

УДК 543.123:669.24

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ТИТАНЕ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ ЧЕРЕЗ ОСАЖДАЕМУЮ НА ПОВЕРХНОСТЬ МИШЕНИ ГАЗО-МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛЕНКУ

© 2012 г. Г. А. Вершинин¹, Т. С. Грекова¹, Г. И. Геринг¹,
И. А. Курзина², Ю. П. Шаркеев³

¹ Омский государственный университет имени Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

³ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Поступила в редакцию 30.06.2011 г.

Анализируются концентрационные профили ионов алюминия в поликристаллическом титане, имплантированного полиэнергетическим пучком вакуумно-дугового источника через осаждаемую на поверхность мишени газо-металлическую пленку.

ВВЕДЕНИЕ

В результате исследований структурно-фазовых превращений, элементного состава и формирования наноразмерных интерметаллидных соединений в титане марки ВТ1-0 при воздействии импульсно-периодическим пучком ионов алюминия вакуумно-дугового источника ускорителя “Радуга-5” обнаружен усиленный массоперенос внедряемой примеси на аномально большие глубины с одновременным образованием различных фаз [1–3]. Специфическая особенность режимов имплантации в указанных экспериментах связана с осаждением алюминиевой плазмы на поверхность мишени в промежутках между воздействием пучком ускоренных ионов. Одновременно с этим на поверхности мишени адсорбировались атомы кислорода и углерода из остаточной атмосферы вакуумной системы, которые перемешивались в поверхностных слоях ионным пучком и вместе с атомами осажденного алюминия в виде атомов отдачи внедрялись в глубь модифицируемого материала. На практике такой режим модификации поверхности материалов применяется как для формирования глубоких интерметаллидных слоев, так и для нанесения покрытий, содержащих интерметаллидные структуры с широкими переходными слоями.

Некоторые параметры облучения представлены в табл. 1. Температура образцов в процессе ионной обработки составляла 1173 К [3]. На рис. 1 частично приведены наблюдаемые концентрационные профили элементов после имплантации, измеренные методом послойной оже-электронной спектроскопии на спектрометре “Шхуна-2”. Установлено, что с увеличением дозы имплантируемых ионов толщина пленки изменяется от 50 до

400 нм, в то же время глубина проникновения частиц в подложку увеличивается до 2600 нм.

Целью данной работы является интерпретация особенностей формирования концентрационных профилей алюминия в титане марки ВТ1-0 при имплантации через осаждаемую пленку сложного состава.

МОДЕЛЬ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью источников с вакуумной дугой является возможность импульсно-периодического формирования пучка ионов металлов с зарядом от 1^+ до 6^+ в зависимости от материала катода [4], что приводит к общему увеличению энергии частиц без повышения ускоряющего напряжения. Так, например, содержание ионов алюминия в пучке составляет: 38% — Al^{1+} , 51% — Al^{2+} , 11% — Al^{3+} , что соответствует трем значениям энергии — 20, 40, 60 кэВ при ускоряющем напряжении 20 кВ. Поэтому при анализе экспериментальных результатов необходимо учитывать полиэнергетический характер ионного пучка.

Таблица 1. Условия облучения ионами алюминия образцов титана

Режимы	Доза облучения Φ , 10^{18} ион/см ²	Толщина сформированной пленки, нм	Время имплантации, мин
1	0.22	50	12
2	0.62	100	35
3	1.1	180	60
4	2.2	400	125

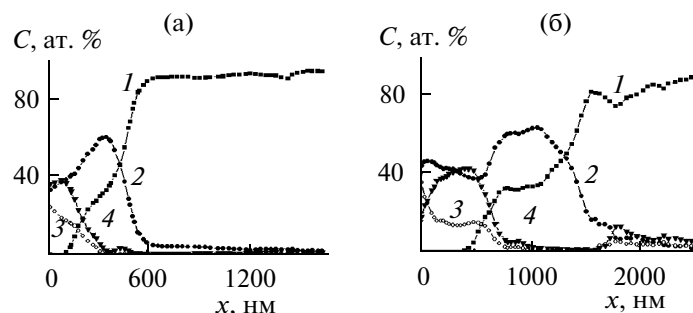


Рис. 1. Экспериментальные концентрационные профили элементов после облучения титана ионами алюминия для разных режимов облучения (табл. 1): 2 – а; 4 – б. Кривые соответствуют следующим элементам: 1 – Ti; 2 – Al; 3 – O; 4 – C.

Будем полагать, что ионы падают на поверхность исходного образца вдоль перпендикулярной оси x , а пленка равномерно растет в противоположном направлении и выполняются условия применения одномерного по пространственной координате уравнения массопереноса для определения концентрационных профилей в пленке и подложке. Аналитические модели профилей примеси в слоистых мишенях отличаются друг от друга способом трансформации глубинной переменной и способом обеспечения сохранения общего количества примеси. Будем исходить из алгоритма работы [5] и профиль в слоистой системе представим в виде:

$$n(x) = \begin{cases} n_1(x) & \text{при } 0 \leq x \leq d(t), \\ \beta n_2(x - \eta) & \text{при } x > d(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $n_1(x)$ и $n_2(x)$ – профили распределения примеси в пленке и подложке, соответственно. Здесь $d(t)$ – толщина пленки в момент времени t ; Rp_1 – проективный пробег ионов в пленке; Rp_2 – проективный пробег ионов в подложке; $\eta = d(t)(1 - Rp_2/Rp_1)$ – координата, трансформирующая шкалу глубин при переходе во второй слой. Постоянная β выбирается из условия нормировки общего профиля:

$$\beta = \left(\Phi - \int_L^0 n_1(x) dx \right) \left(\int_0^X n_2(x) dx \right)^{-1}, \quad (2)$$

где L – толщина сформированной пленки, X – экспериментально установленная максимальная глубина проникновения ионов в подложке, Φ – суммарная доза ионов.

На первоначальном этапе воздействия ионным пучком, когда доза внедренных в систему ионов мала, считаем, что формирование концентрационных профилей как в пленке, так и в подложке, происходит статистически с баллистическим перемешиванием. Поскольку имплантация проводилась при относительно высоких температурах образцов, то имело место термическое перераспределение примеси. Поэтому в точке $x(t)$ в момент

времени t концентрационный профиль можно записать в виде суммы трех слагаемых

$$n(x, t) = n_s(x, t) + n_r(x, t) + n_T(x, t), \quad (3)$$

соответствующих указанным выше механизмам, причем каждое из них, в свою очередь, представляется в виде суммы профилей от каждой энергетической компоненты E_i . Выражения для $n_1(x)$ и $n_2(x)$ из формулы (1) получаются интегрированием функции (3) по времени. Вклад статистического распределения описывается с использованием распределения Пирсона IV типа [6], а детали алгоритма вычислений описаны в работе [7]. Моменты пространственных распределений для каждой компоненты энергии ионов алюминия в титане брали из таблиц [6], а в пленке вычислялись как для многокомпонентной мишени [6] (табл. 2). Вклад атомов отдачи в формирование профилей оценивали по алгоритму [8]. Термическое перераспределение легирующей примеси для каждой энергетической компоненты определяется выражением:

$$n_T(x, t, E_i) = \int_0^\infty n_p(\xi, E_i) G(x, \xi, t) d\xi + \int_{t_0}^t \int_0^\infty f(\xi, t, E_i) G(x, \xi, t - \tau) d\tau d\xi, \quad (4)$$

являющимся решением неоднородного уравнения термической диффузии без учета распыления поверхности мишени с функцией источника $f(x, t, E_i)$ в виде функции Пирсона IV типа и начальной функцией $n_p(x, E_i)$, в качестве которой берется профиль, сформированный компонентой пучка с энергией E_i к моменту t_0 [9]. В выражении (4) t_0 – время начала термического перераспределения примеси, $G(x, \xi, t)$ – функция Грина для второй краевой задачи.

Из анализа экспериментальных данных следует, что средняя скорость V роста пленки на поверхности титана при облучении в режиме 1 составляет

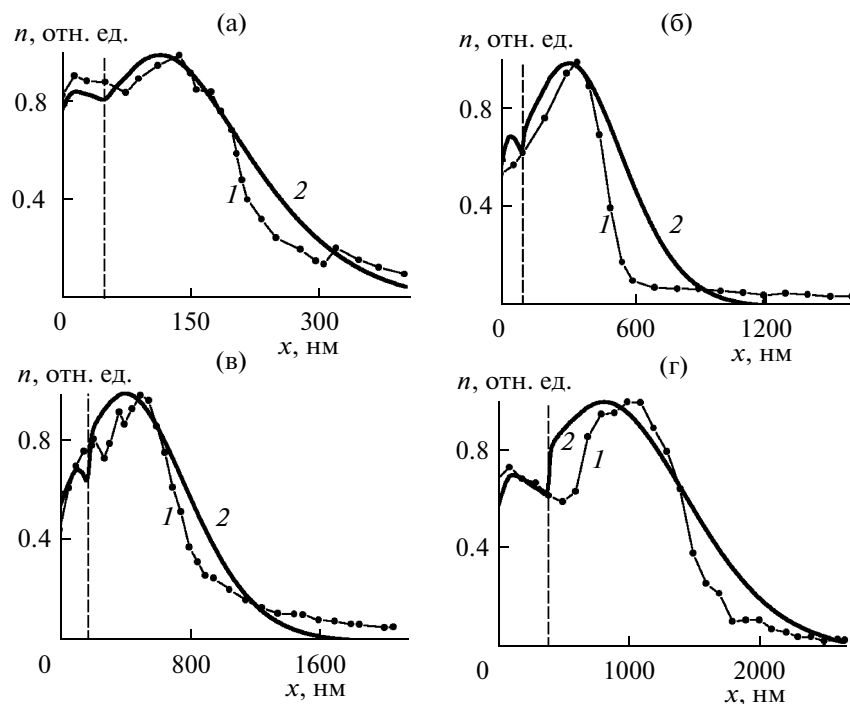


Рис. 2. Экспериментальные (1) и теоретические (2) концентрационные профили алюминия в образцах титана для разных режимов облучения: 1 – а, 2 – б; 3 – в, 4 – г (табл. 1).

примерно 4 нм/мин, а в остальных случаях ≈ 3 нм/мин. Поэтому уже через 25 мин после начала имплантации ионы алюминия даже с максимальной энергией 60 кэВ в модели статистического распределения не способны проникнуть в подложку через пленку. Формирование концентрационных профилей в титановой матрице в этом случае, по-видимому, преимущественно осуществляется за счет атомов отдачи и термиче-

ской или радиационно-стимулированной диффузии.

Результаты моделирования по представленному выше алгоритму с параметрами, указанными в табл. 2, сопоставляются с экспериментальными данными [1–3] для четырех образцов на рис. 2. Граница области пленка–подложка обозначена вертикальной пунктирной линией. Варьируемыми параметрами при моделировании являлся коэф-

Таблица 2. Модельные параметры для описания концентрационных профилей алюминия

Параметры	Режимы	Энергия ионов Al		
		20 кэВ	40 кэВ	60 кэВ
Проективный пробег R_p в пленке, нм	1–4	11.32	22.37	33.46
Страгглинг ΔR_p в пленке, нм	1–4	7.73	14.78	19.98
Коэффициент асимметрии Sk	1–4	0.23	0.11	–0.14
Коэффициент термической диффузии $D_t, 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$	1	0.85	0.9	1.0
	2	0.9	1.25	1.3
	3	6.9	7.25	7.35
	4	6.9	7.25	7.35
Нормировочный множитель β	1	0.60		
	2	0.65		
	3	0.67		
	4	0.76		

фициент термической диффузии D_t и относительный вклад статистического распределения во времени, которые подбирались исходя из лучшего согласия теории с экспериментом.

Проведенное моделирование позволяет утверждать, что глубинные концентрационные профили алюминия в титане, имплантированного импульсно-периодическим полиэнергетическим пучком источника “Радуга-5” через осаждаемую газо-металлическую пленку, формируются преимущественно путем статистического распределения внедряемых ионов на первоначальном этапе и последующего термического перераспределения в оставшееся время. Статистическим распределением обусловлены максимумы концентрационных профилей, удаленные от поверхности. Имплантация атомов отдачи ответственна за неоднородное распределение внедряемой примеси вблизи границы раздела пленки с подложкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Козлов Э.В., Курзина И.А. и др. // Изв. Вузов. Физика. 2004. № 9. С. 45.
2. Божко И.А., Курзина И.А., Степанов И.Б., Шаркеев Ю.П. // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 4. С. 58.
3. Козлов Э.В., Курзина И.А., Божко И.А., Калашиников М.П. и др. // Металлофизика. Новейшие технологии. 2004. Т. 26. № 12. С. 1645.
4. Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 5. С. 39.
5. Ryssel H., Lorenz J., Hoffmann K. // Appl. Phys. A. 1986. V. 41/3. P. 201.
6. Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Тёмкин М.М. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
7. Вахний Т.В., Вершинин Г.А., Шаркеев Ю.П., Грекова Т.С. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 4. С. 94.
8. Christel L.A., Gibbons J.F., Mylroie S. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1981. V. 183/1. P. 187.
9. Vershinin G.A., Grekova T.S., Sharkeev Yu.P., Kurzina I.A. et al. // Proc. 10th Intern. Conf. Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Tomsk, Russia, 19–24 September 2010). Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS. 2010. P. 205.

Analysis of Concentration Profiles in Polycrystalline Titanium at Implantation of Aluminum Ions through Gas-Metal Film on the Target Surface

G. A. Vershinin, T. S. Grekova, G. I. Gering, I. A. Kurzina, Yu. P. Sharkeev

The concentration profiles of aluminum ions in polycrystalline titanium under polyenergetic ion beam irradiation of the vacuum arc source through precipitating gas-metal film on the target surface is analyzed.