

УДК 539.1.06:539.23.234

Состав и распределение компонентов по глубине в Fe-Pd структурах, сформированных методом ионного перемешивания

© 2002 В.В.Тулъев, В.В.Поплавский, И.С.Ташлыков

Белорусский государственный технологический университет, Минск
E-mail: root@bstu.unibel.by
Поступила в редакцию 20 июня 2002 г.

Состав и распределение компонентов по глубине Fe-Pd структур, полученных ионным перемешиванием при бомбардировке исходных структур ионами Ar, Kr, Xe с энергиями 20, 30 кэВ дозами от $2 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{16}$ см⁻², изучались методом резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия с применением компьютерного моделирования. Установлено, что при атомном перемешивании Fe-Pd структур, помимо процесса перемешивания в каскаде атомных столкновений, происходят процессы радиационно-стимулированной диффузии и распыления поверхности. Определены наиболее оптимальные режимы атомного перемешивания Fe-Pd структуры.

RBS technique has been employed to study ion beam mixing of Fe-Pd structure using Ar, Kr, Xe ions accelerated up to 20 and 30 keV. Doses of mixing ions were from $2 \cdot 10^{15}$ to $3 \cdot 10^{16}$ cm⁻². It was found that additionally to atom mixing in the Fe-Pd structure significant sputtering and radiation enhanced diffusion of Pd into Fe take places. Optimum regime of the Fe-Pd structure mixing is estimate.

Введение

Перемешивание атомов различных материалов с применением ионных пучков является эффективным методом введения примесей в приповерхностные слои материалов, при использовании которого практически отсутствуют ограничения по концентрации вводимых элементов [1]. Явление перемешивания атомов на границе раздела подложка-пленка при ее облучении ускоренными ионами объясняют с привлечением механизмов: внедрение атомов отдачи; перемешивания в каскаде атомных столкновений и радиационно-стимулированной диффузии. Практический и научный интерес представляет изучение взаимопроникновения компонентов формируемых структур через границу раздела при их облучении ускоренными ионами и эффективности атомного перемешивания при различной плотности энергии, выделенной в

каскадах атомных столкновений при торможении ускоренных ионов [2]. Вместе с тем, на атомное перемешивание слоистых структур накладываются ограничения, обусловленные процессами распыления поверхности, облучаемой ускоренными ионами [3]. Данная работа посвящена изучению перемешивания и распыления Fe-Pd структуры при облучении ионами инертных газов.

Методика эксперимента

Исследовалось перемешивание атомов железа и палладия на границе раздела фаз в Fe-Pd структурах при облучении ионами инертных газов Ar⁺, Kr⁺, Xe⁺. Для формирования исходной структуры на железо методом термического напыления в вакууме $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Торр с применением пучка ускоренных электронов для разогрева и испарения мишени наносилась пленка палладия толщиной 10 ± 1 нм. Подготовленные

таким образом структуры облучались ионами Ag^+ с $E=20$ кэВ, Kr^+ и Xe^+ с $E=30$ кэВ дозами D от $2 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{16}$ см^{-2} . Плотность ионного тока составляла ~ 2 мкА/ см^2 (Kr^+ , Xe^+) или ~ 5 мкА/ см^2 (Ag^+). Энергия ионов подбиралась таким образом, чтобы в начальный период процесса атомного перемешивания максимум выделяющейся в каскадах атомных столкновений энергии Θ находился в области границы раздела пленка-подложка. Данные экспериментальные условия обеспечивали варьирование Θ в широком интервале от 0,1 до 6 эВ/ат.

Композиционный состав исходных и облученных структур с профилированием по глубине изучали методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия с энергией 2,0 МэВ при следующих условиях анализа: угол рассеяния $\theta=165^\circ$, угол влета $\theta_1=0^\circ$, угол вылета рассеянных ионов $\theta_2=15^\circ$, энергетическое разрешение анализирующей системы $\Delta E=15$ кэВ.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные спектры РОР от структур Fe-Pd, облученных ионами Хе, показаны на рис.1. Как видно, с увеличением дозы облучения происходит уменьшение интегрального выхода обратного рассеяния от палладия, а сигнал от железа сдвигается в сторону больших номеров каналов. Оба эффекта отражают процесс распыления поверхности облучаемой структуры. На спектрах РОР структур Fe-Pd, облученных ионами Ag и Kr, картина аналогичная, что наиболее заметно проявляется при облучении ионами ксенона, для которого коэффициенты распыления являются наибольшими. Теоретически рассчитанные коэффициенты распыления железа и палладия ионами ксенона с энергией 30 кэВ составляют $\sim 10,2$ и $\sim 16,9$ ат./ион соответственно [4] (таблица).

Используя компьютерное моделирование [5], были построены концентрационные профили композиционного состава структур Fe-Pd после облучения ускоренными ионами (рис.2, 3). При облучении ионами Ag (рис.2) наблюдается наиболее глубокое (~ 60 нм) проникновение атомов Pd в железную матрицу при наименьшей дозе $2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} . Подобный характер распределения компонентов наблюдается и при облучении структур Fe-Pd ионами Kr (~ 35 нм). Однако в случае имплантации ионов Хе наибольшее проникновение атомов из пленки палладия в железо, достигающее ~ 30 нм, наблюдается при дозах облучения $2 \cdot 10^{15}$ и $6 \cdot 10^{15}$ см^{-2} . Проективный пробег ионов Хе в Pd с учетом страгглинга, $R_p + \Delta R_p$, примерно соответствует толщине пленки палладия (таблица). Следовательно, экспериментально наблюдаемое проникновение Pd в Fe во много раз больше

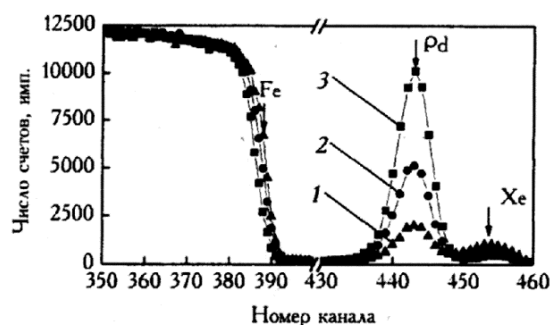


Рис.1. Спектры РОР ионов гелия от структуры Fe-Pd после облучения ионами ксенона с энергией 30 кэВ дозами: 1 — $2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} ; 2 — $6 \cdot 10^{15}$ см^{-2} ; 3 — $1,5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} .

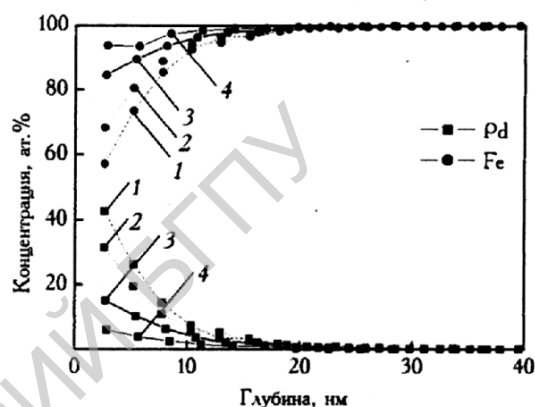


Рис.2. Профили распределения железа и палладия по глубине в структурах Fe-Pd после облучения ионами аргона с энергией 20 кэВ дозами: 1 — $2 \cdot 10^{15}$ см^{-2} ; 2 — $6 \cdot 10^{15}$ см^{-2} ; 3 — $1,5 \cdot 10^{16}$ см^{-2} ; 4 — $3 \cdot 10^{16}$ см^{-2} .

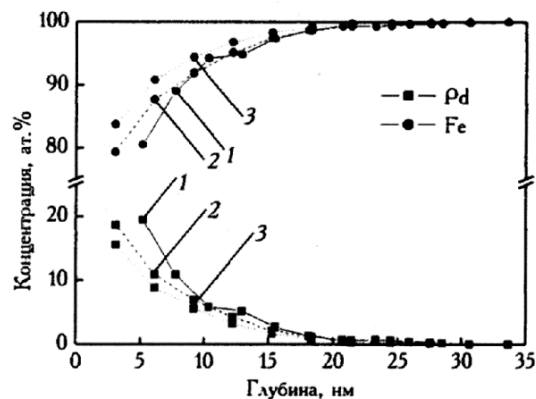


Рис.3. Профили распределения железа и палладия по глубине в структурах Fe-Pd после облучения ионами: 1 — Ag; 2 — Kr; 3 — Хе. Доза облучения $6 \cdot 10^{15}$ см^{-2} .

теоретически ожидаемого, даже с учетом интенсивного распыления поверхности, что позволяет сделать вывод о том, что кроме механизма перемешивания атомов Pd и Fe в каскадах атомных столкновений при ионном облучении структуры Fe-Pd включается механизм радиационно-стимулированной диффузии атомов Pd в железо. Этот же вывод справедлив и для

Таблица

Количественные характеристики состава структуры Fe-Pd до и после облучения ионами Ar⁺, Kr⁺, Xe⁺, и коэффициенты распыления, плотность выделенной энергии при торможении ионов в Fe и Pd и средние проективные пробеги и стратглинги пробегов ионов в Pd

Структура	Fe-Pd	(Fe-Pd)/Ar				(Fe-Pd)/Kr ⁺			(Fe-Pd)/Xe ⁺		
		3	6	15	30	2	6	15	2	6	15
$D, 10^{15} \text{ см}^{-2}$	—										
$(N)_{\text{Fe}}, 10^{18} \text{ см}^{-2}$	1,17	1,19	1,19	1,19	1,2	1,18	1,18	1,19	1,18	1,19	1,21
$(N)_{\text{Pd}}, 10^{16} \text{ см}^{-2}$	2,95	2,25	1,76	0,98	0,41	2,04	1,18	0,5	1,97	0,95	0,16
$(N)_{\text{Ar}}, 10^{14} \text{ см}^{-2}$	—	—	—	0,42	6,6	5,23	15,1	22,8	0,49	3,11	2,56
$(N)_{\text{Pd}}/(N)_{\text{Fe}}$	0,025	0,019	0,015	0,008	0,003	0,017	0,01	0,004	0,017	0,008	0,001
$S_{\text{Fe}}^{\text{теор}}, \text{ ат./ион}$	—			3,9				8,1			10,2
$S_{\text{Pd}}^{\text{теор}}, \text{ ат./ион}$	—			6,2				11,8			16,9
$\Theta_{\text{Fe}}, \text{ эВ/ат.}$	—			0,2				3,3			6,4
$\Theta_{\text{Pd}}, \text{ эВ/ат.}$	—			0,1				4,6			6,2
$R_{\rho} \pm \Delta R_{\rho}, \text{ нм}$	—			10,7 ± 1,8				8,3 ± 5,4			6,7 ± 3,8

случая облучения Fe-Pd структуры ионами Ar и Kr, хотя наиболее отчетливо вклад радиационно-стимулированной диффузии Pd в Fe проявляется при облучении Fe-Pd структуры ионами Xe, что, возможно, связано с максимальной плотностью энергии, выделяемой в каскаде атомных столкновений.

На рис.3 представлены концентрационные профили элементов в структурах Fe-Pd, облученных ионами Ar, Kr, Xe дозами $\sim 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Из анализа полученных зависимостей следует, что в случае облучения ионами Ar и Kr достигается более глубокое проникновение палладия в железную матрицу, однако при облучении ионами Ar содержание Pd на сопоставимых глубинах выше. При облучении структур Fe-Pd дозами ионов $\sim 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ использование ионов аргона также приводит к более интенсивному перемешиванию компонентов, однако содержание палладия при этом меньше, чем при облучении дозами $\sim 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При дозах облучения $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ принципиальной разницы между перемешиванием различными ионами уже не наблюдается, что можно объяснить доминированием процесса атомного перемешивания при малых дозах. С ростом дозы ионов из-за увеличения коэффициента распыления компонентов мишени более тяжелыми ионами начинает доминировать эффект распыления поверхности (таблица), однако из-за слабого распыления при малых дозах концентрация Pd в приповерхностном слое уменьшается по сравнению с исходной структурой, но примерно одинаково для всех ионов.

Выводы

При облучении Fe-Pd структур ионами Ar с энергией 20 кэВ и ионами Kr и Xe с энергиями 30 кэВ дозами $2 \cdot 10^{15}$ - $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ происходит интенсивное распыление поверхности пленки при одновременном перемешивании атомов пленки и подложки. Эффект наиболее ярко выражен при использовании ионов

ксенона, для которых коэффициент распыления поверхности максимален. При ионном перемешивании системы Fe-Pd с использованием ионов Ar достигаются наиболее оптимальные параметры процесса, так как в исследованном интервале доз облучения в этом случае достигается достаточно глубокое проникновение атомов палладия в железную матрицу при сравнительно малом распылении материала пленки. При малых дозах облучения для атомного перемешивания Fe-Pd структуры можно использовать ионы Kr или Xe.

Кроме механизмов перемешивания в каскаде атомных столкновений и распыления поверхности, при атомном перемешивании Pd и Fe проявляется вклад радиационно-стимулированной диффузии, обеспечивающей проникновение атомов Pd в Fe на глубину, превышающую средний проективный пробег ионов Ar, Kr, Xe в структуре Fe-Pd. При использовании ионов Xe радиационно-стимулированная диффузия атомов Pd в Fe максимальна, что связывается с наибольшей плотностью энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений.

Литература

1. Gailliard J.P. Recoil implantation and mixing. Surface Engineering, 1984, p.32-47.
2. Tashlykov I.S., Belyi I.M., Bobrovich O.G., et al. On the efficiency of deposited energy density for ion beam mixing processes with ions implanted during and after thin metal film deposition. Nucl.Instrum.Meth., 1993, v.B80/81, p.98-101.
3. Тулъев В.В., Ташлыков И.С. Состав и распределение компонентов по глубине в Cu-Al структурах, формируемых методом ионного перемешивания. ФХОМ, 2000, №3, с.14-17.
4. Matsunami N., Yamamura Y., Itikawa Y., et. al. Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monatomic solids. IPPJ-AM, 1984, No.32, p.1-284.
5. Doolittle L.R. A semiautomatic algorithm for Rutherford backscattering analysis. Nucl.Instrum.Meth., 1986, v.B15, p.227-234.