

2. Нифонтов, С. В. Применение скрытых марковских моделей в текстонезависимых системах идентификации пользователей по голосу / С. В. Нифонтов, Ю. С. Белов // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2016. – № 2(6). – С. 116-124. – EDN WPNCVL.

3. Третьяков, И. А. Реализация и тестирование автоматизированной системы текстонезависимой идентификации диктора / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина // Импортозамещение, научно-техническая и экономическая безопасность: сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2022» в 3 т. (Минск, 07–09 декабря 2022 г.). – Т. 2. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 338-342. – EDN ENMOZX.

4. Третьяков, И. А. Исследование алгоритмов лингвистического описания участков экспериментальных кривых / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 26-30. – EDN XWVUAZ.

5. Третьяков, И. А. Выбор критерия подобия скрытых марковских моделей в АСНИ / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VIII Международной научной конференции (Донецк, 25–27 октября 2023 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2023. – С. 233-236.

УДК 539.1.06:539.23.234

В.В. Тульев

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ХРОМА НА ОБРАЗЦЫ ИЗ Si И Al

Аннотация. В работе представлены экспериментальные результаты по изучению распределения элементов в Cr/Si- и Cr/Al-структурах, сформированных методом ионно-ассистируемого осаждения в вакууме. Распределение элементов по глубине в сформированных покрытиях изучались методами резерфордского обратного рассеяния ионов гелия и резонансных ядерных реакций.

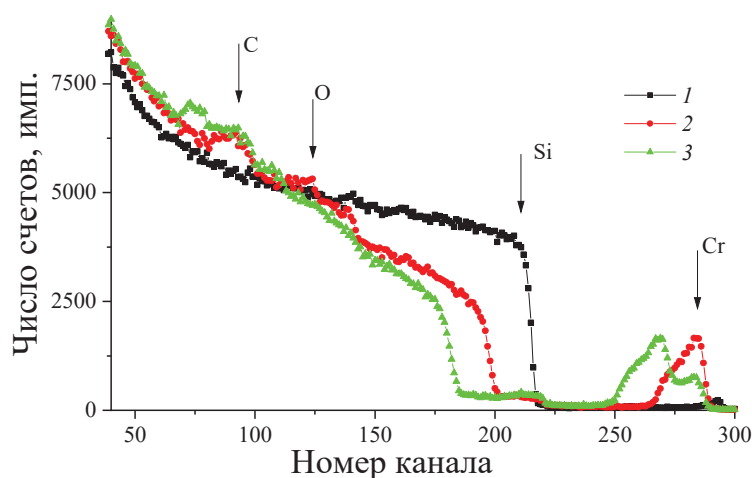
**STUDY OF THE ELEMENTAL COMPOSITION
OF NEAR-SURFACE LAYERS OF STRUCTURES OBTAINED
BY ION-ASSISTED DEPOSITION OF CHROME
ON A SUBSTRATE FROM Si AND Al**

Abstract. The article presents experimental results on studying the distribution of elements in Cr/Si and Cr/Al structures formed by ion-assisted deposition in a vacuum. The depth distribution of elements in the formed coatings was studied using Rutherford backscattering of helium ions and resonance nuclear reactions.

На образцы из кремния и алюминия наносились покрытия на основе Cr методом ионно-ассистированного осаждения в вакууме [1, 2]. Осаждение покрытия осуществлялось при ускоряющих напряжениях 10 кВ и плотности ионного тока $\sim(4-5)$ мкА/см², время осаждения покрытий составляло 1 и 3 часа. После 1 часа осаждения покрытия процесс был остановлен, и часть образцов была извлечена из вакуумной камеры. Отношение плотности потока J_i ассистирующих ионов к плотности потока J_a нейтральных атомов составляло $J_i/J_a = 0,2-0,3$, 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 [3]. Метод резонансных ядерных реакций (ЯР) использовался для обнаружения водорода в полученных структурах. Для этого использовалась резонансная ядерная реакция при взаимодействии иона азота с атомом водорода ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$. 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 представлены спектры РОР от образца из кремния до и после осаждения покрытия на основе Cr.



**Рис. 1 - Спектры РОР ионов гелия от Si (1) и Cr/Si-структуры (2, 3)
2 – 1 час осаждения покрытия; 3 – 3 часа осаждения покрытия**

Анализ спектров РОР показал, что на поверхности кремния формируется покрытие (сигнал от атомов кремния сдвигается в область меньших каналов (рис. 1, кривая 2)). Согласно данным РОР в состав покрытия входят помимо атомов Cr, атомы технологических примесей углерода и кислорода. Об этом свидетельствуют соответствующие пики на спектре (рис. 1, кривая 2). В спектрах РОР от исходного образца кремния (рис. 1, кривая 1) пики сигналов от атомов C и O не наблюдаются. Также необходимо отметить, что в состав покрытия входят атомы кремния из подложки. Об этом говорит «ступенька» от сигнала атомов кремния в области 200-220 канала (рис. 1, кривая 2). Аналогичные результаты наблюдаются и для Cr/Al-структур.

На рис. 2 представлены профили распределения элементов по глубине в Cr/Al-структуре, полученной на основе экспериментальных данных спектров РОР. Анализ показывает, что в состав сформированной структуры, помимо атомов осажденного металла (~10-18 ат. %) и атомов алюминия из подложки (10-15 ат. %), входят атомы технологической примеси углерода (~60-70 ат. %) и кислорода (20-30 ат. %).

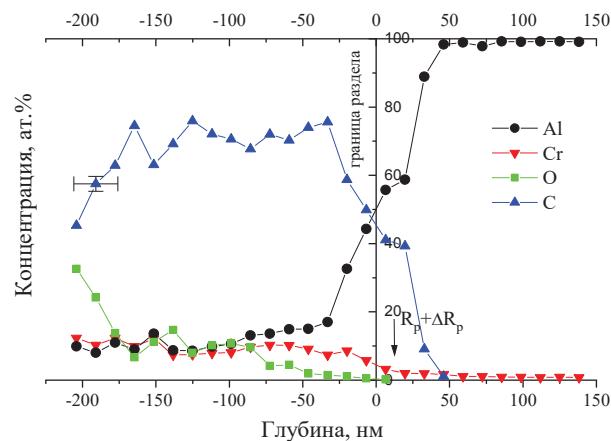


Рис. 2 - Профили распределения элементов по глубине в структуре Cr/Al (время осаждения покрытия 1 час)

Однако моделирование экспериментальных спектров РОР программой RUMP [3] показало, что в осажденном покрытии должны присутствовать атомы водорода (рис. 3).

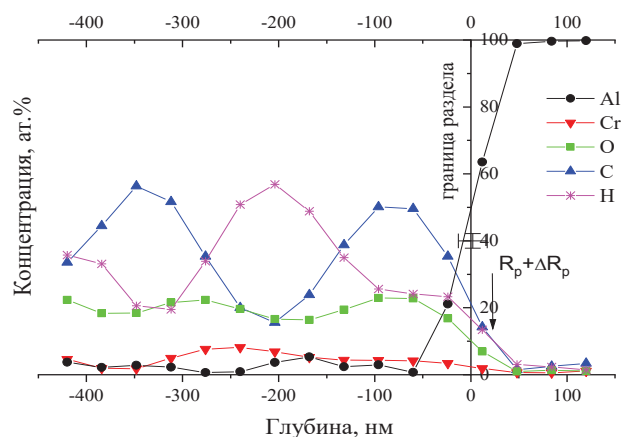


Рис. 3 - Профили распределения элементов по глубине в структуре Cr/Al (время осаждения покрытия 3 часа), полученные моделирование RUMP

Содержания водорода в сформированных Cr/Si-структурах определялось методом резонансных ядерных реакций. На рис. 4 представлен профиль распределения атомов водорода по глубине в Cr/Si-структуре. Следует отметить, что толщина слоя, в котором обнаружены атомы водорода, соответствует толщине осажденного покрытия.

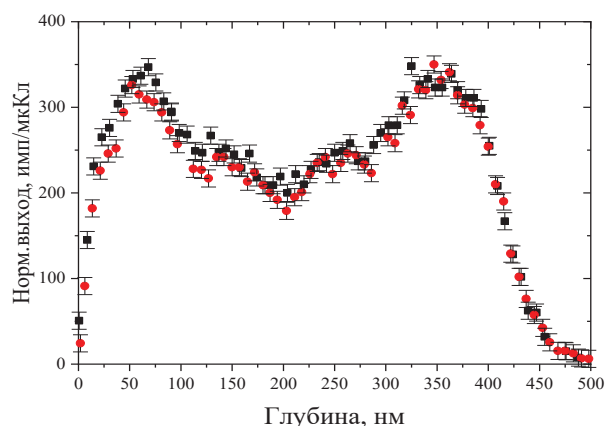
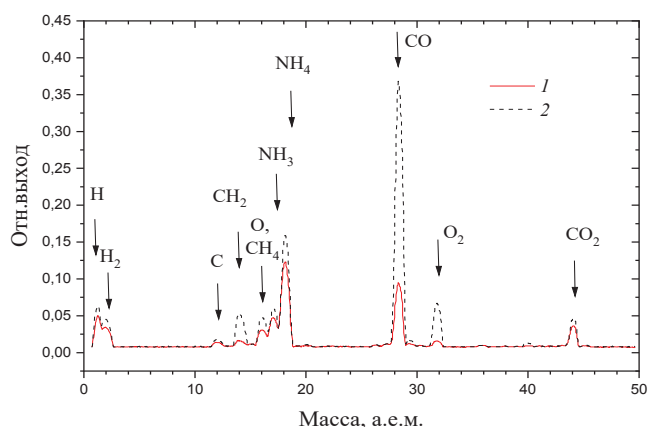


Рис. 4 - Распределение водорода по глубине в структуре Cr/Al (время осаждения покрытия 3 часа)

Экспериментальные результаты, полученные методом ЯР, подтверждают результаты моделирования RUMP. В приповерхностных слоях кремния атомы водорода не были обнаружены методом ЯР. Это указывает на тот факт, что атомы водорода появляются в покрытии в процессе его осаждения. Источником водорода, а также кислорода и углерода [4, 5], является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса.

На рис. 4 представлены данные масс-спектрометрического анализа состава компонентов сформированного покрытия, выделяющихся под воздействием пучка анализирующих ионов.



**Рис. 5 - Данные масс-спектрального анализа состава элементов, выделяющихся из образцов под воздействием пучка анализирующих ионов при ЯР:
1 – Si; 2 – Cr/Si структура**

Анализа состава компонентов показывает, что в процессе измерений из покрытия выделяются атомы водорода, углерода, кислорода, молекулы водорода и кислорода, молекулы соединений углерода с кислородом и водородом, а также соединений водорода с азотом, введенного при исследовании.

Исследования приповерхностных слоев Cr/Si- и Cr/Al-структур проведенные с применением методов резерфордского обратного рассеяния и резонансных ядерных реакций показали, что сформированные структуры содержат атомы осаждаемого металла (5–8 ат. %), атомы из подложки (8–12 ат. %), а также атомы технологических примесей водорода (15–20 ат. %), углерода (25–35 ат. %) и кислорода (15–25 ат. %). Источником технологических примесей является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса.

Список использованных источников

1. Тульев В. В. Изучение поверхности структур металл–титан, полученных ионно-ассистированным нанесением металлсодержащих покрытий // Труды БГТУ. Сер. 3. Физико-математические науки и информатика. 2018. № 2(212). С. 67–70.

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

3. Doolittle L. R. A semiautomatic algorithm for rutherford backscattering analysis // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1986. Vol. B15. P. 227–234.

4. Изучение металлсодержащих (Ti, Co) покрытий, осажденных на кремний при ионном ассистировании, ядерно-физическими методами / Бобрович О.Г. [и др.]. // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 1. С. 54–58.