

## СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТЫЛЬНЫХ И ЛИЦЕВЫХ КОНТАКТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ОСАЖДАЕМЫХ ПАССИВНО И ПРИ ИОННОМ АССИСТИРОВАНИИ

И. И. Ташлыкова - Бушкевич<sup>1</sup>, Ю. С. Яковенко<sup>3</sup>, И. А. Бушкевич<sup>4</sup>,  
О. Г. Бобровиц<sup>2</sup>, И. С. Ташлыков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, [iya.itb@bsuir.by](mailto:iya.itb@bsuir.by)

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>3</sup>Белорусский государственный педагогический университет

<sup>4</sup>Белорусский государственный университет

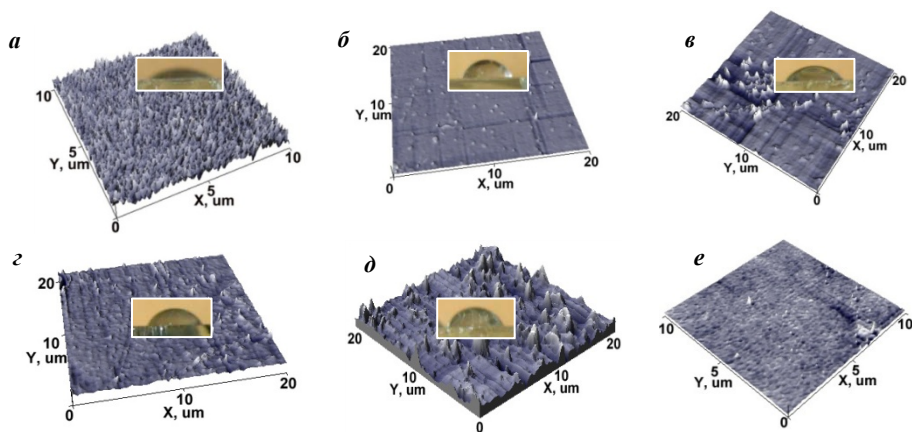
На протяжении последних лет в мировой энергетике отмечается рост интереса к возобновляемым энергетическим ресурсам, использование которых, в частности солнечной энергии, позволит решить множество экономических и экологических проблем. В настоящей работе представлены данные о морфологии и смачиваемости поверхности тонких пленок молибдена, наносимых на стеклянную подложку и используемых в качестве тыльного контакта в солнечных элементах, а также тонких пленок алюминия и его сплавов, используемых для лицевого контакта солнечных элементов.

Эксперименты по ионно-ассистируемому осаждению металлических пленок на стекло проводились с использованием вакуумного резонансного плазменно-дугового источника ионов при отсутствии ускоряющего напряжения (вакуум  $10^{-2}$  Па) [1]. В качестве электродов в установке использовался металл Мо и сплав Al-1,0 ат. % Cr. Время осаждения покрытий составляло 3, 6 и 9 ч. Расчетная скорость осаждения покрытий составляла  $\sim 0,1$  нм/мин. В соответствии с методикой, предложенной Р. Sigmund [2], скорость «кристаллизации» (охлаждения каскадов) составила  $10^{12}$ – $10^{13}$  К/с. Изучение топографии поверхности образцов и определение ее шероховатости было выполнено с применением сканирующей зондовой микроскопии на атомно-силовом микроскопе NT-206. Смачиваемость дистиллированной водой поверхности структур пленка/стеклянная подложка, полученных методом осаждения покрытий при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ), определялась по величине равновесного краевого угла смачивания (РКУС), который измерялся методом покоящейся капли. Погрешность измерения РКУС составила  $\sim 1^\circ$  [3].

Для группы образцов, полученных методом ОПАСИ при отсутствии ускоряющего напряжения, нами установлено, что осаждение металлической молибденовой пленки в течение 3ч приводит к формированию пленки толщиной  $\sim 20$  нм и уменьшению значения шероховатости поверхности в 2,4 раза по сравнению с шероховатостью исходной стеклянной подложки  $R_a = 2,54$  нм. Тенденция уменьшения значения шероховатости поверхности при небольшом времени нанесения пленки методом ОПАСИ наблюдалась нами ранее [4] и объясняется тем, что на начальном этапе формирования пленки осуществляется заполнение неровностей мелко-элементарной морфологии исходной стеклянной подложки (рис. 1 а). Механизм роста пленки – островковый, средняя высота отдельных пиков составляет 3 нм (рис. 1 б).

При увеличении времени нанесения покрытия до 6 ч наблюдается рост островковых структур (рис. 1 в), что приводит к увеличению значения шероховатости осажденной металлической пленки толщиной  $\sim 35$  нм до  $R_a = 1,70$  нм, а при  $t = 9$  ч шеро-

ховатость поверхности пленки, толщина которой составляет около 50 нм, незначительно уменьшается до значения  $R_a = 1,66$  нм (рис.1з). Средний измеренный размер пикообразных элементов морфологии поверхности снижается с 17 нм при  $t = 6$  ч до 7 нм, когда время нанесения равно 9 ч.



**Рисунок 1.** – Изменение топографии поверхности стекла при нанесении пленок Мо и сплава Al-1,0 ат. % Cr методом ОПАСИ. 3D-изображения поверхности исходной стеклянной подложки (а); пленки Мо, нанесенной на стекло при отсутствии ускоряющего напряжения за 3 (б), 6 (в), 9 (г) ч соответственно; пленки сплава Al-1,0 ат. % Cr после 9 ч нанесения покрытия при отсутствии ускоряющего напряжения (е); пленки Мо, нанесенной на стекло при ускоряющем напряжении 10 кВ при силе ионного тока 100 мкА за 5 ч (д)

Полученная функциональная зависимость значения шероховатости поверхности от времени нанесения может быть объяснена в рамках существующих теорий роста металлических пленок. По-видимому, при увеличении времени нанесения пленки до 9ч наряду с островковым механизмом образования пленки происходит также и ее послойный рост (рост Франка-ванн дер Мерве) [5]. Таким образом, происходит замедление роста островковых структур и металлическая пленка начинает заполнять области между островками (рис.1з). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного роста предыдущего слоя. Послойный слой имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов больше, чем между ближайшими атомами в слое [5].

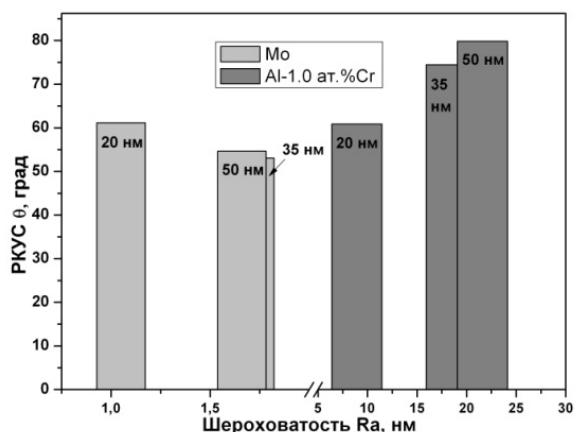
Данные изменения смачиваемости поверхности пленок из различных металлов, нанесенных на стекло, в зависимости от толщины пленок, представлены в таблице. Обнаружено увеличение степени гидрофильности поверхности с ростом толщины пленок молибдена. При этом для сплава алюминия наблюдается обратная закономерность (рис. 2).

Таблица

**Равновесные краевые углы смачивания дистиллированной водой и шероховатость поверхности пленок Мо и сплава Al-1,0 ат. % Cr**

Материал	Стекло без пленки	Мо $U=0$			Al-1,0 ат.% Cr $U=0$		
	-	3	6	9	3	6	9
d, нм	0	20	35	50	20	35	50
$R_a$ , нм	2,54	1,05	1,70	1,66	8,93	18,46	21,59
$\theta^0$ , град	22,00	61,16	53,04	54,67	60,86	74,44	79,84

Ранее нами было обнаружено, что уменьшение шероховатости поверхности стекла при нанесении пленок Мо ухудшает смачиваемость образцов. Например, для пленки толщиной 50 нм, нанесенной на стекло при ускоряющем напряжении 10 кВ, угол  $\theta$  составляет  $65,0^\circ$  при  $R_a = 2,16$  нм. Следовательно, образцы, полученные при наличии ускоряющего потенциала, отличаются от пленок молибдена, нанесенных на стекло в безпотенциальном режиме тем, что сформированная в отсутствие потенциала поверхность пленки Мо обладает меньшей шероховатостью и, соответственно, меньшим значением РКУС. Данные результаты указывают на то, что влияние топографии на смачиваемость поверхности пленок молибдена объясняется гомогенным режимом смачивания, описываемым моделью Венцеля – Дерягина [6]. Как результат, значение РКУС для шероховатой поверхности будет меньше, чем для гладкой.



**Рисунок 2. – Зависимость краевого угла смачивания от шероховатости поверхности пленок разной толщины, нанесенных на стекло методом ОПАСИ при отсутствии ускоряющего напряжения**

Рисунок 2 наглядно демонстрирует, что смачиваемость поверхности полученных структур определяется как шероховатостью и характером рельефа поверхности пленок, так и их химическим составом. Обнаруженный факт роста шероховатости поверхности образцов при нанесении пленки сплава Al-Cr сопровождается возрастанием  $\theta$ , что свидетельствует об изменении характера смачивания пленок от гомогенного к гетерогенному (модель Касси-Бакстера), когда неровности поверхности заполнены воздухом и жидкость не контактирует со всей поверхностью твердого тела [6].

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность управления свойствами (шероховатостью и смачиваемостью) поверхности структур пленка/стеклянная подложка путем модифицирования состава покрытий, которые перспективны в качестве тыльных и лицевых контактов поглощающих слоев солнечных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ташлыков, И.М. Белый. Патент РБ №2324. 1С1 ВУ, С23 С4/12, С4/18, С14/16. Офиц. бюл. гос. пат.ведом. 1, 30 (1999).
2. P. Sigmund. Appl. Phys. Lett.25, 169 (1974).

3. И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук. Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия 1, 30 (2008).
4. О.М. Михалкович, И.С. Ташлыков, И.И. Ташлыкова-Бушкевич, Ю.С. Яковенко, В.С. Куликаускас, С.М. Барайшук, О.Г. Бобрович. ВИТТ 11,248 (2015).
5. Л.Фельдман, Д.Майер. Основы анализа поверхности тонких пленок. Мир, М. (1989). 344 с.
6. D. Muracami, H. Jinnai, A. Takahara. Langmuir 30, 2061 (2014).

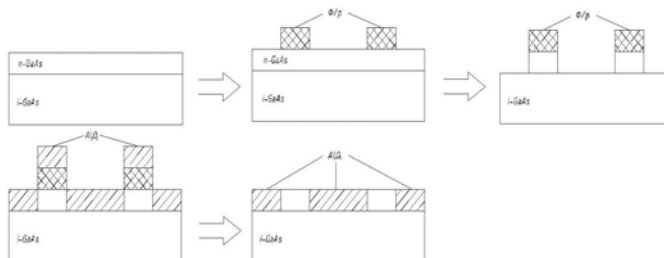
## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ МЕЗАСТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Е. В. Телеш

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, eteles@mail.ru*

Самым простым методом изоляции активных элементов в интегральных схемах на арсениде галлия является травление рабочего эпитаксиального слоя до полуизолирующей подложки или до буферного слоя. С целью планаризации рельефа области между полученными мезаструктурами заполняются слоем диэлектрика толщиной равной толщине активного слоя. Сформированные диэлектрические слои должны выдерживать воздействие последующих технологических процессов, протекающих при сравнительно высоких температурах 350–450 °С – формирование пассивации, вжигание омических контактов, присоединение внешних выводов методом термокомпрессии.

На рисунке 1 приведена последовательность операций формирования диэлектрической изоляции между мезаструктурами. На поверхности *n*-GaAs методом фотолитографии формируется маска из фоторезиста и проводится травление эпитаксиального слоя до полуизолирующей подложки. На полученную структуру наносится пленка диэлектрика, далее осуществляется удаление фоторезистивной маски в органическом растворителе. Нанесение диэлектрического слоя должно осуществляться при температуре подложки  $T_n \leq 100$  °С, чтобы исключить задубливание фоторезистивной маски.



**Рисунок 1. – Последовательность операций формирования изоляции между мезаструктурами**

Для формирования изоляции применялось ионно-лучевое распыление, которое позволяет наносить диэлектрические пленки при низкой температуре подложки. Проведено формирование диэлектрических слоев из SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В качестве подложки применялись эпитаксиальные структуры арсенида галлия, выращенные на изолирующей подложке *i-n* типа АГЭ ЕТО.035.026 ТУ. Изолирующие слои из SiO<sub>2</sub>