10^{-2}$ Па) при ускоряющем напряжении $U = 3,0$ кВ, силе ионного тока ~ 100 мкА и плотности $5,1$ мкА/см². Время осаждения покрытий составляло 10 ч, 6 ч и 9,1 ч соответственно при скорости осаждения $\sim 0,1$ – $0,2$ нм/мин. Изучение структуры пленок проводилось с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) на атомно-силовом микроскопе NT-206 и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе марки LEO1455VP с приставкой "HKL CHANNEL5". В качестве определяющих топографию параметров были выбраны амплитудные параметры профиля шероховатости (R_a, R_q, R_z), шаговый параметр S , а также исследовательский гибридный коэффициент $k = R_z / S$ [3] для оценки изменения формы неровностей профиля нанорельефа. Определение среднего размера \bar{D} , объемной доли V и удельной поверхности границ $S_{уд}$ микрочастиц капельной фракции в образцах было произведено методом секущих.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ СЗМ изображений поверхности стеклянной подложки, а также осажденных тонких пленок Al и сплавов Al–1,4 ат. % Ni и Al–2,1 ат. % Mn, позволил построить гистограммы распределения локальных максимумов и минимумов на поверхности пленок. Получено, что в результате ионно-ассистированного нанесения пленок на стекло формируются поверхности, шероховатость которых определяется неровностями различного геометрического типа с разной степенью неоднородности в зависимости от элементного состава образцов и времени осаждения. Параметры, характеризующие морфологические особенности поверхности стекла и пленок,

указаны в табл. Установлено, что гистограммы распределения высот/впадин нанорельефа пленок относительно средней линии поверхности унимодальны, поскольку имеют ярко выраженный максимум, и по форме близки к распределению Гаусса. В частности, среднеквадратичная шероховатость R_q , характеризующая ширину гистограммы распределения высот/впадин, тем больше, чем грубее поверхность пленки.

Таблица

Значения параметров, описывающих морфологию и топографию стеклянной подложки, пленок Al и его сплавов Al–Ni и Al–Mn, осажденных на стекло

Образец	t , ч	R_a , нм	R_q , нм	k , 10^{-2}	\bar{D} , мкм	V , %	$S_{уд}$, 10^{-2} мкм $^{-1}$
Стеклоподложка	–	0,17	0,22	0,04	–	–	–
Al (99,995)	10,0	31,51	51,52	2,53	0,88	5,45	20,21
Al–1,4 ат. % Ni	6,0	17,09	30,69	2,26	0,46	1,77	12,68
Al–2,1 ат. % Mn	9,1	23,87	39,92	3,19	0,96	3,82	13,01

При анализе РЭМ изображений тонких пленок Al и сплавов Al–1,4 ат. % Ni и Al–2,1 ат. % Mn, осажденных на стекло, получено, что данные пленки представляют собой сплошные покрытия без наличия деформаций, однако вследствие характерной шероховатости, проявляется островковый характер поверхности пленок. На поверхности пленок присутствуют микрочастицы капельной фракции из наносимого покрытия. Большинство микрочастиц имеет сферическую форму. Выявлено, что при одинаковом значении $S_{уд}$ микрочастицы на поверхности пленки сплава Al–Mn, объемная доля которых составляет 3,8%, имеют больший средний диаметр по сравнению с пленкой сплава Al–Ni, где V микрочастиц в ~2 раза меньше. Это свидетельствует о меньшей поверхностной плотности микрочастиц капельной фракции на пленке сплава Al–Mn в том числе из-за замуравывания ранее осажденных микрочастиц по мере роста покрытия при больших временах нанесения пленок. Установлено, что кривые частот распределения размеров микрочастиц, количество которых уменьшается с увеличением их диаметров, демонстрируют отчетливое положительное отклонение от нормального закона и удовлетворительно описываются логнормальными кривыми.

Как следует из табл., наноструктура поверхности пленок на стекле заметно изменяется при легировании Al. Неравномерность заполнения впадин и выступов исходного рельефа стеклянной подложки на начальном этапе осаждения пленки Al приводит к тому, что, если среднеарифметическая шероховатость R_a стеклянной подложки равна 0,17 нм, то для пленки Al величина R_a составляет 31,51 нм. Сравнение значений параметров, характеризующих амплитуды шероховатости пленок в табл., показывает, что в результате легирования Al степень морфологической неоднородности поверхности сплавов снижается. Дополнительно определено отсутствие линейной зависимости гибридного параметра k от R_a при том, что оба параметра R_a и R_z , как известно, линейно коррелируют. Это указывает в частности на то, что в случае осаждения сплава Al–Mn расстояние между выступами неровностей профиля рельефа уменьшается по сравнению с остальными пленками.

Формирование тонкопленочных покрытий в настоящей работе было выполнено методом ОПАСИ, отличительным преимуществом которого является применение ионов осаждаемого металла в качестве ассистирующих ионов. Морфология поверхности пленок, осаждаемых ионно-плазменным напылением, играет исключительно важную роль для управления комплексом поверхностных свойств покрытий, которые определяются не столько характеристиками материала в целом, сколько свойствами и структурой приповерхностных слоев системы покрытие/подложка как в нано-, так и субмикромасштабе. Обнаруженные в данной работе закономерности структурообразования пленок Al при его легировании указывают на перспективность продолжения исследования взаимосвязи параметров шероховатости с физико-химическими свойствами сформированных при гиперскоростной кристаллизации пленок на стеклянных подложках путем модифицирования состава покрытий и условий ионно-ассистированного осаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования наноструктуры поверхности пленок Al и его сплавов с Mn и Ni определены параметры шероховатости и закономерности частотных распределений микрочастиц капельной фракции по размерам для покрытий, сформированных на стеклянных подложках осаждением при ионном ассистировании. Обнаружено, что степень морфологической неоднородности поверхности пленок сплавов Al снижается по сравнению с пленками чистого Al. Гистограммы распределения высот/впадин пленок относительно средней линии поверхности унимодальны и по форме удовлетворительно описываются распределением Гаусса. Частотные распределения микрокапельной фракции по размерам имеют логнормальный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (2016–2020 гг., подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.40, № ГР 20161123). Авторы благодарны О. Г. Бобровичу (БГТУ), С. В. Гусаковой (БГУ) и Ю. С. Яковенко (БГПУ) за помощь при получении образцов методом ОПАСИ и проведении СЗМ и РЭМ измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Thin-film coating; historical evolution, conventional deposition technologies, stress-state micro/nano-level measurement/models and prospects projection: a critical review / S. O. Mbam [et al.] // Mater. Res. Express. – 2019. – V. 6, № 12. – P. 122001-1–122001-73.
2. Способ нанесения покрытий: пат. ВУ 2324 / И. С. Ташлыков, И. М. Белый. – Оpubл. 16.03.1998.
3. Закономерности формирования тонких металлических пленок на стекле при ионно-ассистированном осаждении / И. И. Ташлыкова-Бушкевич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : матер. VIII Междунар. науч. конф., 10-12 окт., 2018 / редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 117–122.