

нения в неоднородное // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2019. № 2 (224). С. 28–33.

4. Narkevich I.I. Statistical theory of nonuniform systems and reduced description in the density fluctuation theory // *Physica A*. 1982 Vol. 112 A. P. 167–192.

УДК 539.1.06:539.23.234

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

СОСТАВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТРУКТУР Ti/Si И Co/Si, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

На образцы из кремния наносились покрытия на основе Ti и Co методом ионно-ассистируемого осаждения в вакууме. В часть кремниевых образцов был имплантирован ксеноновый маркер для установления границы раздела покрытие/подложка [1]. Осаждение покрытий осуществлялось при ускоряющих напряжениях 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 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 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.

На рис. 1 представлен спектр РОР ионов гелия от образца из кремния с ксеноновым маркером до и после осаждения покрытия на основе Ti при одновременном облучении ионами Ti^+ . Вид спектра РОР от структуры Ti/(Si+Xe) позволяет сделать вывод о том, что в покрытии кроме атомов осаждаемого металла титана содержатся

атомы кислорода и углерода, которые являются технологическими примесями при использовании паромасляным диффузионным насосом и вводятся в покрытие в процессе его осаждения [2].

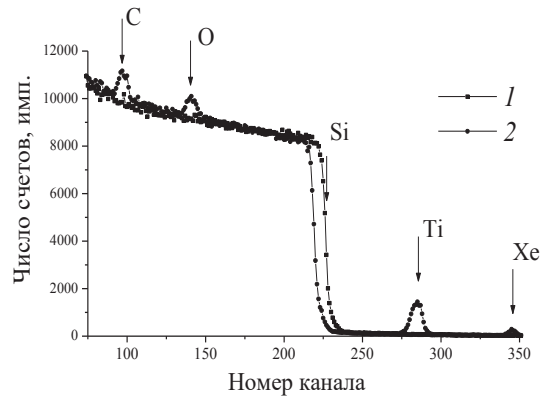
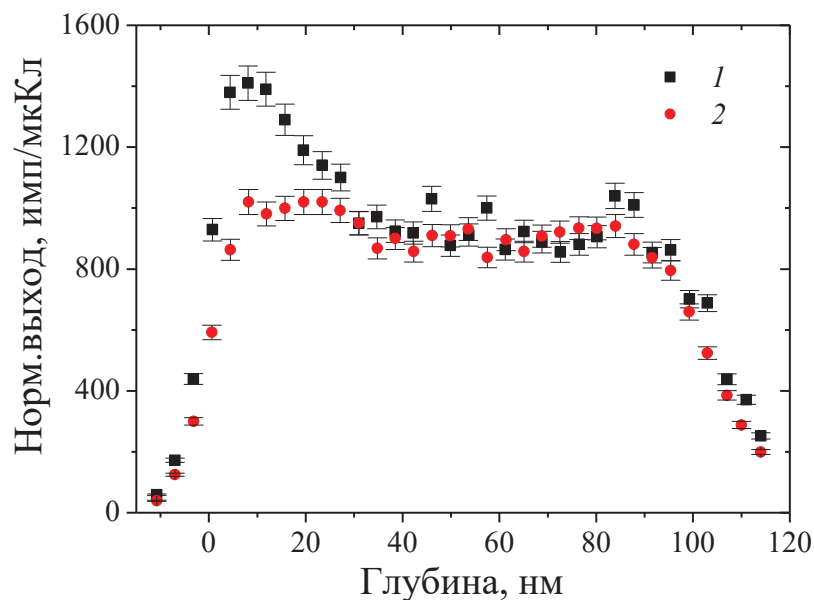
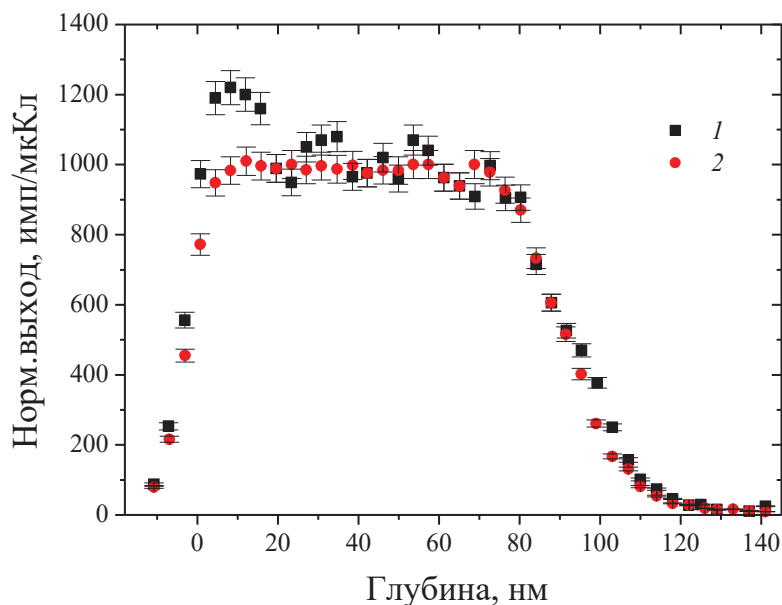


Рисунок 1 – Спектры РОР ионов гелия от образца кремния с Хе маркером до (1) и после осаждения покрытия на основе Тi (2)

Моделирование с применением компьютерной программы RUMP экспериментальных спектров РОР полученных для покрытий, сформированных в аналогичных условиях, показало наличие в сформированных структурах атомов водорода [3]. Для обнаружения атомов водорода в сформированных покрытиях были проведены эксперименты с применением метода ядерных реакций (ЯР) (рис. 2–3).



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



**Рисунок 3 – Распределение водорода по глубине в Ti/(Si+Xe)-структуре
1 – 1-е сканирование поверхности; 2 – 5-е сканирование поверхности**

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. Анализируя экспериментальные профили распределения водорода по глубине в покрытиях, представленные на рис. 2 и 3, следует отметить, что атомы водорода содержится только в покрытиях, не входя в кремний, и его концентрация достаточно постоянная по всей толщине покрытия.

При последующих сканированиях поверхности полученных структур анализирующим пучком ионов азота слоевая концентрация атомов водорода в приповерхностном слое уменьшается в $\sim 1,1-1,4$ раза (рис. 2, 3). Уменьшение концентрации атомов водорода под воздействием анализирующего пучка ионов можно объяснить дегазацией атомов водорода, которые оказались не связанными или химически слабо связаны с другими атомами покрытия.

В таблице представлены экспериментальные данные по содержанию водорода в изучаемых структурах, полученных при одинаковом времени осаждения покрытия.

Количественные данные о концентрации водорода в изучаемых

структурах, приведенные в таблице, свидетельствуют, что при первом сканировании покрытия относительная концентрация водорода в покрытиях составляет ~15–16 ат. % (для структур с Хе маркером) и ~20 ат. % (для структур без Хе маркера).

**Таблица – Содержание водорода в сформированных структурах
(время осаждения покрытия 2 ч)**

Структура	Номер сканирования	Глубина слоя, нм	n , ат/см ³	(Nt) , см ⁻²	C, ат. %
Ti/Si	1	125,7	$1,39 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	19,89
	5		$1,12 \cdot 10^{22}$	$1,40 \cdot 10^{17}$	15,93
Co/Si	1	125,7	$1,41 \cdot 10^{22}$	$1,77 \cdot 10^{17}$	20,11
	5		$1,24 \cdot 10^{22}$	$1,56 \cdot 10^{17}$	17,73
Ti/(Si+Xe)	1	152,7	$1,05 \cdot 10^{22}$	$1,60 \cdot 10^{17}$	14,97
	5		$0,98 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	14,04
Co/(Si+Xe)	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

После пятого сканирования относительная концентрация водорода уменьшается в структурах Ti/Si на 4 ат. %, в Ti/(Si+Xe) на 1 ат. %, а в структурах Co/Si и Co/(Si+Xe) на 2 и 5 ат. % соответственно. Различие в поведении водорода в Ti/Si- и Co/Si-структурах под воздействием анализирующего пучка ионов говорит о различном количестве атомов водорода находящимся в составе химических соединений в сформированной структуре. Также следует отметить, что в структурах, которые содержали ксеноновый маркер концентрация водорода меньше, чем в структурах без него. Исследование приповерхностных слоев Ti/Si- и Co/Si-структур, полученных ионно-ассистированным осаждением металлсодержащих покрытий, проведенных с применением методов РОР и ЯР показали, что сформированные покрытия содержат атомы осаждаемого металла (Co, Ti) и атомов технологических примесей (C, O), атомы водорода ~15–20 ат. %. Причем атомы водорода находятся только в осажденном покрытии. Источником водорода в покрытиях (как углерода и кислорода) является летучая фракция углеводорода вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса. Часть атомов водорода, углерода и кислорода находится в несвязанном состоянии, о чем свидетельствует их выделение из покрытия под действием пучка ионов азота. Концентрация водорода уменьшается при повторных сканированиях образцов пучком анализирующих ионов, что связано с дегазацией атомов водорода, которые не связаны или химически слабо связанные с атомами покрытия. В покрытиях остается ~от 12 до 16 ат. % водорода в связанном состоянии. Наличие в исходных образцах атомов ксенона также влияет на содержание водорода в покрытии.

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. Бобрович О.Г., Тульев В.В. Анализ композиционного состава и химических связей элементов металлосодержащих (Zr,W) покрытий // Физика. Известия высших учебных заведений. 2011, № 1/3. С. 350–354.

3. 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 543.423

Н.В. Тарасенко; А.В. Буцень²

¹(Институт физики НАН Беларуси); ²(БГТУ, г. Минск)

ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В ЖИДКОСТИ

В последнее время большое внимание уделяется разработке методов синтеза и исследованию свойств наноразмерных частиц (НЧ) различных материалов. Интерес к таким объектам обусловлен их специфическими свойствами, привлекательными для многих практических применений.

Среди новых методов получения НЧ важное место принадлежит методу, основанному на импульсной лазерной абляции в жидкости

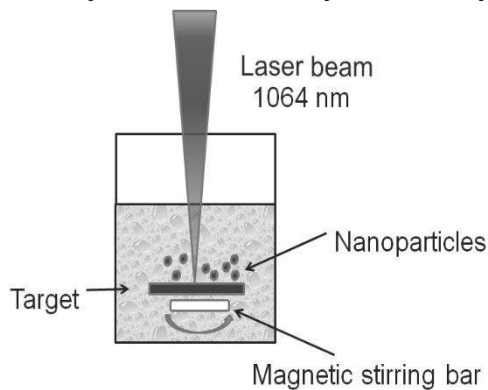


Рисунок 1 – Схема лазерной абляции в жидкости

(ИЛАЖ) [1], схема которого приведена на рис. 1. Наночастицы, образующиеся в результате лазерной абляции в жидкостях, свободны как от посторонних ионов, так и от поверхностно-активных веществ, что для ряда применений, например, в медицине, представляет несомненное преимущество. К достоинствам метода лазерной абляции относится также его универсальность (лазерная