

дов металлов. Показано, что параметры получаемых наночастиц (морфология, фазовый состав и оптические свойства) могут быть оптимизированы путем варьирования условий эксперимента. Дальнейшая работа авторов будет сконцентрирована на создании тестового образца гетероперехода на основе наночастиц оксидов цинка и меди и изучении его вольтамперных и оптических характеристик.

Работа выполнялась в рамках задания Конвергенция 2.2.05.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarasenko N. V., Butsen A. V. Laser synthesis and modification of composite nanoparticles in liquids. *Quant. Electron.* 40 (2010) P. 986–1003.
2. Zhang H. X., Siegert U., Liu R., Cai W. B. Facile fabrication of ultrafine copper nanoparticles in organic solvent. *Nanoscale Res. Lett.* 4 (2009) 705–708. doi 10.1007/s11671-009-9301-2

УДК 532.64:539.211

О. Г. Бобрович, канд. физ.-мат. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ МО/СТЕКЛЯННАЯ ПОДЛОЖКА, ФОРМИРУЕМОЙ ИОННЫМ И ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

В работе приведены результаты изучения Мо-покрытия, осаждаемого в качестве тыльного контакта тонкопленочных солнечных элементов на стеклянную подложку. Покрытия молибдена наносились на стеклянную подложку с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы, в которой одновременно генерируются положительные ионы и нейтральная фракция из материала электродов источника ионов [1]. В качестве материала электродов использовался чистый молибден 99,9%. Осаждение молибденового покрытия проводили при ускоряющем напряжении $U = 10$ кВ для ассистирующих ионов Mo^+ и интегральных потоках ионов $1,2 \cdot 10^{16} - 1,1 \cdot 10^{17} Mo^+ / cm^2$ и при отсутствии ускоряющего напряжения. В рабочей камере в процессе создания металлических покрытий поддерживался вакуум $\sim 10^{-2}$ Па. Ионное ассистирование [2] в процессе осаждения покрытия влияет на кристаллическую структуру, плотность упаковки, адгезию, поверхность получаемой пленки, что может повысить качество тонкопленочных устройств.

Морфология поверхности исходных и модифицированных образцов изучалась, используя атомно-силовую микроскопию в кон-

тактном режиме (атомно-силовой микроскоп NT-206, зонды CSC21), а смачивание дистиллированной водой определяли по равновесному краевому углу θ смачивания (РКУС). Краевой угол определяли по основным размерам каплей воды, наносимой на исследуемые образцы: высоте и диаметру ее основания. Для получения воспроизводимых результатов капли воды, наносимые на образцы, имели примерно одинаковый объем $V = (47,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ мл. Погрешность в измерении РКУС составляла не более 2%.

Изображения топографии поверхности исходного стекла и стекла с осажденным Мо-покрытием приведены на рис. 1, а ее характеристики представлены в таблице.

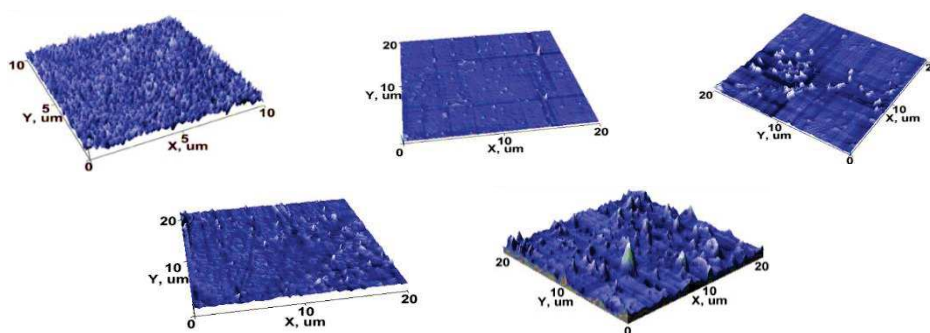


Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности:
а – исходной стеклянной подложки; поверхности стекла с осажденным Мо-покрытием при отсутствии ускоряющего напряжения за время: **б** – 3 ч, **в** – 6 ч, **г** – 9 ч и **д** – после осаждения Мо в условиях ионного Мо⁺ ассистирования при ускоряющем напряжении 10 кВ

Таблица – Равновесные краевые углы смачивания дистиллированной водой и шероховатость поверхности модифицированного стекла

Параметры	Стекло исходное	Стекло, модифицированное осаждением покрытия							
		U = 0 кВ			U = 10 кВ				
Время осаждения t, мин	–	180	360	540	15	50	75	110	145
Интегральный поток Ф, 10 ¹⁶ см ⁻²	–	–	–	–	1,2	3,2	5,2	8,1	11,0
R _a , нм	2,2	1,0	1,7	1,7	1,8	2,0	2,7	2,3	2,3
РКУС, град	18,9	35,5	52,3	61,7	90,8	80,8	86,8	88,2	93,9

Для образцов, полученных осаждением молибдена при отсутствии ускоряющего напряжения, установлено, что осаждение пленки в течение 3 ч приводит к уменьшению значения средней шероховатости поверхности в 2,2 раза по сравнению с шероховатостью исходной стеклянной подложки, а при осаждении Мо в течение 6 и 9 ч – в 1,3 раза. При этом следует отметить, что значение РКУС возрастает с

увеличением времени осаждения покрытия. В случае использования ускоряющего напряжения 10 кВ при ионно-ассистируемом нанесении Мо покрытия средняя шероховатость при малом времени модифицирования также уменьшается в сравнение с шероховатостью ($R_a = 2,2$ нм) исходного стекла, как и в случае безпотенциального режима осаждения Мо покрытия. Однако, увеличение времени модифицирования стекла до 75 мин и выше, шероховатость увеличивается ($R_a = 2,7$ нм) и уже превышает шероховатость исходного стекла. Следовательно, образцы Мо-покрытие/стекло, 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. Тенденция уменьшения значения шероховатости поверхности при небольшом времени нанесения молибденового покрытия при ускоряющем напряжении $U = 10$ кВ для ассистирующих ионов Mo^+ и при отсутствии ускоряющего напряжения объясняется тем, что на начальном этапе формирования металлической пленки осуществляется заполнение неровностей мелко-элементарной морфологии исходной стеклянной подложки (рис. 1, а).

Анализ значений РКУС поверхности стекла с осажденным Мо-покрытием обнаруживает рост степени гидрофильности поверхности с увеличением времени нанесения покрытия и соответственно толщины пленок молибдена. При этом, используя осаждение Мо-покрытия в отсутствие ускоряющего напряжения ($U = 0$ кВ) значение РКУС изменяется от $\theta = 35,5^\circ$ (при $t = 180$ мин) до $\theta = 61,7^\circ$ (при $t = 540$ мин), что существенно превышает РКУС поверхности исходного стекла ($\theta = 18,9^\circ$). Увеличение интегрального потока, ассистируемых осаждение покрытия ионов, с $3,2 \cdot 10^{16}$ до $8,1 \cdot 10^{16}$ Mo^+/cm^2 также приводит к росту степени гидрофильности поверхности, но в большей степени, чем в безпотенциальном режиме осаждения покрытия. Достижение интегрального потока ионов величины $11,0 \cdot 10^{16}$ Mo^+/cm^2 , приводит к тому, что поверхность системы Мо-покрытие/стекло становится гидрофобной и РКУС увеличивается до значения $\theta = 93,9^\circ$.

В результате проведенных исследований установлено, что на смачиваемость поверхности влияют условия осаждения покрытия, морфология поверхности (шероховатость поверхности), а также химический состав модифицированной поверхности. Полученные результаты демонстрируют возможность управления шероховатостью и смачиваемостью поверхности структур пленка/стеклянная подложка путем осаждения Мо-покрытия на стекло разными интегральными потоками ионов, формируя покрытия состав, которых перспективен в

качестве создания тыльных контактов поглощающих слоев солнечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С., Тульев В. В. Влияние параметров ионно-ассистированного осаждения на формирование Me/Si структур // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 74–76.

2. Bobrovich O. G., Mikhalkovich O. M., Tashlykov I. S. Composition and morphology of Ti and W coatings deposited on silicon during ion-beam assistance // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Vol. 6, no. 3. P. 229–233.

УДК 539.1.06:539.23.234

В.В. Тульев, канд. физ.-мат. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

ИЗУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТРУКТУР Me/Si, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

На пластины кремния наносились покрытия на основе Ti и Co методом ионно-ассистированного осаждения в вакууме. Осаждение металлосодержащих покрытий осуществлялось при ускоряющем напряжении 7 кВ и плотности ионного тока $\sim(4-5)$ мкА/см², время осаждения покрытий составляло 2 часа, средняя скорость нанесения покрытия находилась в пределах 0,2–0,5 нм/мин. Отношение J_i/J_a плотности потока J_i ассистирующих ионов к плотности потока J_a нейтральных атомов составляло 0,1–0,4, что соответствует условию роста покрытия на подложке. В рабочей камере в процессе осаждения покрытий поддерживался вакуум при давлении $\sim 10^{-2}$ Па.

Послойный элементный анализ проводился методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием RUMP. Определения содержания водорода в полученных Me/Si-структурах было проведено с помощью метода ядерных реакций (ЯР). Для этого использовалась резонансная ядерная реакция при взаимодействии ионов азота с водородом ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$. Распределение водорода по глубине было определено при сканировании поверхности образцов пучком ионов N^+ с энергией, изменяющейся в интервале 6380–7000 МэВ через 10 кэВ в зависимости от толщины анализируемого слоя. Преобразование шкалы энергии p^+ в шкалу глубины было сделано, используя тормозную способность

ионов азота, полученную с помощью программы TRIM на основании состава покрытий, смоделированного по данным POP (рис. 1).

Анализ спектров POP показал, что на поверхности кремния формируется покрытие (сигнала от атомов кремния сдвигается в область меньших каналов (рис. 1, кривая 2)). Согласно данным POP в состав покрытия входят помимо атомов осаждаемого металла, атомы технологических примесей углерода и кислорода (рис. 1). В спектрах POP от исходных образцов кремния (рис. 1, кривая 1) сигналы от атомов С и О не наблюдаются.

Моделирование экспериментальных спектров POP с применением компьютерной программы RUMP показало наличие в сформированных структурах атомов водорода.

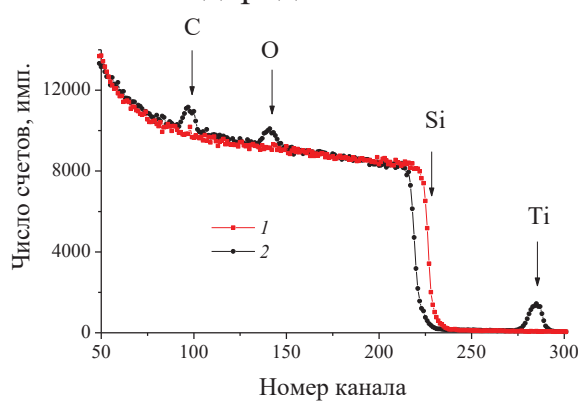
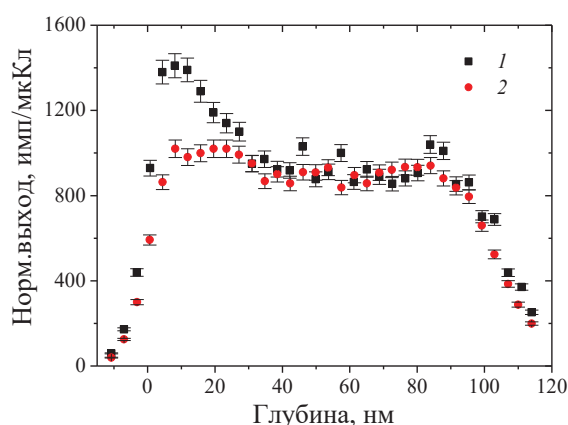


Рисунок 1 – Спектры POP ионов гелия от образца кремния до (1) и после осаждения титанового покрытия (2)

Метод POP ионов гелия не позволяет напрямую обнаружить атомы водорода в анализируемом слое. Для обнаружения атомов водорода в сформированных покрытиях были проведены эксперименты с применением метода ядерных реакций (ЯР). Результаты эксперимента подтверждают данные моделирования RUMP о наличии водорода в сформированных покрытиях. Причем в приповерхностных слоях исходных подложек кремния атомы водорода не были обнаружены. Это указывает на тот факт, что атомы водорода появляются в покрытии в процессе его осаждения. Источником водорода в покрытиях, как кислорода и углерода, также, на наш взгляд, является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса. При последующих сканирования поверхности анализирующим пучком ионов N^+ слоевая концентрация (Nt) атомов водорода в приповерхностном слое уменьшается (рис. 2), а после 4 или 5-го сканирования практически не изменяется и становится равной согласно данным эксперимента $\sim 1,6 \cdot 10^{16}$ ат/см² для Co/Si-структуры (рис. 2) и $\sim 1,4 \cdot 10^{17}$ ат/см² для Ti/Si-структуры (табл.).



**Рисунок 2 – Распределение водорода по глубине в Co/Si-структуре
1 – 1-е сканирование поверхности, 2 – 5-е сканирование поверхности**

Уменьшение концентрации водорода в приповерхностных слоях структур под воздействием анализирующего пучка можно объяснить дегазацией атомов водорода, которые оказались химически слабо связаны с другими атомами покрытия. При первом сканировании (рис. 2) измеряемая слоевая концентрация водорода в $\sim 1,13$ – $1,31$ раза больше, причем для покрытия на основе Ti наблюдается наибольшая концентрация атомов водорода, что можно связать с его высокой адсорбционной способностью.

**Таблица – Содержание водорода в приповерхностных слоях
Ti/Si-структуры при различном числе сканирований**

Номер сканирования	Глубина слоя, нм	N , ат/см ³	(nt) , см ⁻²	C, ат. %
1	125,7	$1,47 \cdot 10^{22}$	$1,85 \cdot 10^{17}$	19,89
2		$1,15 \cdot 10^{22}$	$1,45 \cdot 10^{17}$	16,73
3		$1,10 \cdot 10^{22}$	$1,38 \cdot 10^{17}$	16,39
4		$1,10 \cdot 10^{22}$	$1,38 \cdot 10^{17}$	15,76
5		$1,12 \cdot 10^{22}$	$1,41 \cdot 10^{17}$	15,76

Исследование приповерхностных слоев Me/Si, полученных ионно-ассистируемым осаждением металлсодержащих покрытий, проведенных с применением методов РОР и ЯР показали, что сформированные покрытия на основе Co и Ti содержат помимо атомов осаждаемого металла (Co, Ti) и атомов технологических примесей (C, O), атомы водорода ~ 15 – 17 ат.%. Источником водорода в покрытиях (как углерода и кислорода) является летучая фракция углеводорода вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса. Концентрация водорода уменьшается при повторных сканированиях образцов пучком анализирующих ионов, что связано с дегазацией атомов H, которые не связаны с атомами покрытия. В покрытии остается $\sim 1,4 \cdot 10^{17}$ ат/см² для Ti/Si-структуры и $\sim 1,6 \cdot 10^{16}$ ат/см² для Co/Si-структуры.