

В. В. Тульев, кандидат физико-математических наук, доцент (БГТУ); **И. С. Ташлыков**, доктор физико-математических наук, профессор (БГПУ); **Д. А. Литвинов**, студент (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ НА ТОЛЩИНУ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ АТОМНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ Cu/Al-СТРУКТУР

Rutherford backscattering and RUMP simulation programme have been applied to investigate composition of Cu/Al system prepared using dynamic atomic deposition process when deposition of Cu thin film on Al substrate was assisted with 6 keV Ar⁺ ions irradiation. The thickness of Cu film was $\sim(10-15)$ nm. It was found, that the thickness of coating depends on parameter I/A (ratio the number I of assisting ions to the number A atoms deposited coating)

Методом Резерфордского обратного рассеяния иониев гелия в сочетании с компьютерным моделированием определено, что при осаждении медного покрытия на алюминий методом динамического атомного перемешивания, в котором в качестве ассистирующих иониев использовались ионы Ar⁺ с энергией 6 кэВ и интегральными потоками $(0,7-1,6) \cdot 10^{16}$ ион/см², формируется медная пленка толщиной $\sim(10-15)$ нм. Установлено что толщина сформированного покрытия зависит от параметра I/A (отношение числа I ассистирующих иониев к числу A атомов осаждаемого покрытия). При расчете толщины пленки необходимо учитывать помимо распыления ассистирующими ионами атомов покрытия, также распыление атомов подложки и атомов сопутствующих примесей.

Введение. Модификация приповерхностных слоев материалов и изделий пучками заряженных частиц и потоками плазмы активно исследуется в последние десятилетия. При этом расширяется область использования ионно-лучевых и ионно-плазменных методов, как в научных, так и практических целях [1-4]. Эти методы позволяют изменять структуры материала на сравнительно больших глубинах; формировать приповерхностные слои с повышенной микротвердостью и остаточных напряжений без изменения геометрических размеров образцов; образовывать в приповерхностном слое нитриды и карбиды, которые существенно меняют как механические, так и физико-химические свойства поверхности; вводить в мишень не только ионы различных атомов, но и химических соединений [1-5].

Одним из методов ионно-лучевого модифицирования поверхности материалов является метод динамического атомного перемешивания. Суть этого метода состоит в том, что процесс осаждения покрытий на подложку сопровождается облучением ионами инертных газов. Применение этого метода также обеспечивает хорошее сцепление осаждаемого покрытия с подложкой, при этом размеры по толщине и состав наносимых слоев не ограничиваются [6].

Основная часть. В качестве подложки использовался алюминий чистотой 99,995%, на которую наносилось медное покрытие методом динамического атомного перемешивания. Скорость осаждения покрытия r составляла $(0,120 \pm 0,005)$ нм/с, время осаждения покрытия $t = (130 \pm 2)$ с. Толщина покрытия, осаждаемого на подложку без ионного ассистирования, со-

ставляла $(15,6 \pm 0,3)$ нм. В качестве ассистирующих иониев использовались ионы аргона с энергией 6 кэВ. Диаметр ионного пучка составлял ~ 10 см. Плотность тока j в центре ионного пучка была равна $20,2 \pm 0,2$ мкА/см². По мере удаления от центра пучка плотность ионного тока уменьшалась. Зависимость плотности j ионного тока от расстояния до центра ионного пучка представлена на рис. 1.

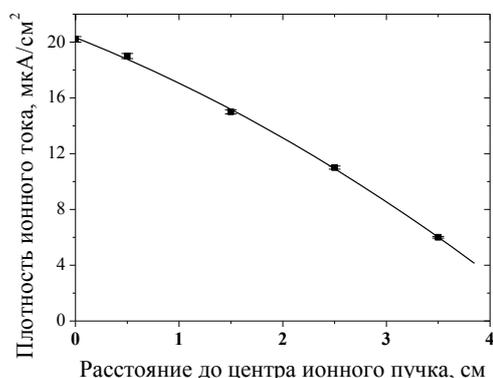


Рис. 1. Зависимость плотности ионного тока от расстояния до центра ионного пучка

Изменение плотности тока в ионном пучке приводит к тому, что интегральный поток (Φ) ассистирующих иониев аргона в пределах ионного пучка изменяется от $0,7 \cdot 10^{16}$ до $1,6 \cdot 10^{16}$ ион/см². Используя плотность ионного тока и скорость осаждения покрытия можно по формуле (1) можно рассчитать параметр I/A (отношение числа I ассистирующих иониев к числу A атомов осаждаемого покрытия).

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{F} \frac{j M}{r \rho}, \quad (1)$$

где F – постоянная Фарадея; j – плотность ионного тока; r – скорость осаждения покрытия; M – молярная масса меди; ρ – плотность меди.

Расчеты показали, что используемый ионный пучок позволяет изменять параметр I/A в интервале от 0,06 до 0,13 (рис. 2).

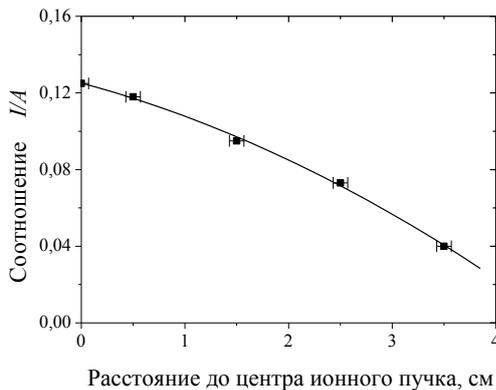


Рис. 2. Зависимость параметра I/A от расстояния до центра ионного пучка

При расчете толщины осажденного покрытия учитывались интегральные потоки асси­стирующих ионов и нейтральных атомов, а также распыление атомов покрытия:

$$d = d_0 \cdot \left(1 - S \left(\frac{I}{A} \right) \right), \quad (2)$$

где d_0 – толщина покрытия, получаемого при осаждении без ионного асси­стирования; S – коэффициент распыления меди ионами аргона.

Используя формулу (2) была рассчитана толщина d медного покрытия, которое должно сформироваться на подложке из Al при определенном значении параметра I/A . Данные представлены на рис. 3.

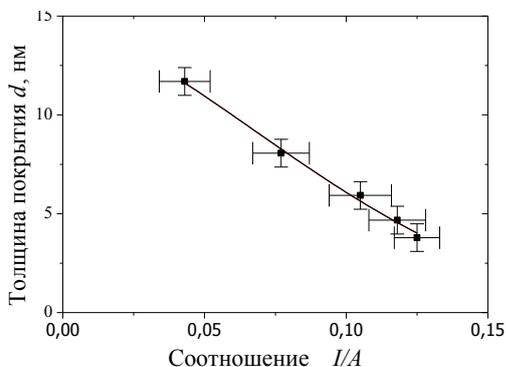


Рис. 3. Расчетная толщина d покрытия в зависимости от параметра I/A

Элементный состав, распределение компонентов покрытия по глубине и толщина покрытия определялась методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием. Энергия ионов гелия составляла 2 МэВ, угол влета 0° , угол вылета 15° , угол рассеяния 165° . Энергетическое разрешение анализирующей системы составляло 15 кэВ, что обеспечивало разрешение по глубине ~ 11 нм. Моделирование экспериментальных спектров резерфордовского обратного рассеяния выполнялось с использованием программы RUMP [7]. Исследуемый образец представлял собой пластину длиной 4 см. Спектры РОР снимались в четырех различных точках образца: на расстоянии 0,5, 1,5, 2,5 и 3,5 см от края пластины (при осаждении покрытия один край образца располагался под центром ионного пучка). Это позволило анализировать распределение компонентов по глубине в покрытии, полученном при различных потоках асси­стирующих ионов (при различных значениях параметра I/A).

Экспериментальный спектр РОР ионов гелия от структуры Cu/Al, сформированной при интегральном потоке асси­стирующих ионов $0,7 \cdot 10^{16}$ ион/см² ($I/A = 0,12$), показан на рис. 4.

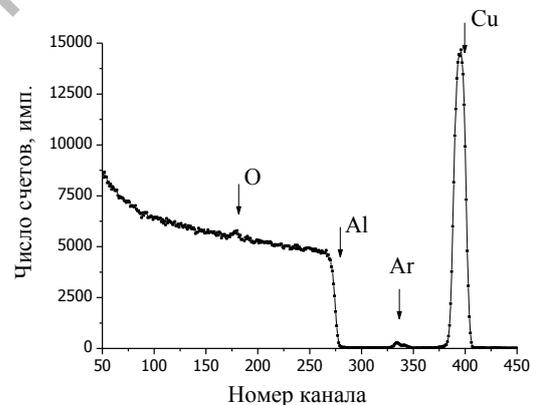


Рис. 4. Спектр РОР ионов гелия от структуры Cu/Al, полученной при интегральном потоке асси­стирующих ионов $\Phi = 0,7 \cdot 10^{16}$ ион/см²

На спектре РОР от сформированной Cu/Al структуры мы наблюдаем сигналы от атомов подложки алюминия, атомов осаждаемого покрытия меди, атомов сопутствующей примеси кислорода [4] и атомов аргона. На основе данных РОР, используя компьютерное моделирование RUMP [7], были построены концентрационные профили компонентов Cu/Al структуры, полученной при различных значениях параметра I/A (рис. 5).

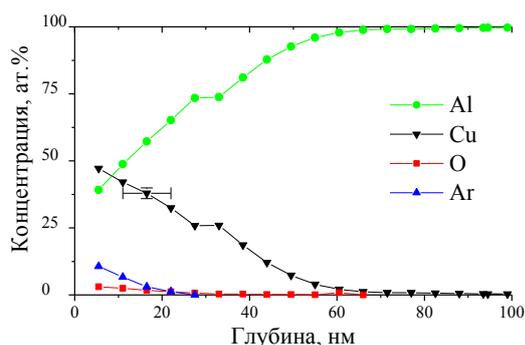


Рис. 5. Профили распределение компонентов по глубине в Cu/Al структуре, полученной при параметре $I/A = 0,08$

По данным компьютерного моделирования и используя методику [5], были экспериментально определены толщины модифицированного слоя при различных значениях параметра I/A . Сравнительные данные приведены на рис. 6.

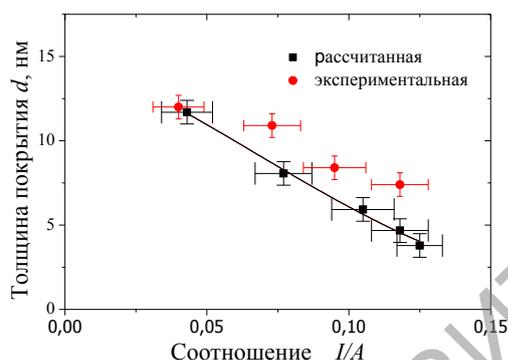


Рис. 6. Толщина покрытия в зависимости от параметра I/A

Из рис. 6 видно, что при значениях параметра ($I/A = 0,09-0,13$) экспериментально определенная толщина покрытия выше рассчитанной толщины, а при значениях ($I/A < 0,09$) приближается к рассчитанной. Так как при расчете толщины покрытия мы учитывали только распыление атомов меди ионами аргона, то наблюдаемое различие, по нашему мнению, связано с тем, что помимо распыления атомов меди, происходит преимущественное распыление атомов оксидной пленки и атом алюминия из подложки. И при более интенсивных потоках ассистирующих ионов (больших значениях I/A), когда процессы распыления играют существенную роль, количество атомов меди в пленке больше теоретически ожидаемого. Вследствие этого, экспериментально определенная толщина покрытия больше рассчитанной. При уменьшении I/A , определяющим является процесс распылению атомов меди, и толщина модифицированного слоя приближа-

ется к теоретически рассчитанной.

Заключение. Методом резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием определено, что при осаждении медного покрытия на алюминий методом динамического атомного перемешивания, в котором в качестве ассистирующих ионов использовались ионы Ag^+ с энергией 6 кэВ и интегральными потоками $(0,7-1,6) \cdot 10^{16}$ ион/см², формируются покрытия толщиной $\sim(10-15)$ нм. Установлено что толщина сформированного покрытия зависит от параметра I/A (отношение числа I ассистирующих ионов к числу A атомов осаждаемого покрытия). Следует отметить, что при расчете толщины покрытия необходимо учитывать не только процессы распыления атомов осаждаемой пленки, но и процессы распыления атомов подложки и атомов сопутствующих примесей.

Литература

1. Соболев, О. В. Влияние условий получения на фазовый состав, структуру механические характеристики вакуумно-дуговых покрытий системы Zr-Ti-Si-N / О. В. Соболев, А. Д. Погребняк, В. М. Береснев // Физика металлов и металловедение. – 2011, -Т. 112, № 2. - С. 199-206.
2. Блинков, И. В. Многофазность материала покрытий как фактор, влияющий на формирование наноструктуры и их свойств / И. В. Блинков, А. О. Волхонский, А. Г. Юдин // ФХОМ. - 2011, - № 6. - С. 57-64.
3. Авдиенко, А. А. Упрочнение поверхности конструкционных материалов и сплавов методом ионно-лучевой обработки / А. А. Авдиенко, К. И. Авдиенко // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2009, - № 12. - С. 16-27.
4. Тульев, В. В. Состав и распределение компонентов по глубине в Cu-Al структурах, формируемых методом ионного перемешивания / В. В. Тульев, И. С. Ташлыков // ФХОМ. - 2000, - № 3. - С. 14-17.
5. Изучение металлсодержащих (Ti, Co) покрытий, осажденных на кремний при ионном ассистировании, ядерно-физическими методами / О. Г. Бобрович [и др.] // ФХОМ. – 2006. - № 1. - С. 54-58.
6. Gailliard, J.P. Recoil implantation and mixing / J. P. Gailliard // Surface Engineering. Surface Modification of Materials. ed. R. Kossowski, S.C. Singhal / Westinghouse R&D Center Materials Science Division. - Pittsburg, 1984. - P. 32-47.
7. Doolittle, L. R. A semiautomatic algorithm for rutherford backscattering analysis / L. R. Doolittle // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. – 1986. – Vol. B15. – P. 227-234.