

05

Энергетическая зависимость диффузии алюминия в α -Fe при ионном облучении

© А.А. Колотов, А.А. Новоселов, А.Ю. Дроздов,

Ф.З. Гильмутдинов, В.Я. Баянкин

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

E-mail: less@fti.udm.ru

Поступило в Редакцию 22 марта 2011 г.

Рассматриваются процессы диффузии в системе „пленка–подложка“ при облучении поверхности ионами Ag^+ различных энергий. Приведены данные по изменению компонентного состава поверхностных слоев в области границы „пленка–подложка“. Проанализированы возможные механизмы диффузии и аномально глубокого компонентного перемешивания, наблюдаемого в результате ионной имплантации.

Особенности перераспределения атомов в поверхностных слоях материалов при ударном воздействии, в частности при ионной имплантации, характер процессов массопереноса и последующее изменение характеристик материала в целом, являются основным предметом изучения в области вопросов внешнего воздействия на материалы.

В данной работе представлен обзор экспериментальных данных по изучению перераспределения атомов в поверхностных слоях материалов (двухслойной системы — железной подложки с напыленной на ее поверхность пленкой алюминия) после ударного воздействия (ионной имплантации). Как правило, характер массопереноса определяет отклик системы на внешнее воздействие и может иметь решающее значение для установления конечных параметров облученного материала, что и обуславливает интерес к поставленной задаче.

Основной целью данной работы стало изучение процессов диффузии в поверхностных слоях и на границе Al–Fe. В данном случае можно „напрямую“ наблюдать результат воздействия ионной имплантации на процессы массопереноса и компонентного перемешивания. В связи с этим исследование зависимости элементного состава от параметров ионного облучения, в частности энергии бомбардирующих ионов, представляет определенный интерес.

На поверхность образцов α -Fe (предварительно отшлифованную и отполированную) напылялся алюминий до расчетной толщины слоя порядка 180–200 Å. Напыление проводилось регистивным методом в вакууме (остаточное давление в камере менее 10^{-6} Torr). Со стороны напыленного слоя образцы облучались в импульсном режиме (частота следования импульсов 50 Hz, длительность импульса 0.5 s) ионами аргона, плотность тока составляла $10 \mu\text{A}$, интегральная доза (D) составила 10^{15} ion/cm^2 , при этом энергия ионов варьировалась от 10 до 40 keV, с шагом 10 keV. Нагрев в процессе облучения не превышал 100°C .

Исследования химического состава сверхтонких поверхностных слоев выполнены методом ВИС на масс-спектрометре MS-7201. При этом относительная ошибка расчета концентраций компонентов не превышала 3%. Послойный анализ проведен с использованием травления поверхности ионами Ar^+ с энергией 0.5 keV и плотностью тока $160 \mu\text{A/cm}^2$ (расчетная скорость травления $\sim 1.5 \text{ nm/min}$).

Ионная имплантация приводит к существенным изменениям физико-химических свойств поверхности и материала в целом. Процессы, протекающие внутри имплантируемого материала, и знание характера распределения по глубине имплантированных ионов и радиационных повреждений представляют значительный интерес с точки зрения как фундаментальных исследований, так и прикладного значения ионной имплантации. В частности установлено, что экспериментальные профили распределения по глубине имплантированных ионов и профили радиационных повреждений в целом неплохо согласуются с расчетными значениями [1]. Однако в ряде исследований показано, что изменение структуры и свойств материалов имеет место на глубине, существенно превышающей значения проективного пробега ионов. Эти эффекты не получили убедительного объяснения в рамках классических моделей радиационной физики [2,3].

Имплантация атомов металлов осуществлялась методом „ионного вбивания“ из пленки (Al), напыленной на поверхность матрицы (Fe).

Распределение пробегов ионов Ar^+ в зависимости от энергии ионов и типа мишени

$E_{\text{Ar}}, \text{ kV}$	10	20	30	40
$R_p(\text{Al}), \text{ \AA}$	116	196	277	358
$R_p(\text{Fe}), \text{ \AA}$	55	92	128	165

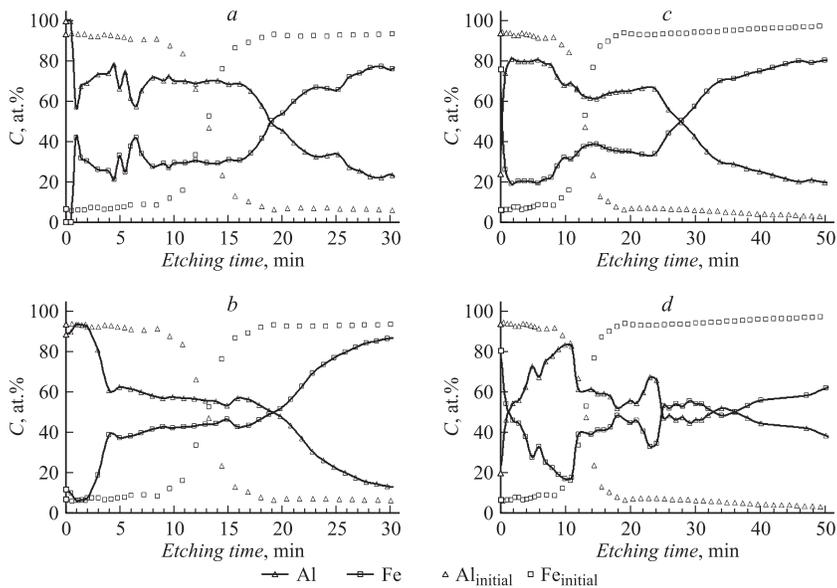


Рис. 1. Распределение элементов в поверхностных слоях после облучения ионами Ar^+ : *a* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 10 \text{ keV}$; *b* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 20 \text{ keV}$; *c* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 30 \text{ keV}$; *d* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 40 \text{ keV}$.

Расчетные, в рамках классической модели [2,3], глубины проникновения имплантируемых атомов (в данном случае — Ar^+) в поверхность верхнего слоя (Al) для различных энергий указаны в таблице. Как показывают полученные результаты, в процессе облучения ионным пучком наряду с распылением материала пленки идет вбивание части ее атомов в тело мишени. На графиках элементного состава (рис. 1) видно, что глубина внедрения атомов Al несколько больше проективного пробега для атомов отдачи во всем диапазоне исследуемых энергий. С увеличением энергии падающих ионов наблюдается ряд особенностей в формировании профиля распределения внедренных атомов по глубине мишени. Так, например, величина максимальной глубины внедрения существенно зависит от энергии ионов Ar^+ . При повышении энергии падающих ионов компонентный состав в поверхностных слоях существенно изменяется — увеличивается глубина диффузии алюминия

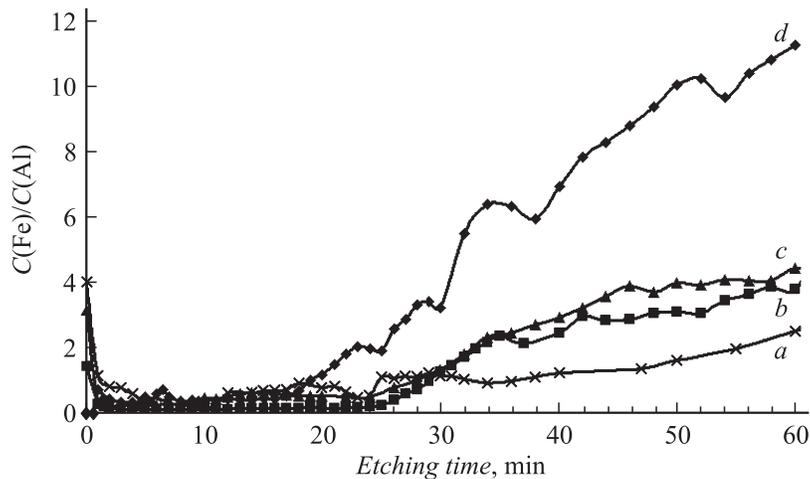


Рис. 2. Изменение отношения концентрации Fe/Al в приповерхностной области (толщина слоя $\sim 700 \text{ \AA}$): *a* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 10 \text{ keV}$; *b* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 20 \text{ keV}$; *c* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 30 \text{ keV}$; *d* — $D = 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $E = 40 \text{ keV}$.

в железную подложку. При увеличении энергии ионов до 40 keV граница разделения слоев размывается, атомы алюминия проникают в железную матрицу на значительную глубину, превышающую глубину проективного пробега в несколько раз.

Обращает на себя внимание пороговый характер формирования профиля внедрения атомов пленки в подложку: на первых этапах отмечается плавный сдвиг максимальной глубины внедрения атомов алюминия, при увеличении энергии ионов Ar^+ наблюдается резкое перемешивание компонентов. На рис. 2 видно, что суммарная концентрация алюминия в слое толщиной порядка 700 \AA возрастает с ростом энергии падающих ионов более чем в 5 раз, что можно было бы связать с интенсификацией процессов каскадного перемешивания (КП), т.е. направленного баллистического переноса атомов алюминия с поверхности в глубину образца. Однако, анализируя результаты исследований, можно отметить, что КП не объясняет в полной мере глубину диффузии алюминия в железную матрицу при облучении.

Увеличение диффузии обычно связывают с увеличением температуры обработки. Условия облучения позволяют утверждать, что говорить о существенном повышении температуры на поверхность облучаемых образцов, при используемых режимах обработки, не приходится (выделенная энергия составляет $8\text{--}32\text{ J/cm}^2$ для энергий $10\text{--}40\text{ keV}$ соответственно).

Другим объяснением аномально глубокой диффузии считается механизм, основанный на ускорении миграции вследствие градиентов механических напряжений, существующих вокруг имплантированного слоя [1]. Возможным механизмом также является модуляция барьера диффузии из-за упругих волн, которые возникают при ионной имплантации в приповерхностном слое, связанная с выделением большого количества тепла, что в нашем случае не было отмечено.

На основе анализа выделения энергии при неупругом взаимодействии падающих ионов и мишени мы можем ввести температуру, которая характеризует локальный нагрев в области трека тяжелого иона — T_i [4]. Отметим, что треком тяжелой заряженной частицы принято называть сильно деструктурированную область вблизи траектории тяжелой частицы в материале, созданную вследствие температурных эффектов, вызванных ионизационными потерями тяжелой заряженной частицы, приводящей к расплавлению и последующей частичной (или полной) рекристаллизации этой области. Расчеты температуры при прохождении ионов Ar^+ области трека ($\sim 3\text{ nm}$) наиболее просто можно оценить из выражения

$$T_i = \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_{inel} \frac{1}{\pi R_c^2 C_i \rho_i},$$

где R_c — радиус трека, C_i — теплоемкость решетки, ρ_i — плотность. Потери энергии ($\partial E/\partial x$) можно оценить из данных о пробеге ионов Ar^+ в Fe: $(\partial E/\partial x) \approx 50\text{ eV/\AA}$. Оценочное значение T_i в данном случае составляет $\sim 10^4\text{ K}$. Учитывая, что температура плавления (T_{melt}) для железа равно 1539°C , а температура кипения 2900°C , можно сделать вывод, что при прохождении иона Ar^+ в области трека ($\sim 3\text{ nm}$) $T_i \gg T_{melt}$.

Характерное время процесса релаксации энергии возбужденных электронов зависит от механизма рассеяния: электрон-электронное рассеяние $10^{-15}\text{--}10^{-13}\text{ s}$, электрон-решеточная релаксация $10^{-13}\text{--}10^{-12}\text{ s}$, фонон-фононное рассеяние $\sim 10^{-12}\text{ s}$.

Можно предположить, что одним из факторов, влияющим на диффузию имплантанта, является рост температуры образцов при увеличении энергии падающих ионов. Однако в соответствии с [5] коэффициент диффузии алюминия в микрокристаллическом α -Fe при 383 К составляет $5 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{s}$, а повышение температуры на 100 градусов может увеличить коэффициент диффузии в металле примерно на 3 порядка, что явно недостаточно для термостимулированной диффузии имплантанта до глубин, отмеченных в данной работе.

В пользу радиационной природы проникновения алюминия свидетельствуют следующие оценки. Если предположить, что Al проникает во время облучения ($t_1 \leq 3 \text{ s}$, $T \leq 400 \text{ K}$), то его эффективный коэффициент диффузии $D_{eff}(400 \text{ K}) > d^2/t_1 \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ (для $E_{Ar} = 10 \text{ keV}$), где d — сдвиг концентрационного профиля в глубь матрицы.

Сравним эти значения D_{eff} со значениями объемной диффузии D для алюминия в железе [5], экстраполированными из области высоких температур — $D_{Al}(1500 \text{ K}) \sim 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$. Видно, что D_{eff} превосходят равновесные значения D_{Al} в Fe при одинаковых температурах.

Наиболее вероятно, что примесь Al мигрирует преимущественно по системе протяженных линейных и планарных дефектов (границам зерен, дислокациям) во время облучения. Под влиянием тех процессов, которые обсуждались в [6], области протяженных дефектов переходят в сильно возбужденное состояние, при котором частота перескока атомов (коэффициент диффузии) резко возрастает. Не исключено при этом и наличие дрейфовой составляющей массопереноса, которая обусловлена направленным характером распространения упругих волн, переносящих примесные атомы в атмосферах протяженных дефектов по направлению своего распространения. Вместе с тем имеет место поверхностная сегрегация примеси и перераспределение основных компонентов сплава. В этих условиях даже в отсутствие термической диффузии распределение имплантируемых атомов не соответствует теоретическому профилю имплантанта.

В результате проведенных исследований показано, что с повышением энергии ионов увеличивается массоперенос атомов на границе пленка–матрица вследствие увеличения коэффициента диффузии. Увеличение коэффициента диффузии можно связать с повышением температуры в области прохождения трека и интенсификацией процесса направленного баллистического переноса атомов алюминия с поверхности в глубину матрицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект РФФИ — „Урал“ № 10-02-96039-р_урал).

Список литературы

- [1] *Кирсанов В.В., Мусина М.В.* // *Металлы*. 1993. № 3. С. 84–87.
- [2] *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М.* Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск: Изд-во БГУ им В.И. Ленина, 1980.
- [3] *Комаров Ф.Ф.* Ионная имплантация в металлы. М: Металлургия, 1990.
- [4] *Дидык А.Ю., Робук В.Н., Семина В.К., Халил А., Хофман А.* // *Вопросы атомной науки и техники*. 2005. № 3. С. 55–63.
- [5] *Акимова И.А., Миронов В.М., Покоев А.В.* // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 1985. № 5. С. 1225–1227.
- [6] *Баялкин В.Я., Гусева М.И., Тетельбаум Д.И., Гильмутдинов Ф.З.* // *Поверхность*. 2005. № 5. С. 77–82.