

УДК 539.1.06:539.23.234

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

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 Ar^+ с энергией 6 кэВ и интегральными потоками $(0,7-1,6) \cdot 10^{16}$ ион/см², формируется медная пленка толщиной ~10–15 нм. Установлено, что толщина сформированного покрытия зависит от параметра I/A (отношение числа I ассистирующих ионов 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.

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 ~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).

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 структуру материала; формировать приповерхностный слой с повышенной микротвердостью и остаточными напряжениями без изменения геометрических размеров образцов; получать 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 ионы химических соединений [1–5].

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

Основная часть. На подложку, в качестве которой использовался алюминий чистотой 99,995%, наносилось медное покрытие методом ДАП. Скорость осаждения покрытия r составляла $(0,120 \pm 0,005)$ нм/с, время осаждения покрытия – (130 ± 2) с. Толщина покрытия, осаждаемого на подложку без ионного ассистирования, составляла $(15,6 \pm 0,3)$ нм. В качестве ассистирующих ионов использовались ионы

аргона с энергией 6 кэВ. Диаметр ионного пучка составлял ~10 см. Плотность j ионного тока была измерена в различных точках пучка. В центре ионного пучка $j = 20,2 \pm 0,2$ мкА/см². По мере удаления от центра пучка плотность ионного тока уменьшалась. График изменения j от расстояния до центра ионного пучка представлен на рис. 1.

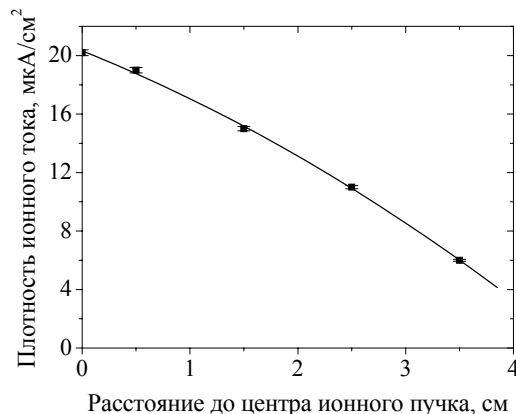


Рис. 1. Зависимость плотности ионного тока от расстояния до центра ионного пучка

Изменение плотности тока в ионном пучке приводит к тому, что интегральный поток (Φ) ассистирующих ионов аргона в пределах ионного пучка изменяется от $0,7 \cdot 10^{16}$ до $1,6 \cdot 10^{16}$ ион/см². Используя плотность j ионного тока и скорость r осаждения покрытия по формуле (1) можно рассчитать параметр I/A (отношение плотности потока I ассистирующих ионов к плотности потока 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 в ионном пучке параметр I/A изменяется в интервале от 0,04 до 0,13 (рис. 2).

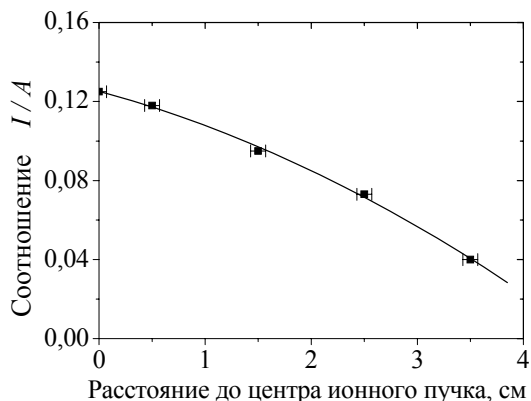


Рис. 2. Зависимость параметра I/A от расстояния до центра ионного пучка

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

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

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

С использованием формулы (2) была рассчитана толщина d медного покрытия, которое должно сформироваться на подложке из Al при определенном значении параметра I/A . Результаты расчета представлены на рис. 3.

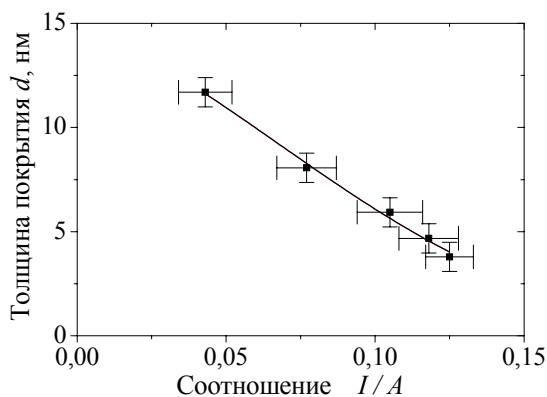


Рис. 3. Расчетная толщина d покрытия в зависимости от параметра I/A

Элементный состав, распределение компонентов покрытия по глубине и толщина покрытия определялись 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.

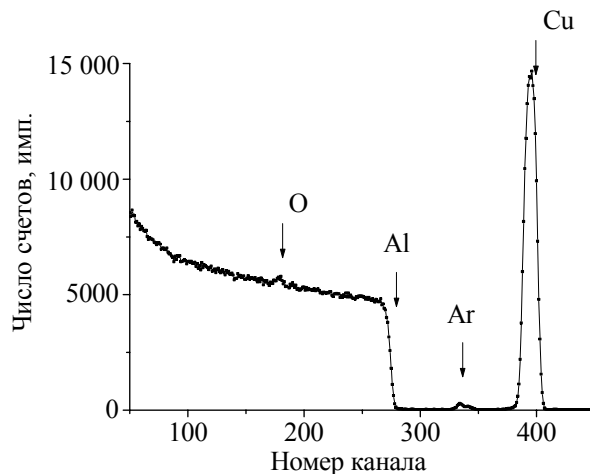


Рис. 4. Спектр РОР ионов гелия от структуры Cu/Al, полученной при интегральном потоке ассистирующих ионов $\Phi = 0,7 \cdot 10^{16}$ ион/см²

На спектре РОР (рис. 4) наблюдались 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).

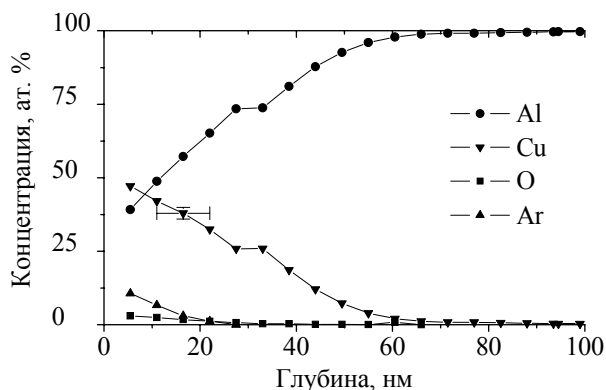


Рис. 5. Профили распределения компонентов по глубине в Cu/Al-структуре, полученной при параметре $I/A = 0,08$

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

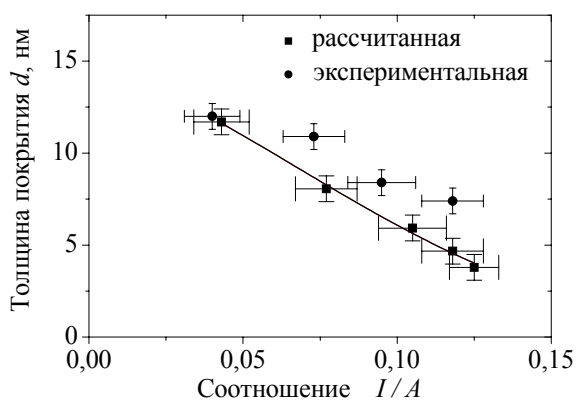


Рис. 6. Толщина покрытия в зависимости от параметра I/A

Из рис. 6 видно, что при значениях параметра $I/A = 0,07-0,13$ экспериментально определенная толщина покрытия выше рассчитанной толщины, а при значениях $I/A < 0,07$ 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 атомов 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 распыления атомов меди и толщина модифициро-

ванного слоя приближается 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 металлосодержащих (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. – Pittsburg: Westinghouse R&D Center Materials Science Division, 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.

Поступила 01.03.2013