

УДК 539.1.06:539.23.234

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

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ НА ТОЛЩИНУ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ АТОМНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ Pd/Fe-СТРУКТУР

Методом Резерфордского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием определено, что при осаждении Pd-покрытия на железо 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/см<sup>2</sup> формируется Pd-пленка толщиной  $\sim(14-23)$  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.

Rutherford backscattering and RUMP simulation programmer have been applied to investigate composition of Pd/Fe system prepared using dynamic atomic deposition process when deposition of Pd thin film on Fe (99,5%) substrate was assisted with 6 keV  $Ar^+$  ions irradiation. The thickness of Pd film was  $\sim(14-23)$  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.** Ионно-лучевые методы модифицирования структуры и свойств приповерхностных слоев материалов и изделий достаточно широко исследуются и применяются в последние десятилетия [1–4]. Эти методы позволяют изменять структуру и состав поверхности материалов; формировать слой с повышенными физико-механическими, физико-химическими и другими свойствами; получать сплавы и соединения, состав которых невозможно получить традиционными способами, и т. д. [1–6].

На структуру и свойства приповерхностных слоев материалов, модифицированных ионно-лучевыми методами, влияют разнообразные факторы: природа атомов подложки, покрытия, и сопутствующих примесей, плотность ионного тока, скорость и время осаждения покрытий, энергия и интегральный поток ассистирующих ионов, коэффициенты распыления покрытия и подложки и др. [1–5]. В данной работе изучалось влияние параметра  $I/A$  (отношение плотности потока  $I$  ассистирующих ионов к плотности потока  $A$  атомов осаждаемого покрытия) на толщину покрытия, сформированного методом динамического атомного перемешивания (ДАП). В этом методе процесс осаждения покрытий на подложку сопровождается облучением ионами инертного газа.

**Основная часть.** В качестве подложки использовалось железо чистотой 99,5%. На нее наносилось палладиевое покрытие методом динамического атомного перемешивания. Скорость осаждения покрытия  $r$  составляла  $(0,130 \pm 0,005)$  нм/с, время осаждения покрытия –  $(130 \pm 2)$  с. Толщина покрытия, осаждаемого на подложку без ионного ассистирования,

составляла  $(19,8 \pm 1,1)$  нм. В качестве ассистирующих ионов использовались ионы аргона с энергией 6 кэВ. Диаметр ионного пучка составлял  $\sim 10$  см. Плотность тока  $j$  в центре ионного пучка была равна  $(20,2 \pm 0,2)$  мкА/см<sup>2</sup>. 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.

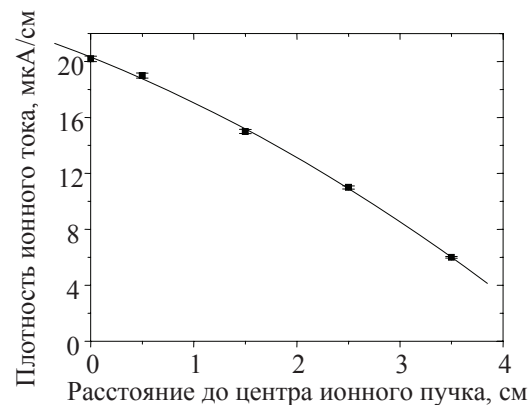


Рис. 1. Зависимость плотности ионного тока от расстояния до центра ионного пучка

Изменение плотности тока в ионном пучке приводит к тому, что интегральный поток ( $\Phi$ ) ассистирующих ионов аргона в пределах ионного пучка изменяется от  $0,7 \cdot 10^{16}$  до  $1,6 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Используя плотность ионного тока и скорость осаждения покрытия по формуле (1), можно рассчитать параметр  $I/A$ :

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

где  $F$  – постоянная Фарадея;  $j$  – плотность ионного тока;  $r$  – скорость осаждения покрытия;  $M$  – молярная масса палладия;  $\rho$  – плотность палладия.

Расчеты показали, что используемый ионный пучок позволяет изменять параметр  $I/A$  в интервале от 0,04 до 0,12 (рис. 2).

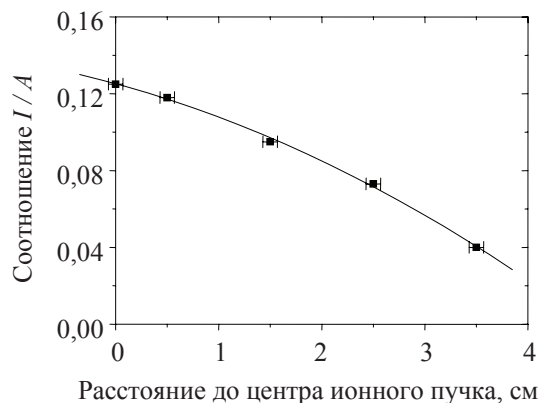


Рис. 2. Зависимость параметра  $I/A$  от расстояния до центра ионного пучка

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

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

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

С использованием формулы (2) была рассчитана толщина  $d$  палладиевого покрытия, которое должно сформироваться на подложке из железа при определенном значении параметра  $I/A$ . Данные представлены на рис. 3.

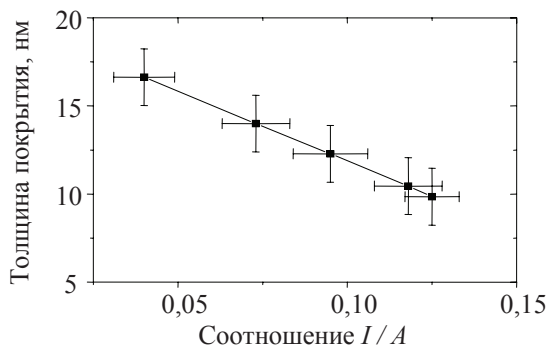


Рис. 3. Расчетная толщина  $d$  покрытия в зависимости от параметра  $I/A$

Элементный состав, распределение компонентов 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  $0^\circ$ , угол вылета  $15^\circ$ , угол рассеяния  $165^\circ$ . Энергетическое разрешение анализирующей системы равнялось 15 кэВ, что обеспечивало разрешение по глубине  $\sim 11$  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 Pd/Fe, сформированной при интегральном потоке ассистирующих ионов  $\Phi = 0,7 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> ( $I/A = 0,12$ ), показан на рис. 4.

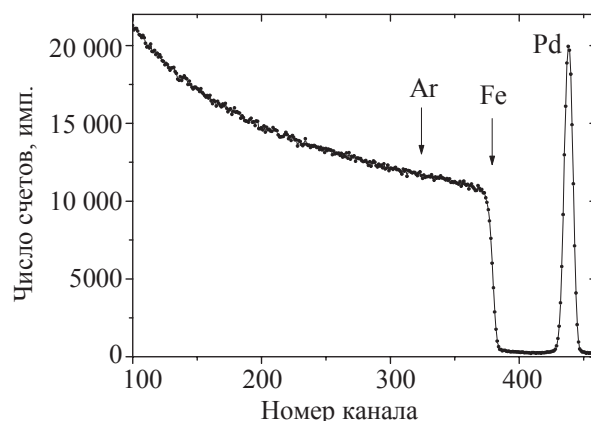


Рис. 4. Спектр РОР ионов гелия от структуры Pd/Fe, полученной при интегральном потоке ассистирующих ионов  $\Phi = 0,7 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>

На спектре РОР, полученного от сформированной Pd/Fe-структуры (рис. 4), мы наблюдаем сигналы от атомов подложки железа, атомов осаждаемого покрытия палладия и аргона.

На основе данных РОР с применением компьютерного моделирования RUMP [7] были построены концентрационные профили компонентов Pd/Fe-структуры, полученной при различных значениях параметра  $I/A$  (рис. 5). Используя методику [5], по концентрационным профилям экспериментально определили толщину покрытия, сформированного при различных значениях параметра  $I/A$ . Сравнительные данные приведены на рис. 6.

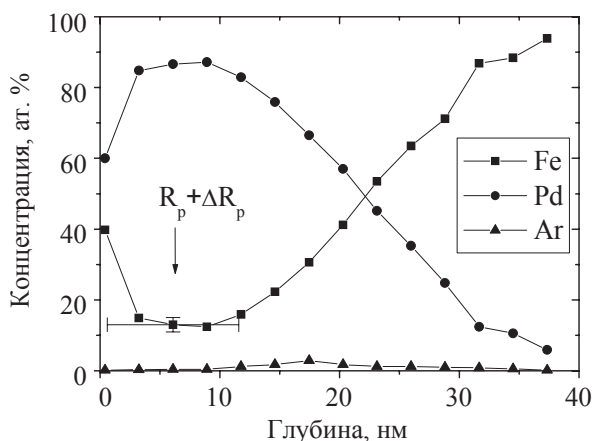


Рис. 5. Профили распределения компонентов по глубине в Pd/Fe-структуре, полученной при параметре  $I/A = 0,073$

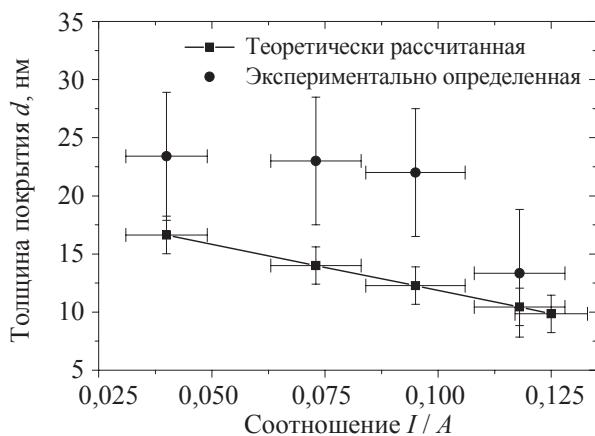


Рис. 6. Толщина покрытия в зависимости от параметра  $I/A$

Из рис. 6 видно, что при значениях параметра  $I/A = 0,04-0,10$  экспериментально определенная толщина покрытия выше рассчитанной толщины, а при значениях  $I/A < 0,10$  сравнима в пределах погрешности с рассчитанной. Так как при расчете толщины покрытия мы учитывали только распыление атомов Pd ионами аргона, то наблюдаемое различие при  $I/A = 0,04-0,10$ , по нашему мнению, связано с тем, что помимо распыления атомов Pd происходит распыление атомов Fe из подложки. Атомы железа в покрытии присутствуют вследствие атомного перемешивания на границе раздела покрытие – подложка и встречной диффузии атомов подложки в покрытие [8]. Поэтому экспериментально определенная толщина покрытия больше рассчитанной. При значениях  $I/A > 0,10$  (более интенсивном потоке ассистирующих ионов) процесс распыления атомов Pd играет существенную роль, так как коэффициент распыления атомов Pd в 1,5 раза больше, чем Fe. Соответственно толщина покрытия близка к теоретически рассчитанной.

**Заключение.** Методом резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием определено, что при осаждении Pd-покрытия на Fe 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/см<sup>2</sup> формируются покрытия толщиной  $\sim(14-23)$  нм. Установлено, что толщина сформированного покрытия зависит от параметра  $I/A$  (отношение плотности потока  $I$  ассистирующих ионов к плотности потока  $A$  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.

### Литература

1. Влияние параметров мощного ионного пучка на изменение поверхностных свойств твердого сплава Т14К8 / И. Н. Царева [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2005. № 9. С. 84–89.
2. Блинков И. В., Волхонский А. О., Юдин А. Г. Многофазность материала покрытий как фактор, влияющий на формирование наноструктуры и их свойств // ФХОМ. 2011. № 6. С. 57–64.
3. Авдиенко А. А., Авдиенко К. И. Упрочнение поверхности конструкционных материалов и сплавов методом ионно-лучевой обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. № 12. С. 16–27.
4. Лотков А. И., Мейснер Л. Л., Гришков В. Н. Сплавы на основе никелида титана: ионно-лучевая, плазменная и химическая модификация поверхности // Физика металлов и металловедение. 2005. Т. 99, № 5. С. 66–78.
5. Изучение металлосодержащих (Ti, Co) покрытий, осажденных на кремний при ионном ассистировании, ядерно-физическими методами / Бобрович О. Г. [и др.] // ФХОМ. 2006. № 1. С. 54–58.
6. Ионно-лучевое модифицирование трибологических свойств хромистой стали / Козлов Д. А. [и др.] // ФХОМ. 2010. № 1. С. 50–53.
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.
8. Тульев В. В., Ташлыков И. С., Литвинов Д. А. Элементный состав и распределение компонентов по глубине в структурах Pd/Fe, полученных методом динамического атомного перемешивания / В. В. Тульев. Труды БГТУ. 2012. № 6 (153): Физ.-мат. науки и информатика. С. 81–85.

Поступила 01.03.2014