

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР МЕТАЛЛ/КРЕМНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

На пластины кремния наносились покрытия на основе металла (Ti, Zr, Mo) методом ионно-ассистированного осаждения в вакууме. Осаждение металлосодержащих покрытий осуществлялось при ускоряющем напряжении 5 – 10 кВ и плотности ионного тока $\sim(4-6)$ мкА/см². Время осаждения покрытий t составляло 1–6 ч, средняя скорость нанесения покрытия находилась в пределах 0,5–2,0 нм/мин. Отношение плотности потока J_i ассистирующих ионов к плотности потока J_a нейтральных атомов составляло $J_i / J_a = 0,2-0,6$, что соответствует условию роста покрытия на подложке. В процессе осаждения покрытий в рабочей камере поддерживался вакуум при давлении $\sim 10^{-2}$ Па.

Послойный элементный анализ проводился методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием RUMP [1]. 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 ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$.

На рис. 1 представлены спектры РОР от кремниевого образца до и после осаждения покрытия на основе Zr.

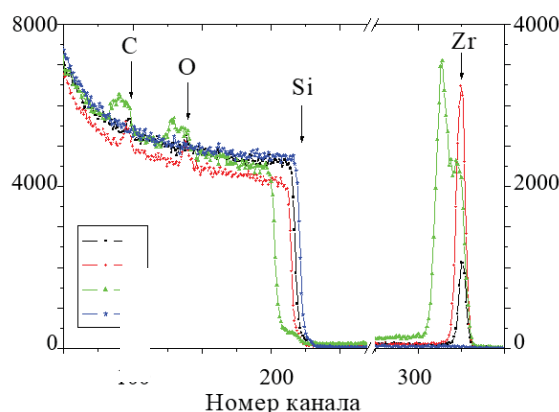


Рисунок 1 – Спектры РОР ионов гелия от образцов Si, после ионно-ассистированного осаждения покрытия на основе Zr при различном времени осаждения t : 1 – 1 час; 2 – 3 часа; 3 – 6 часов; 4 – исходный образец Si

Анализ спектров РОР показал, что на поверхности кремния формируется покрытие, в состав которого входят помимо атомов осаждаемого металла, атомы технологических примесей углерода и кислорода

[2]. На основе данных POP были рассчитаны слоевые концентрации компонентов в структурах Zr/Si. Данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Слойные концентрации компонентов в Zr/Si-структуре, рассчитанные по данным POP

Образец	Время осаждения покрытия t , час	Слойная концентрация (Nt), 10^{16} атом/см ²		
		C	O	Zr
Zr/Si	1	10,0	3,7	0,5
	3	22,2	8,8	2,0
	6	76,5	41,0	6,5

Из экспериментальных данных видно, что сформированные Zr/Si-структуры содержат $\sim(4-6)\%$ атомов циркония, $\sim(60-70)\%$ атомов углерода и $\sim(25-35)\%$ атомов кислорода.

На рис. 2 представлены профили распределения элементов по глубине в Mo/Si-структуре, полученной моделированием RUMP на основе экспериментальных данных спектров POP.

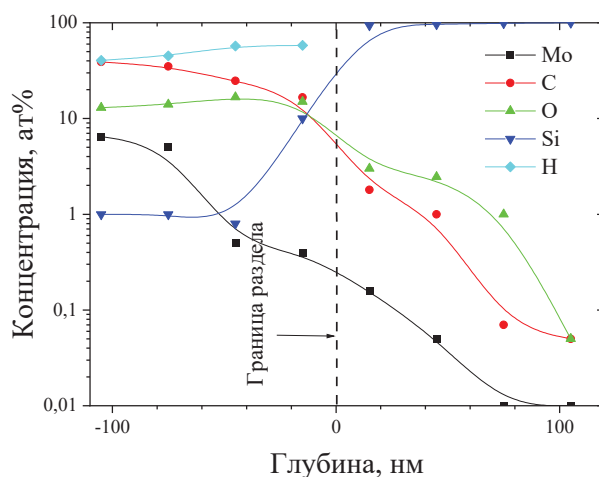


Рисунок 2 – Профили распределения элементов по глубине в Mo/Si-структуре

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в состав сформированной структуры, помимо атомов осажденного металла (~ 5 ат. %), атомов кремния из подложки (10–15 ат. %), углерода (20–25 ат. %) и кислорода (10–15 ат. %) входят атомы водорода (30–40 ат. %).

Анализ данных спектров POP и результатов моделирования RUMP структур Ti/Si, Mo/Si, Zr/Si показывает, что в состав сформированных покрытий входят атомы осажденного металла ($\sim 5-10$ ат. %), атомы кремния из подложки (10–15 ат. %) и атомы технологических примесей: водорода (3–15 ат. %), углерода (20–25 ат. %) и кислорода (10–15 ат. %).

На рис. 3 представлен профиль распределения атомов водорода по глубине в Zr/Si-структуре, полученный методом ЯР.

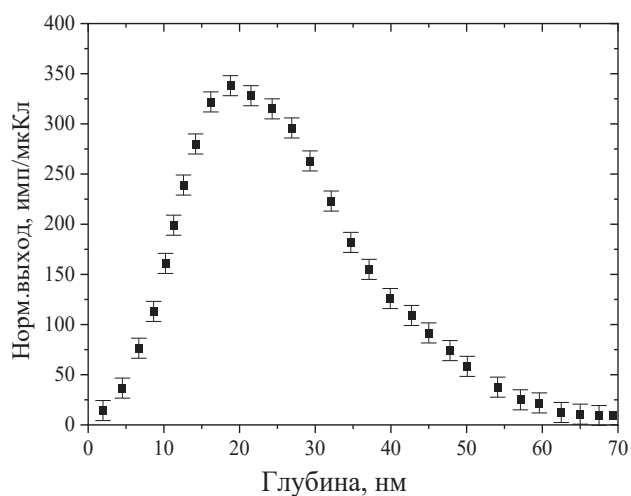


Рисунок 3 – Профиль распределение водорода по глубине в Zr/Si-структуре (время осаждения покрытия 1 час)

Результаты эксперимента с использованием ЯР подтверждают данные моделирования RUMP о наличии водорода в сформированных покрытиях. Толщина слоя, в котором обнаружены атомы водорода, соответствует толщине осажденного покрытия.

В исходных образцах 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 сканированиях поверхности анализирующим пучком ионов азота N^+ концентрация атомов водорода в приповерхностном слое уменьшается, а после 4-го или 5-го сканирования практически не изменяется (таблица 2). Слойевая концентрация водорода становится равной согласно данным эксперимента: для Zr/Si-структуры $\sim 1,0 \cdot 10^{16}$ ат/см², для Ti/Si-структуры $\sim 1,4 \cdot 10^{17}$ ат/см² и для Mo/Si-структуры $\sim 1,6 \cdot 10^{17}$ ат/см².

Таблица 2 – Содержание водорода в приповерхностных слоях Zr/Si- структуре, (время нанесения покрытия $t = 1$ час)

Число сканирований	Глубина слоя, нм	n , ат/см ³	Nt , ат/см ²	C, ат. %
1	83,3	$2,10 \cdot 10^{21}$	$3,30 \cdot 10^{16}$	3,00
5		$5,73 \cdot 10^{20}$	$0,90 \cdot 10^{167}$	0,82

Уменьшение концентрации атомов водорода в приповерхностных слоях сформированных структур под воздействием анализирующего пучка ионов азота N^+ можно объяснить дегазацией атомов водорода и его соединений водорода, которые оказались химически слабо связаны с другими атомами покрытия.

Методом ионно-ассистированного осаждения получены Ti/Si, Zr/Si и Mo/Si-структуры. Время осаждения покрытий составляло 1-6 ч при ускоряющем напряжении $U = 5-10$ кВ и плотности ионного тока $\sim 4-5$ мкА/см². В рабочей камере в процессе осаждения покрытий поддерживался вакуум при давлении $\sim 10^{-2}$ Па.

Исследования поверхности Me/Si-структур, полученных ионно-ассистированным осаждением металлосодержащих покрытий, с применением методов резерфордского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с моделированием RUMP и резонансных ядерных реакций, показали, что сформированные структуры содержат атомы осажденного металла ($\sim 5-10$ ат. %), атомы кремния из подложки (10–15 ат. %) и атомы технологических примесей: водорода (3–15 ат. %), углерода (20–25 ат. %) и кислорода (10–15 ат. %). Источником технологических примесей является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doolittle L.R. A semiautomatic algorithm for rutherford backscattering analysis // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1986. Vol. B15. P. 227–234.
2. Тульев В.В., Ташлыков И.С. Изучение композиционного состава покрытий на основе Cr, Ti и Zr, сформированных на алюминии и кремнии методом ионно-ассистированного нанесения в условиях саморадиации // Труды IV Междунар. науч. конф. «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». Томск, 2004. С. 92–95.

УДК 536.24

Т. Б. Карлович, доц. (БГТУ, г. Минск, РБ)

ИНТЕГРАЛ ДЖЕЛЕТТА ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ВОЛЧКА TIP-TOP В СЛУЧАЕ НЕНУЛЕВОГО МОМЕНТА СИЛЫ ТРЕНИЯ

Волчок tip-top является примером механической системы, которая может быть распечатана на 3D-принтере с высокой точностью и с которой можно проводить эксперименты без какого-либо специального