

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ И УГЛЕРОДНЫХ ПОДЛОЖЕК В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Поплавский В.В., Бобрович О.Г., Дорожко А.В., Матыс В.Г.

УО «Белорусский государственный технологический университет»

220006, Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

Телефон: +375 17 399 49 60

E-mail: vasily.poplav@tut.by

Слои на поверхности образцов из алюминия марки А7, алюминиевого сплава Д16Т, графита МГ-1 и стеклоуглерода СУ-2000 формировали в процессе ионно-ассистируемого осаждения ряда металлов, в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения используются ионы осаждаемого металла. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностным слоем подложки ускоренными ($U = 20$ кВ) ионами того же металла проводили в экспериментальной установке соответственно из нейтральной фракции пара и плазмы импульсного вакуумного ($p \sim 10^{-2}$ Па) дугового разряда. Частота следования импульсов составляла 50 Гц, плотность тока ионов – $\sim 2\text{--}5$ мкА/см².

Морфологию и состав получаемых поверхностных слоев исследовали методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского микроанализа, спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (РОР) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Электронно-микроскопические исследования поверхности образцов совместно с энергодисперсионным микроанализом проведены с применением электронного микроскопа JSM-5610LV и спектрометра EDX JED-2201 (JEOL). Энергия электронов, сканирующих поверхность, составляла 20 кэВ. Спектрометрия РОР выполнена на ускорительном комплексе AN-2500 (High Voltage Engineering Europe). Измерены спектры рассеяния ионов ⁴He при нормальном падении пучка анализирующих частиц на поверхность образца и угле рассеяния $\theta = 170^\circ$. Энергетическое разрешение спектрометра с поверхностно-барьерным кремниевым детектором составляло 18 кэВ. Исследования методом РФС проведены с применением спектрометра ЭС2401;

в качестве возбуждающего фотоэлектронную эмиссию использовано MgK_{α} -излучение.

Установлено, что морфология поверхности образцов при формировании на них легированных слоев не изменяется. Имеются включения осаждаемых металлов размером порядка нескольких микрометров, которые обусловлены осаждением капель металла из дугового разряда ионного источника. Получены многокомпонентные слои, включающие атомы осажденного металла, компоненты материала подложки, кислород, а также углерод и водород в составе углеводородных загрязнений; их толщина достигает ~ 100 нм; содержание атомов каждого из осажденных металлов в слоях – $\sim n \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

При исследовании с применением спектрометрии ROP образцов алюминия, подвергнутых легированию в процессе ионно-ассистированного осаждения вольфрама, обнаружено, что в отличие от осаждения других металлов на поверхности образуется слой, в состав которого наряду с легирующим металлом, кислородом и углеродом входит материал подложки – алюминий (рис. 1).

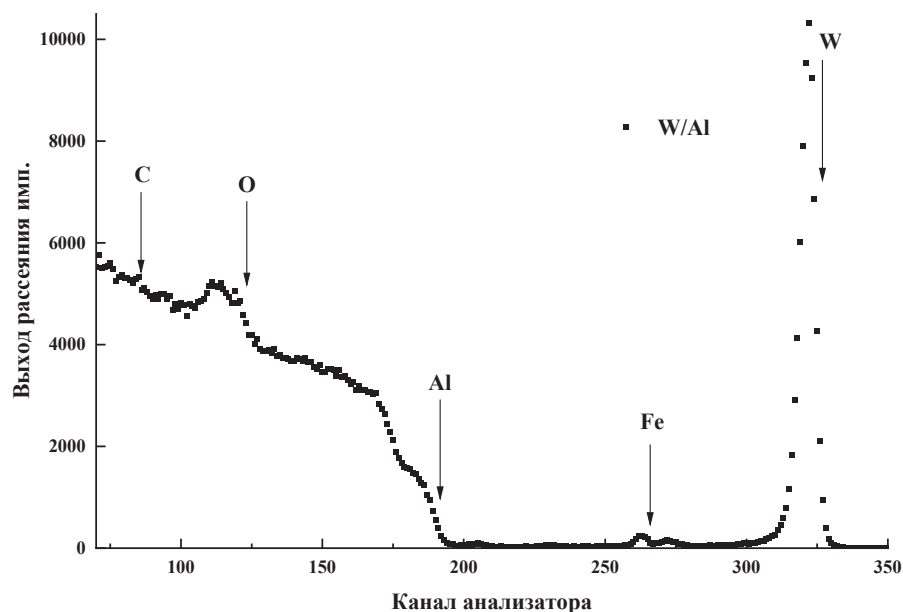


Рисунок 1 – Спектр ROP ионов ^4He ($E_0 = 1,5$ МэВ) на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоя, сформированного на алюминии А7 в процессе ионно-ассистированного осаждения вольфрама

Состав атомов элементов в исследуемом слое: $(Nt)_W = 4,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$; $(Nt)_{Al} = 2,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$; $(Nt)_O = 4,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$; $(Nt)_C = 8,4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$; $(Nt)_{Fe} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Распределены атомы вольфрама, углерода и алюминия в слое на глубину $\sim 120 \text{ нм}$, железа и никеля (примесей из деталей ионного источника) – до 50 нм . Толщина слоя, содержащего кислород, включая оксидную пленку на поверхности алюминия, 200 нм . Можно предположить, что в неравновесных условиях ионно-ассистируемого осаждения вольфрама формируется сложный оксикарбидный слой, включающий имплантируемые атомы вольфрама и диффундирующие из подложки атомы алюминия.

При легировании поверхности вентильных металлов, в т.ч. алюминия, ионами других металлов (Zr, Cr, Er, Dy), обладающих геттерными свойствами, имеет место захват молекул остаточных газов, и легированные слои локализованы практически в оксидной пленке на исходной поверхности подложек [1]. Алюминий и компоненты сплава Д16Т (Al, Mg, Cu) не выходят на поверхность (рис. 2). Атомы этих металлов в основном сосредоточены вблизи поверхности подложки: их содержание в слоях составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$, в то время как содержание атомов легирующего металла – $\sim n \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

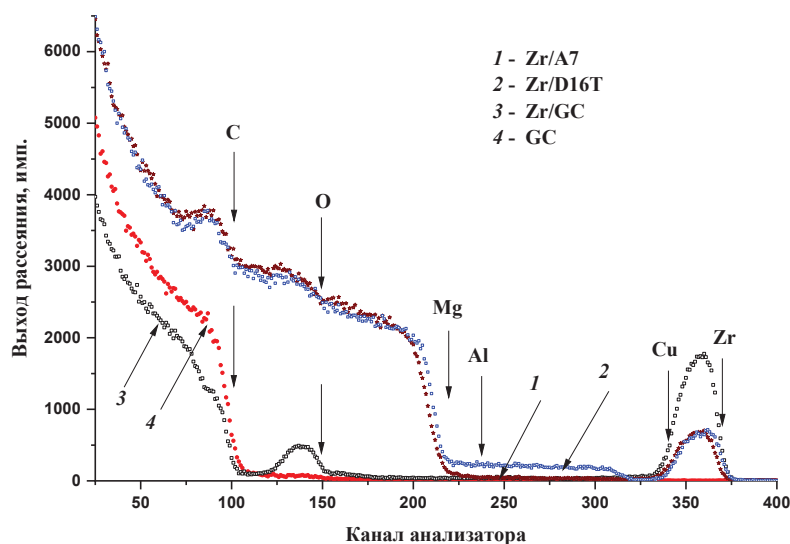


Рисунок 2 – Спектры РОР ионов ^4He ($E_0 = 1,3 \text{ МэВ}$) на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на алюминии А7, сплаве Д16Т и стеклоуглероде (GC) в процессе ионно-ассистируемого осаждения циркония

При ионно-ассистируемом осаждении металлов (Zr, W и др.) на поверхность углеродных материалов также имеет место взаимодействие атомов осаждаемого металла с атомами подложки. В состав формируемого слоя входят атомы металла, углерода и кислорода. По форме сигнала от углерода в спектрах POP Zr/GC (рис. 2) и W/MG (рис. 3) можно предположить, что возможно образование оксикарбидных фаз. При осаждении инертных металлов (Pt, Ir), на поверхности как алюминиевых, так и углеродных подложек формируются легированные металлом слои с включением кислорода (рис. 3, спектр Pt/MG).

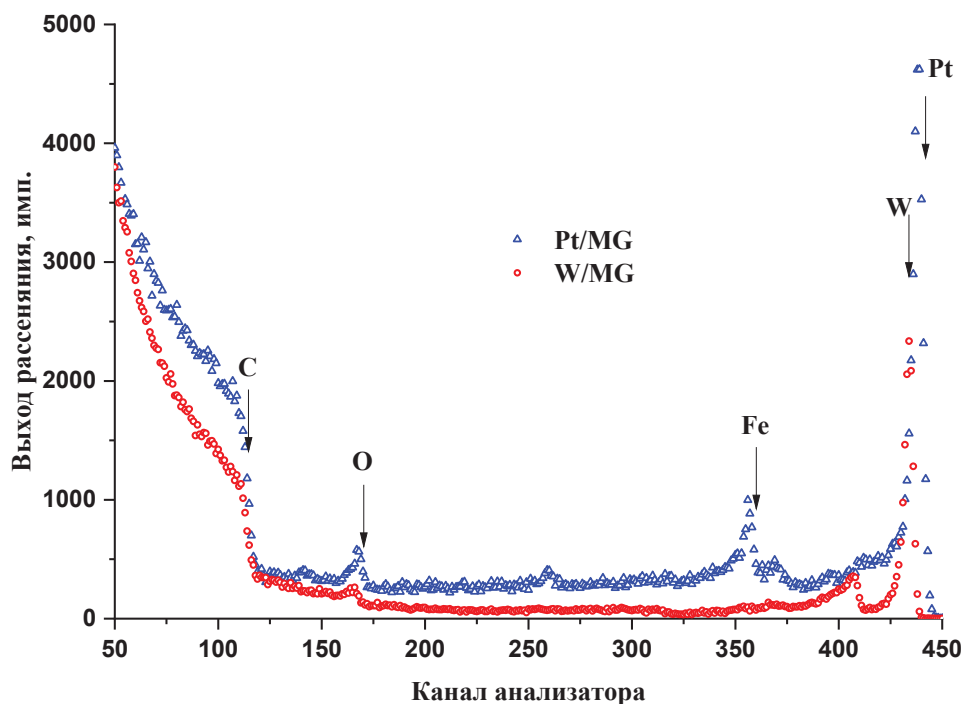


Рисунок 3 – Спектры POP ионов ^4He ($E_0 = 2,0$ МэВ) на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на графите МГ-1 (MG) в процессе ионно-ассистируемого осаждения платины и вольфрама

Исследования методом РФС подтверждают элементный состав формируемых слоев и свидетельствуют о сложности процессов их формирования. Так, в слое, полученном при осаждении вольфрама на поверхность стеклогуглерода, атомы вольфрама, а также кислорода и углерода находятся в нескольких валентных состояниях; причем набор этих состояний изменяется с расстоянием от поверхности (при ионном травлении) (рис. 4).

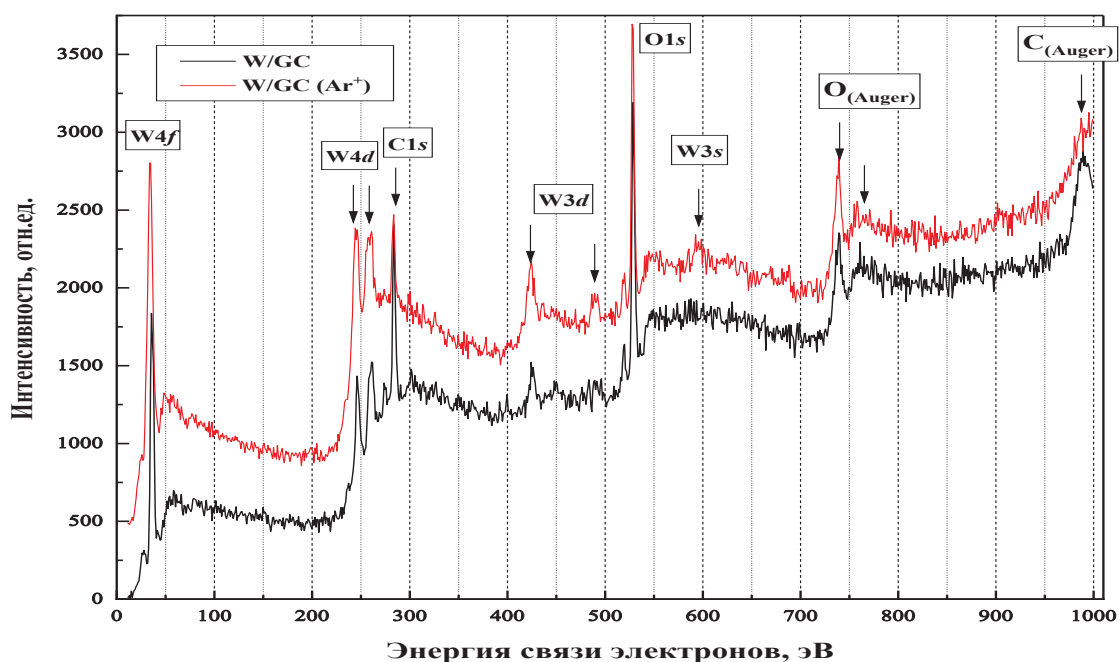


Рисунок 4 – Фотоэлектронные спектры атомов поверхности стеклогуглерода со слоем, сформированным в процессе ионно-ассистированного осаждения вольфрама, полученные до и после травления поверхности ионами аргона (W/GC, Ar^+ , 10 мкА, 5 мин)

Таким образом, при ионно-ассистированном осаждении металлов из плазмы вакуумного дугового разряда на поверхность алюминия получены многокомпонентные слои толщиной $\sim 50\text{--}100$ нм, включающие атомы осажденных металлов, компоненты материала подложки, включая кислород поверхностной оксидной пленки, а также молекулы углеводородов в качестве примесей. Причем при осаждении металлов, обладающих геттерными свойствами, в состав формируемых слоев включаются значительные количества газов; содержание атомов материала подложки в слоях незначительно. При осаждении вольфрама в отличие от многих других металлов формируются слои с включением в их состав диффундирующих из подложки атомов алюминия. Осаждение металлов на поверхность углеродных материалов приводит, предположительно, к формированию оксикарбидных фаз. При осаждении инертных металлов (Pt, Ir) как на алюминиевые, так и на углеродные подложки, формируются легированные металлом слои. Определение фазового состава слоев

затруднено вследствие их малой толщины и по данным дифракции отраженных электронов [2, 3] аморфной атомной структуры.

*Работа выполнена в рамках Государственной программы
научных исследований Республики Беларусь
“Материаловедение, новые материалы и технологии”.*

Литература

1. Поплавский В. В., Бобрович О. Г., Дорожко А. В., Матыс В. Г. Особенности формирования легированных слоев на поверхности вентильных металлов в процессе ионно-ассистированного осаждения металлов из плазмы вакуумного дугового разряда // Взаимодействие ионов с поверхностью: Труды XXVI Международн. конф. Ярославль, Россия, 21–25.08.2023. – М., 2023. – Т. 1. – С. 314–317.
2. Poplavsky V.V., Dorozhko A.V. Microstructure and Composition of Catalytic Layers Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum onto Carbon Substrates // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. – 2013. – Vol. 7, No 2. – P. 303–309.
3. Poplavsky V.V., Komarov F.F., Luhn V.G., Pil'ko V.V., Partyka J. Composition and Microstructure of Surface Layers Produced by Ion Beam Assisted Deposition of Metals from a Pulsed Arc-Discharge Plasma onto Aluminum Substrates // Acta Physica Polonica. – 2015. – Vol. 128, No 5. – P. 946–948.