

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ
СЛОЕВ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-
АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ АТОМОВ ТИТАНА
И КОБАЛЬТА НА КРЕМНИИ С КСЕНОНОВЫМ МАРКЕРОМ**

На первом этапе в приповерхностные слои подготовленных образцов из кремния были внедрены атомы ксенона методом ионной имплантации. Энергия ионов Xe^+ составляла $E = 40$ кэВ, давление в вакуумной камере при имплантации было $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Ксеноновый маркер применялся для установления границы раздела покрытие/подложка [1]. На втором этапе на образцы кремния с ксеноновым маркером наносились покрытия на основе Ti и Co методом ионно-ассистируемого осаждения в вакууме. Осаждение покрытия осуществлялось при ускоряющих напряжениях ассистирующих ионов 7 кВ и плотности ионного тока $\sim(4-5)$ мкА/см², время осаждения покрытий составляло 2 и 4 часа, средняя скорость нанесения покрытия находилась в пределах 0,2–0,5 нм/мин. Отношение плотности потока J_i ассистирующих ионов к плотности потока J_a нейтральных атомов составляло $J_i / J_a = 0,1-0,4$, 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 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 изменении энергией ионов N^+ в пучке в интервале 6380–7000 МэВ через 10 кэВ в зависимости от толщины анализируемого слоя. Преобразование шкалы энергии N^+ в шкалу глубины было сделано, используя тормозную способность ионов азота, полученную с помощью программы TRIM на основании состава покрытий, смоделированного по данным РОР.

Анализ спектров РОР показал, что на поверхности образцов формируется покрытие, в состав которого входят помимо атомов осаждаемого металла (Ti, Co), атомы технологических примесей углерода и кислорода (рис. 1) [2, 3]. Моделирование экспериментальных спектров РОР с применением компьютерной программы RUMP показало,

что в приповерхностных слоях должны присутствовать атомы водорода.

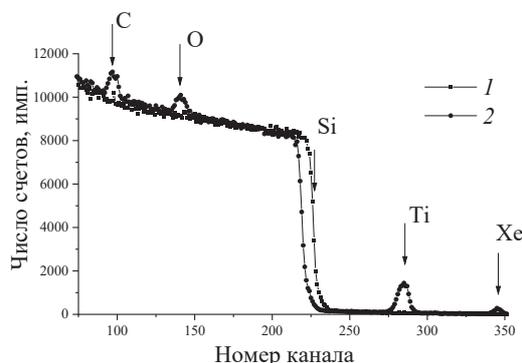
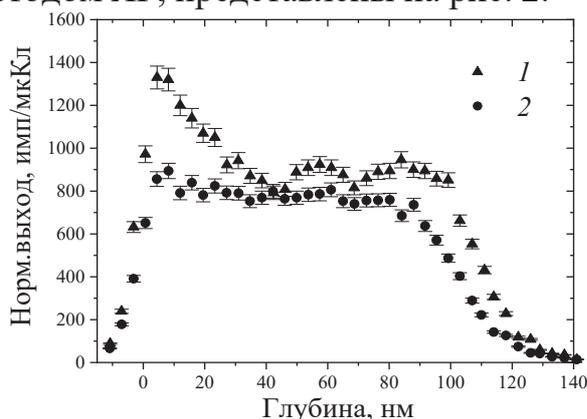


Рисунок 1 – Спектры РОР ионов гелия от образца кремния с Хе маркером до (1) и после осаждения атомов Ti (2)

Так как метод РОР не позволяет обнаружить атомы водорода в образцах, нами использовался для этого метод ЯР. Профили распределение атомов водорода по глубине в образце после осаждения атомов Со, полученные методом ЯР, представлены на рис. 2.



**Рисунок 2 – Распределение атомов водорода по глубине в образце кремния с Хе маркером после осаждения атомов Со
1 – 1-е сканирование поверхности, 2 – 5-е сканирование поверхности**

Результаты эксперимента с использованием ЯР подтверждают данные моделирования RUMP о наличии водорода в сформированных покрытиях. В исходных образцах кремния атомы водорода не были обнаружены. Это указывает на тот факт, что атомы водорода появляются в приповерхностных слоях в процессе ионно-ассистированного осаждения. Источником водорода в покрытиях, как кислорода и углерода, также, на наш взгляд, является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса.

При последующих воздействиях анализирующим пучком ионов N^+ на поверхность образцов слоевая концентрация (Nt) атомов водо-

рода уменьшается, а после 4 или 5-го сканирования практически не изменяется и становится равной согласно данным эксперимента $\sim 1,56 \cdot 10^{17}$ ат/см² для Co/Si-структуры и $\sim (1,23-1,5) \cdot 10^{17}$ ат/см² для Co/(Si+Xe)-структур (табл.).

Таблица – Содержание водорода в образцах кремния при различном времени осаждения покрытия t

Структура	t , ч	Номер сканирования	Глубина слоя, нм	n , ат/см ³	(Nt) , см ⁻²	C, ат. %
Co/(Si+Xe)	2	1	152,7	$1,14 \cdot 10^{22}$	$1,75 \cdot 10^{17}$	16,38
		5		$0,81 \cdot 10^{22}$	$1,23 \cdot 10^{17}$	11,51
	4	1	179,6	$1,41 \cdot 10^{22}$	$2,90 \cdot 10^{17}$	20,18
		5		$0,73 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	10,44
Ti/(Si+Xe)	2	1	152,7	$1,05 \cdot 10^{22}$	$1,60 \cdot 10^{17}$	15,0
		5		$0,98 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	14,0
	4	1	152,7	$1,33 \cdot 10^{22}$	$2,02 \cdot 10^{17}$	19,0
		5		$0,78 \cdot 10^{22}$	$1,19 \cdot 10^{17}$	11,2

При последующих воздействиях на поверхность образцов анализирующим пучком ионов N⁺ слоевая концентрация (Nt) атомов водорода уменьшается, а после 4 или 5-го сканирования практически не изменяется и становится равной согласно данным эксперимента $\sim (1,2-1,5) \cdot 10^{17}$ ат/см² (табл.). 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. Следует отметить, что дегазация атомов водорода более интенсивно происходит в структурах Co/(Si+Xe).

ЛИТЕРАТУРА

1. Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co)-покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний / О. Г Бобрович [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №1. – С. 54–58.
2. Тульев В. В. Влияние ионно-ассистируемого осаждения металлосодержащих покрытий на содержание водорода в Cr/Si-, Ti/Si- и Zr/Si-структурах // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. –2020. – № 2 (236). – С. 85–88
3. Тульев В. В. Изучение поверхности структур металл / кремний, полученных ионно-ассистируемым осаждением покрытий в вакууме // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2024. – № 2 (284). – С. 31–37.