

PACS numbers: 66.30.Pa, 68.35.Fx, 72.10.Fk

## ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИНТЕРФЕЙСНОЕ РАССЕЙНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ Cu/Fe И Fe/Cr

О.В. Сынашенко<sup>1</sup>, А.И. Салтыкова<sup>2</sup>, И.Е. Проценко<sup>1</sup>

Сумский государственный университет,  
вул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина  
E-mail: [protsenko@aph.sumdu.edu.ua](mailto:protsenko@aph.sumdu.edu.ua)

Сумский государственный педагогический университет им. А.С.Макаренко,  
ул. Роменская, 87, 40002, Сумы, Украина

*Приведены результаты исследования диффузионных процессов методами ВИМС и ОЭС в пленочных системах Cu/Fe и Fe/Cr; изучено влияние температуры отжига на эффективные коэффициенты термодиффузии. Рассчитаны величины коэффициента прохождения электронами интерфейса и эффективные коэффициенты диффузии при различных процессах: конденсационно-стимулированной, ионно-стимулированной и термодиффузии.*

**Ключевые слова:** ДИФФУЗИОННЫЙ ПРОФИЛЬ, ВИМС, КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ИНТЕРФЕЙСА, КОЭФФИЦИЕНТ ПРОХОЖДЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСА.

*(Получено 08.09.2009, в отредактированной форме – 02.10.2009)*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие явления гигантского магнитного сопротивления, наблюдаемого в низкоразмерных магнитнеоднородных пленочных материалах (мультислои и гранулированные сплавы), постоянно стимулирует исследования в них различных процессов, в том числе и таких как диффузия и структурно-фазовые превращения. Несмотря на большой объем таких исследований, ряд вопросов остается малоизученным. В частности речь идет об исследованиях диффузионных процессов по границам зерен или через границу раздела слоев (интерфейс). Как было показано в [1] зернограничная диффузия в поликристаллических пленочных системах, в отличие от массивных образцов, в большинстве случаев преобладает над объемной, отличаясь на два порядка.

Среди многих исследуемых многослойных структур пленочные системы на основе фрагментов Fe/Cu и Fe/Cr остаются в поле постоянного интереса благодаря их широкому применению в современной электронике [2, 3]. Указанные пленочные системы являются представителями двух противоположных тенденций с точки зрения взаимной диффузии атомов: крайне ограниченная взаимная растворимость атомов Fe и Cu или неограниченная растворимость в случае атомов Fe и Cr [4].

Большое количество работ (см., например, [5-8]) посвящено изучению структурного и фазового состояния интерфейсов в многослойных структурах, а также влиянию их на величину магнитосопротивления (МС) [7]. Авторами [5] методом мессбауэрской спектроскопии было показано, что область интерфейса между слоями Fe и Cu представляет собой сплав, причём относительная его доля в слое Fe увеличивается с

уменьшением толщины слоёв системы Fe(x)/Cu(x) от  $x = 3$  нм до  $x = 1$  нм. В работах [6, 7] проведен анализ влияния шероховатости интерфейса на границе слоев Fe и Cr на величину МС многослойных пленочных систем на их основе. В частности, было предложено учитывать влияние взаимной диффузии атомов разного сорта через интерфейсы, которая приводит к изменению обменного взаимодействия за счет ослабления фракции с антиферромагнитным упорядочением. Было установлено, что с ростом шероховатости интерфейсов МС постепенно уменьшается [7].

Цель наших исследований состояла в изучении взаимной диффузии атомов в процессе конденсации пленочных систем и в результате их термообработки, расчете коэффициентов взаимной диффузии и определении параметров интерфейсного рассеяния в многослойных структурах на основе фрагментов Fe/Cu и Fe/Cr с учетом взаимосвязи указанных процессов со структурно-фазовым состоянием пленочных систем.

## 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкопленочные двух- и многослойные системы на основе Fe и Cu или Cr были получены методом термического испарения в вакууме (давление остаточной атмосферы  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Па) на подложки (П) из аморфного ситалла (для ВИМС исследований) или кристаллического Si (111) (для рентгеновского анализа). Контроль толщины отдельных слоев осуществлялся *in situ* методом кварцевого резонатора.

Для изучения терморезистивных свойств трехслойных пленочных систем использовалась ситалловая подложка с контактными площадками в виде ступеньки. Термостабилизация пленки проводилась в интервале температур от комнатной до 700 К (в случае системы Cu/Fe/Cu) и до 950 К (Cr/Fe/Cr).

Исследования диффузионных процессов в двуслойных пленочных системах проводились методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на приборе MS-7201M. Для получения диффузионных профилей проводилась запись масс-спектров вторичных ионов от толщины по мере травления образца ионами  $Ag^+$  с энергиями в диапазоне от 5 до 50 кэВ. Концентрация  $C_0$  определялась по усредненному сигналу вторичных ионов от массивных эталонных пластин Cu, Fe и Cr.

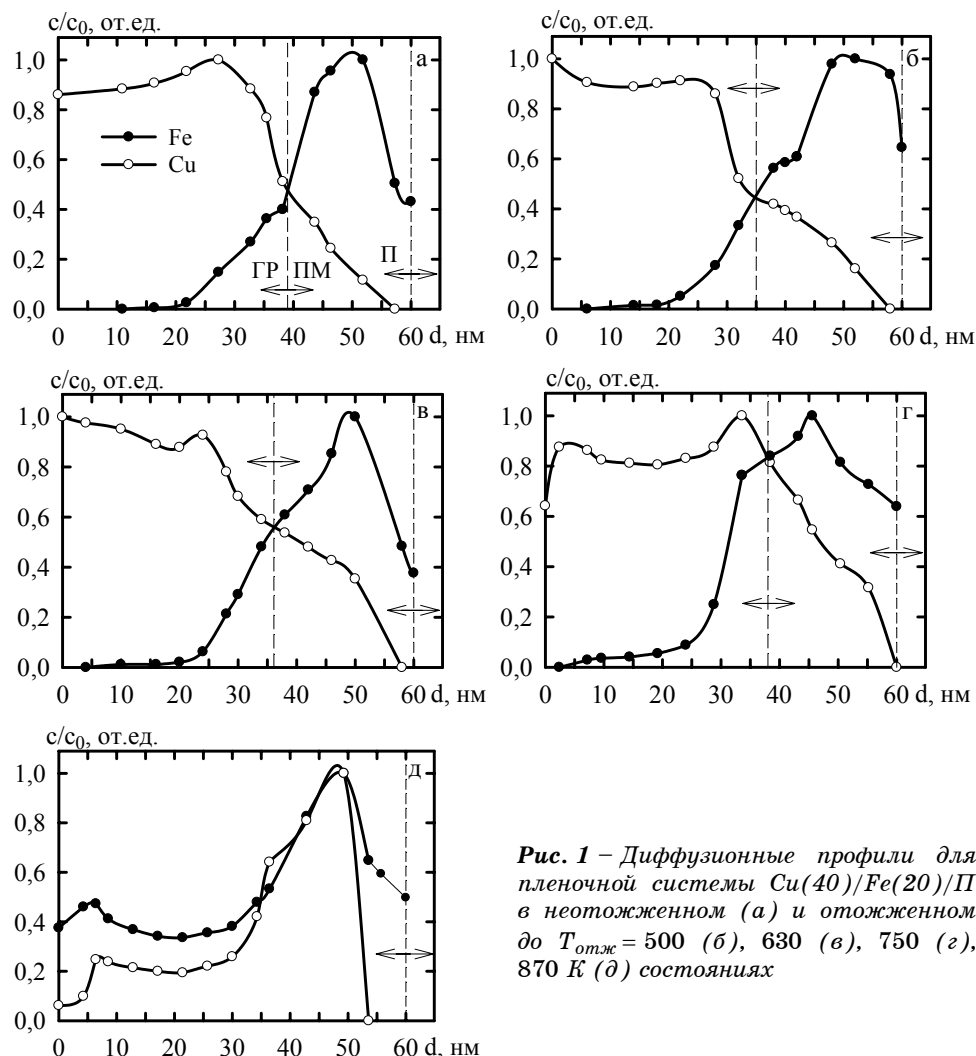
Качество интерфейсов изучалось методом рентгеновской рефлектометрии на установке X'Pert MRD Pro с использованием медного  $K\alpha$ -излучения.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1 Диффузионные процессы

Исследования диффузионных процессов в пленочных системах Cu/Fe/П и Fe/Cr/П проводились методом вторично-ионной масс-спектрометрии в процессе послойного травления первичными ионами неотожженных (конденсационно-стимулированная диффузия (КСД)) и отожженных до различных температур в диапазоне 300 ÷ 900 К (термодиффузия (ТД)) образцов.

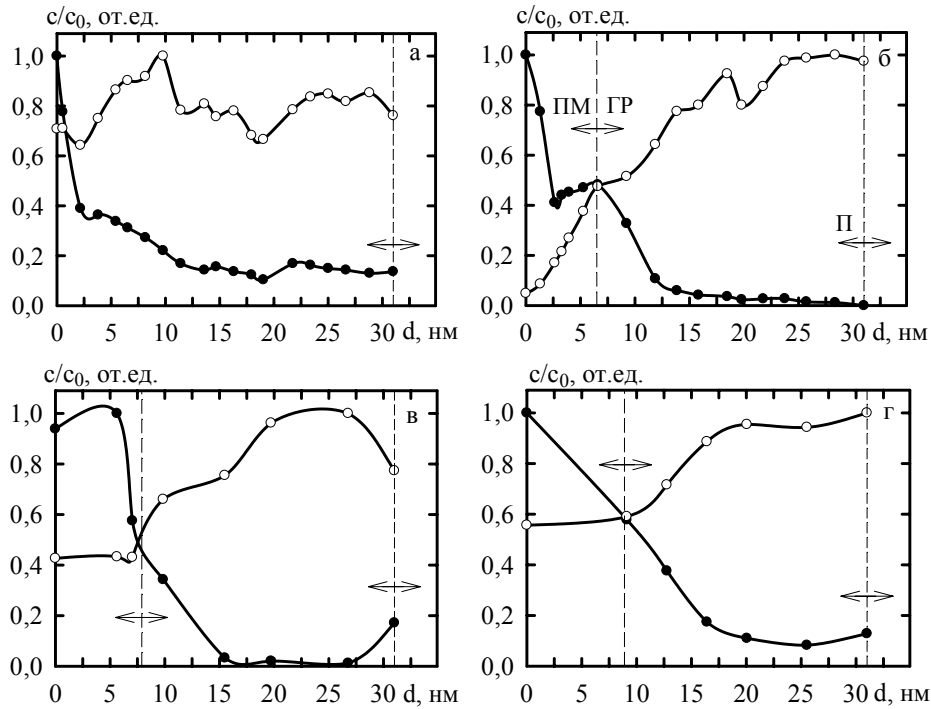
В исследуемых нами системах диффузионные профили, как результат реализации КСД (рис. 1 и 2), в неотожженных образцах имеют неодинаковый характер: частичное их перекрытие в случае системы Cu/Fe (рис. 1 а) и полное перемешивание атомов в системе Fe/Cr (рис. 2 а). Диффузионные профили, полученные от отожженных образцов, претерпевают изменения, которые проявляются или в дальнейшем их перекрытии (рис. 1, б-д) в случае системы Cu/Fe или в появлении нечеткой границы раздела (ГР) между слоями, которая совпадает с плоскостью Матано (ПМ), и размытых максимумов на



*Рис. 1 – Диффузионные профили для пленочной системы Cu(40)/Fe(20)/П в неотожженном (а) и отожженном до  $T_{отж} = 500$  (б), 630 (в), 750 (г), 870 К (д) состояниях*

диффузионных профилях (рис. 2, б-г) в случае системы Fe/Cr. При этом наблюдается смещение ГР, что полностью объясняется в рамках представления об эффекте Киркендалла [9]. Такое различие во внешнем виде и трансформации диффузионных профилей непосредственно связано со структурно-фазовым состоянием исследуемых образцов. Так, в образцах системы Cu/Fe до большой степени сохраняется индивидуальность отдельных слоев вплоть до температуры 750 К, в то время как в системе Fe/Cr уже в процессе конденсации образуется твердый раствор (Fe, Cr) [4], в котором при термоотжиге частично происходит его упорядочение, что проявляется в диффузионном расслоении раствора или в т.н. эффекте обращения потока вакансий, наблюдаемого ранее в работе [10].

Отметим, что подобное расслоение компонент наблюдалось авторами [11] при исследовании кинетики диффузионных процессов в системе Ag/Cu с ограниченной взаимной растворимостью компонент. Как показано в [12], при термообработке двухслойной системы Fe/Cr может происходить, при избытке одной из компонент, насыщение или перенасы-



**Рис. 2** – Диффузионные профили для пленочной системы Fe(10)/Cr(21)/П в неотожженном (а) и отожженном до  $T_{отж} = 600$  (б), 750 (в), 900 К (г) состояниях

щение твердого раствора, который образовался в процессе КСД, в результате отвода атомов, сегрегированных на границах зерен, в их объем.

Необходимо особенно подчеркнуть, что при использовании методики ВИМС определенное влияние на форму диффузионных профилей оказывает ионно-стимулированная диффузия (ИСД), вклад которой в общую диффузию невозможно учесть.

С учетом последнего замечания, на основе полученных данных (рис. 1 и 2) был проведен расчет эффективных коэффициентов при КСД и ИСД ( $D_1$ ), при КСД, ИСД и ТД ( $D_2$ ) и при ТД ( $D_{ТД}$ ) с помощью таких соотношений:

$$l_k \cong (D_1 \tau_k)^{1/2}, \quad (1)$$

$$l_m \cong (D_2 \tau_m)^{1/2}, \quad (2)$$

$$l_m - l_k \cong (D_{ТД} \tau_m)^{1/2}, \quad (3)$$

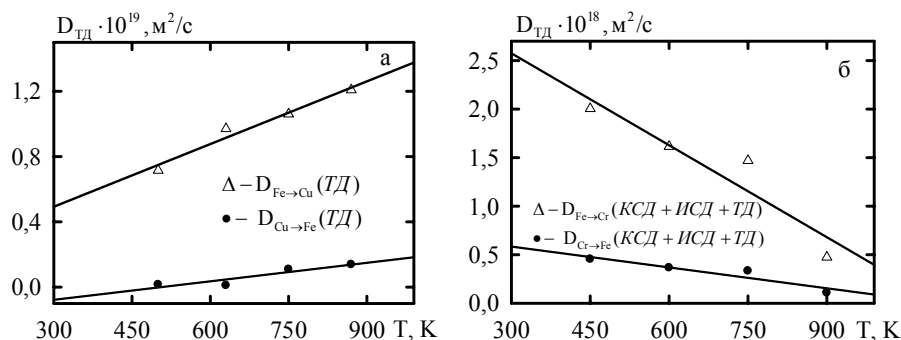
где  $l_k$  и  $l_m$  – длины диффузионных пробегов атомов (определялись как толщина верхнего слоя, при которой исчезает оже-сигнал от атомов нижнего слоя, или как толщина стравленного нижнего слоя, при которой исчезает сигнал от атомов верхнего слоя на ВИМС-спектре) для случаев КСД+ИСД и ТД соответственно;  $\tau_k$  и  $\tau_m$  – время конденсации и термоотжига.

Отметим, что операция вычитания диффузионных профилей позволила по соотношению (3) рассчитать коэффициент  $D_{ТД}$  в чистом виде (как и в случае оже-электронной спектроскопии (ОЭС)), чего нельзя сделать в двух остальных случаях, указанных выше. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Зависимости  $D_{ТД}(T)$ , перестроенные в координатах  $(\ln D_{ТД})-(1/RT)$ , позволяют рассчитать энергию активации диффузии и предэкспоненциальный множитель  $D_0$  в уравнении диффузии. Полученные данные для системы Fe/Cu можно записать в виде уравнений диффузии:

$$D_{Cu \rightarrow Fe}(T) = 3,3 \cdot 10^{-19} \cdot \exp\left(-\frac{24150}{RT}\right), \quad D_{Fe \rightarrow Cu}(T) = 2,4 \cdot 10^{-19} \cdot \exp\left(-\frac{4980}{RT}\right),$$

где энергия активации диффузии выражена в Дж/моль.



**Рис. 3** – Зависимость эффективного коэффициента термодиффузии от температуры отжига для пленочных систем Cu(40)/Fe(20)/Pi ( $T_{отж} = 500, 630, 750$  и  $870 \text{ K}$ ) (а) и Fe(10)/Cr(21)/Pi ( $T_{отж} = 450, 600, 750$  и  $900 \text{ K}$ ) (б). Расчет  $D_{ТД}$  осуществлялся по соотношениям (2)(а) и (3)(б)

Расчеты показали, что величина  $D_1$  на два порядка больше величины  $D_{ТД}$ , что объясняется насыщением границ зерен атомами другого сорта уже на стадии конденсации верхнего слоя. При этом КСД для системы Cu/Fe на порядок больше по сравнению с Fe/Cr (таблица 1). Эти отличия можно объяснить, исходя из данных о структурно-фазовом состоянии исследуемых образцов. Полученные отличия коэффициентов диффузии в неотожженных образцах связаны с более интенсивной зернограничной диффузией на стадии конденсации в относительно крупнокристаллической системе Cu/Fe, в отличие от системы Fe/Cr, в которой одновременно протекают и зернограничная, и объемная диффузии.

### 3.2 Состояние интерфейсов и коэффициент прохождения электронов через них

Исходя из данных [15] можно сделать вывод, что лучшее качество интерфейсов (с наименьшей шероховатостью) можно достичь в системах, компоненты которых имеют неограниченную взаимную растворимость (например, Fe/Cr, Fe/V и др.). В работе [16] было показано на примере систем Fe/Cr и Fe/Cu, что у первой шероховатость интерфейсов значительно меньше по сравнению с Fe/Cu. Сделанные выше выводы о структурном состоянии интерфейсов для неотожженных и отожженных образцов в некоторой степени подтверждаются данными рентгеновской рефлектометрии. Они показывают, что в неотожженном состоянии качество интерфейсов ( $\sigma_{Fe/Cr} = 0,2 \text{ нм}$  и  $\sigma_{Cr/Fe} = 1,2 \text{ нм}$ ) в системе Fe/Cr значительно лучше по сравнению с Fe/Cu ( $\sigma_{Fe/Cu} = 1,2 \text{ нм}$  и  $\sigma_{Cu/Fe} = 1,4 \text{ нм}$ ). При этом после термообработки шероховатость интерфейсов

**Таблица 1** – Эффективные коэффициенты диффузии атомов в пленочных системах на основе Cu и Fe или Fe и Cr

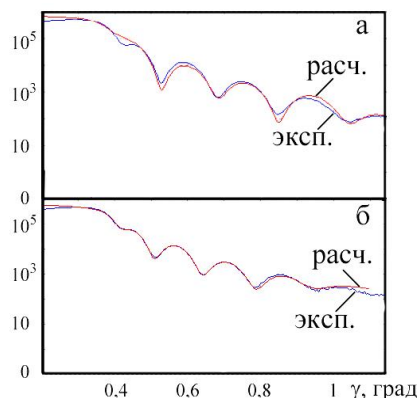
Диффузионная пара	КСД (ОЭС) [13, 14]		ТД ( $T_e = 673$ К) (ОЭС) [13]		КСД + ИС Д (ВИМС)		КСД + ИСД + ТД (ВИМС)							
	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta l^{(*)}, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$
Fe → Cr	Fe(10)/Cr(10)/П [1]				Fe(10)/Cr(21)/П									
	3,0	0,50	2,0	0,004	10,0	4,4	$T_{\text{отж}} = 450$ К		$T_{\text{отж}} = 600$ К		$T_{\text{отж}} = 750$ К		$T_{\text{отж}} = 900$ К	
Fe → Cr	Cr(5)/Fe(10)/П [1]				21,0	19,6	21,0	20,0	21,0	16,2	21,0	14,7	21,0	4,7
	2,5	0,90	1,0	0,020										
Cu → Fe	Fe(10)/Cu(10)/П				Cu(40)/Fe(20)/П									
	2,2	0,30	-	-	17,3	87,7	ТД (ВИМС)							
							$T_{\text{отж}} = 500$ К		$T_{\text{отж}} = 630$ К		$T_{\text{отж}} = 750$ К		$T_{\text{отж}} = 870$ К	
							$\Delta l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta l, \text{нм}$	$D \cdot 10^{19}, \text{м}^2/\text{с}$
0,7							0,02	0,7	0,01	2,7	0,11	3,7	0,14	
Fe → Cu	Cu(10)/Fe(10)/П				29,1	248,9	4,9	0,72	6,9	0,97	8,5	1,06	10,9	1,21
	3,0	0,25	-	-										

\*)  $\Delta l = l_m - l_k$

значительно увеличивается (например,  $\sigma_{\text{Fe/Cr}} = 1,4$  нм и  $\sigma_{\text{Cr/Fe}} = 2$  нм) (рис. 4). Расчетные данные для толщины и шероховатости отдельных слоев в многослойных системах на основе Fe/Cr в неотожженном и отожженном состояниях представлены в табл. 2.

Как видно из представленных данных, величина шероховатости интерфейса немагнетик/магнетик  $\sigma_{\text{нм/м}}$  преобладает над величиной  $\sigma_{\text{м/нм}}$ , что коррелирует с величиной коэффициентов диффузии.

Работа [17] является одной из первых, где предложена методика изучения интерфейсного рассеяния электронов в трехслойных поликристаллических пленках Au/X/Au (X = Fe, Co и Ni). В основу анализа была положена теоретическая модель для термического коэффициента сопротивления двухслойных пленок Р.Диммиха для граничного случая, когда толщина слоя X стремится к нулю. Методика, описанная ранее в [18], позволяет оценить суммарную величину коэффициентов зеркальности внешней поверхности и прохождения интерфейса, а также влияния на нее зернограничного рассеяния. В исследуемых нами системах были проведены измерения удельной проводимости двух серий трехслойных пленочных систем: Cu/Fe/Cu и Cr/Fe/Cr при разных толщинах промежуточного слоя



**Рис. 4** – Рентгеновские рефлектометрические зависимости для пленочной системы  $[Cr(5)/Fe(5)]_2/Si(111)$ , неотожженной (а) и отожженной до 700 К (б)

**Таблица 2** – Результаты расчета толщины и шероховатости отдельных слоев для пленочной системы  $[Cr(5)/Fe(5)]_2/Si(111)$

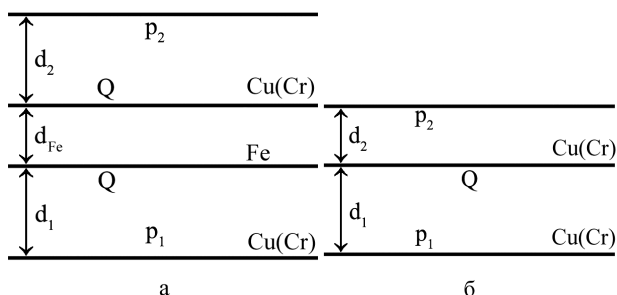
Неотожженная			Отожженная до 700 К		
слой	$d$ , нм	$\sigma$ , нм	слой	$d$ , нм	$\sigma$ , нм
1 П(Si)	-	1,1	1 П(Si)	-	1,1
2 Fe	4,8	0,21	2 Fe	5,4	1,42
3 Cr	5,9	1,14	3 Cr	5,6	2,10
4 Fe	4,9	0,16	4 Fe	5,9	1,37
5 Cr	6,9	1,37	5 Cr	6,1	1,87

Fe. При этом толщина пленки Cu и Cr выдерживалась постоянной и равной 20 нм. На рис. 5 представлено схематическое изображение пленочной системы при фиксированном (а) и «исчезающем» (б) значении толщины промежуточного слоя.

Для граничного случая, когда толщина промежуточного слоя стремится к нулю, выражение для удельного сопротивления Cu будет иметь вид

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} \cong 1 - \frac{3}{16k} (2 - p - Q), \quad (4)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость системы, полученная экстраполяцией



**Рис. 5** – Схематическое изображение трехслойной пленки при фиксированной (а) и исчезающей (б) толщине промежуточного слоя.

$Q$  – коэффициент прохождения интерфейса;

$p = p_1 = p_2$  – коэффициент зеркальности внешних поверхностей пленки

зависимости  $\sigma$  от толщины промежуточного слоя на нуль;  $k = d/\lambda_\infty$  – приведенная толщина (средняя длина свободного пробега  $\lambda_\infty$  и удельная проводимость  $\sigma_\infty = \lim_{d \rightarrow \infty} \sigma$  соответствуют массивным конденсатам). Из (4) получаем выражение для суммы коэффициентов зеркальности ( $p$ ) и прохождения интерфейса ( $Q$ )

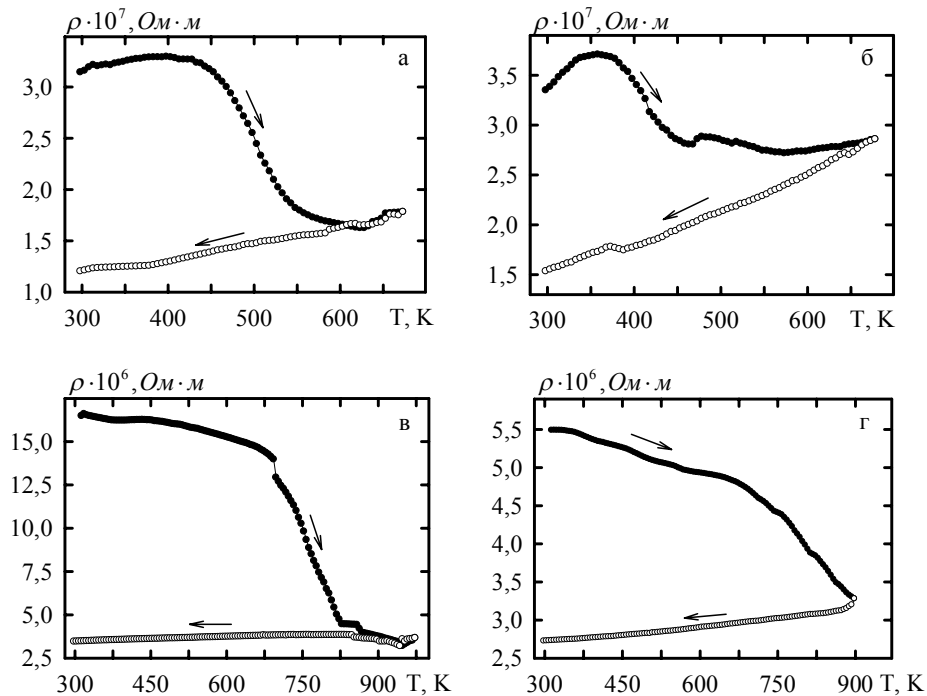
$$p + Q = 2 - \frac{16 \cdot d}{3 \cdot \lambda_\infty} (1 - \sigma \times \rho_\infty). \quad (5)$$

Для более корректных расчетов автор [17] предлагает вместо величины  $\rho_\infty$  в формуле (5) использовать удельное зернограничное сопротивление  $\rho_g$ , величину которого можно рассчитать из соотношения модели Фука для случая  $k \gg 1$ :

$$\frac{\rho}{\rho_\infty} = 1 + \frac{3\lambda_0(1-p)}{8d},$$

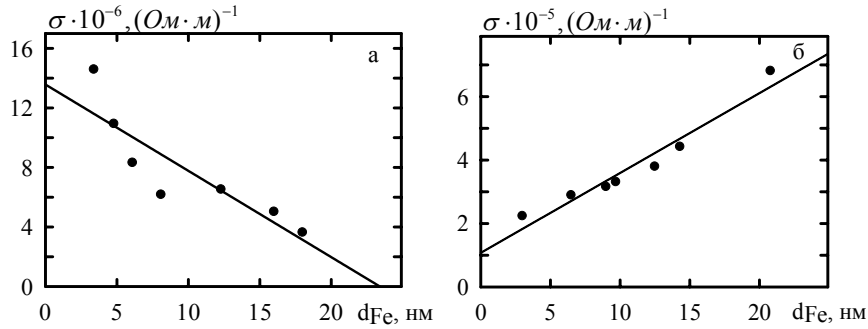
т.е. выражение для  $\rho_g$  имеет вид:  $\rho_g = \rho_\infty + A/d$ , где  $A = 3\rho_\infty\lambda_0(1-p)/8$  – своеобразная константа для каждого пленочного материала,  $d$  – толщина пленки Cu или Cr.

Исходя из экспериментальных данных для трехслойных систем Cu(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cu(20)/Π (рис. 6, а, б) и Cr(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cr(20)/Π (рис. 6 в, г)



**Рис.6** – Температурные зависимости удельного сопротивления для пленочных систем Cu(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cu(20)/Π (а, б) и Cr(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cr(20)/Π (в, г). Толщина  $d_{Fe}$ , нм: а – 6,1, б – 12,3; в – 6,5, г – 16



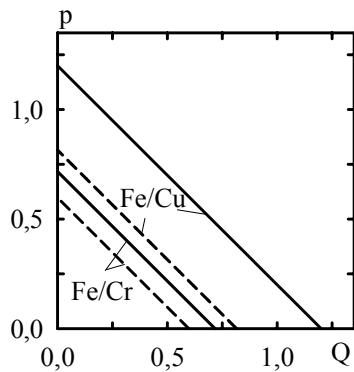


**Рис. 7** – Зависимости удельной проводимости от толщины промежуточного слоя Fe для пленочных систем Cu(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cu(20)/Pi (а) и Cr(20)/Fe( $d_{Fe}$ )/Cr(20)/Pi (б)

были построены зависимости удельной проводимости от толщины слоя Fe (рис. 7). Ее аппроксимация на нуль позволяет определить проводимость системы при исчезающем промежуточном слое.

Разный характер зависимостей  $\sigma(d_{Fe})$  можно объяснить различной величиной асимптотических значений  $\rho_{\infty}$  для пленок Cu, Fe и Cr на размерных зависимостях  $\rho$  от толщины промежуточного слоя.

Соотношения между значениями коэффициентов  $p$  и  $Q$  для случая фуксовского (без учета ЗГР) и маядасовского (с учетом ЗГР) приближений представлены на рис. 8, из которого вытекает, что в первом приближении  $p + Q = 0,8$  (Fe/Cu) и  $0,6$  (Fe/Cr) или  $p + Q = 1,2$  (Fe/Cu) и  $0,7$  (Fe/Cr). Если взять наиболее типичное значение коэффициента зеркальности  $p \cong 0,2$ , то можно произвести оценку коэффициента прохождения электроном интерфейса:  $Q \cong 0,4$  (Fe/Cr) –  $0,6$  (Fe/Cu) при фуксовском и  $Q \cong 0,5$  (Fe/Cr) –  $1,0$  (Fe/Cu) при маядасовском приближении, что согласуется качественно с типичным значением коэффициента прохождения границ зерен электроном.



**Рис. 8** – Зависимость  $(p + Q)$  в маядасовском (сплошные линии) и фуксовском (пунктирные линии) приближениях

#### 4. ВЫВОДЫ

На основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Процессы взаимной диффузии атомов в пленочных системах Cu/Fe и Fe/Cr имеют такие особенности:
  - в неотожженных образцах имеет место частичное (Cu/Fe) или полное (Fe/Cr) перемешивание атомов в результате проявления конденсационно-стимулированной диффузии;
  - при термообработке этих пленочных систем степень перемешивания атомов в системе Cu/Fe увеличивается, в то время как в Fe/Cr – наблюдается частичное расслоение твердого раствора (Fe, Cr), что проявляется в появлении на диффузионных профилях нечетких максимумов и их смещении в сторону подложки или внешней поверхности системы;
  - произведен расчет и сравнение величины эффективных коэффициентов взаимной диффузии, полученных на основе измерений методами вторично-ионной масс-спектрометрии и оже-электронной спектроскопии; записаны уравнения термодиффузии атомов Cu и Fe.
2. Исследование методом рентгеновской рефлектометрии показало, что шероховатость интерфейса немагнетик/магнетик  $\sigma_{\text{HM/M}}$  преобладает над величиной  $\sigma_{\text{M/HM}}$  (например,  $\sigma_{\text{Cu/Fe}} = 1,4$  нм,  $\sigma_{\text{Fe/Cu}} = 1,2$  нм;  $\sigma_{\text{Cr/Fe}} = 1,2$  нм,  $\sigma_{\text{Fe/Cr}} = 0,2$  нм); этот результат согласуется с величинами коэффициентов диффузии.
3. На основе методики де Врайса произведен расчет в фуксовском и маядасовском приближениях суммарная величина  $p+Q$  и оценка коэффициента прохождения электронами интерфейсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (г/б тема № 0109U001387).

#### DIFFUSION PROCESSES AND INTERFACE ELECTRON SCATTERING IN FILM SYSTEMS BASED ON Cu/Fe AND Fe/Cr

*O.V. Synashenko*<sup>1</sup>, *A.I. Saltykova*<sup>2</sup>, *I.Yu. Protsenko*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sumy State University,  
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine  
E-mail: [protsenko@aph.sumdu.edu.ua](mailto:protsenko@aph.sumdu.edu.ua)

<sup>2</sup> Sumy State Pedagogical University of A.S. Makarenko,  
87, Romens'ka Str., 40002, Sumy, Ukraine

*Investigation results of diffusion processes by the SIMS and the AES methods in Cu/Fe and Fe/Cr film systems are represented; influence of the annealing temperature on the effective thermal diffusion coefficients is studied. Values of the interface transmission coefficient and effective diffusion coefficients in different processes, namely, the condensation-stimulate diffusion, the ion-stimulate one, and the thermal diffusion, are calculated.*

**Keywords:** DIFFUSION PROFILE, SIMS, DIFFUSION COEFFICIENT, INTERFACE ROUGHNESS, INTERFACE TRANSMISSION COEFFICIENT.

**ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ІНТЕРФЕЙСНЕ РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ  
У ПЛІВКОВИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ CU/FE І FE/CR**

**О.В. Сынашенко<sup>1</sup>, А.І. Салтикова<sup>2</sup> І.Ю. Проценко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна,  
E-mail: [protsenko@aph.sumdu.edu.ua](mailto:protsenko@aph.sumdu.edu.ua)

<sup>2</sup> Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка,  
вул. Роменська, 87, 40002, Суми, Україна

Наведені результати дослідження дифузійних процесів методами ВІМС і ОЕС у плівкових системах Cu/Fe і Fe/Cr; вивчено вплив температури відпалювання на ефективні коефіцієнти термодифузії. Розраховані величини коефіцієнта проходження електронами інтерфейсу та ефективні коефіцієнти дифузії при різних процесах: конденсаційно-стимульованої, іонно-стимульованої і термодифузії.

**Ключові слова:** ДИФУЗІЙНИЙ ПРОФІЛЬ, ВІМС, КОЕФІЦІЄНТ ДИФУЗІЇ, ШОРСТКІСТЬ ІНТЕРФЕЙСУ, КОЕФІЦІЄНТ ПРОХОДЖЕННЯ ІНТЕРФЕЙСУ.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции (ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера) (М.: Мир: 1982).
2. P. Grunberg, *Acta mater.* **48**, 239 (2000).
3. L. Romashev, A. Rinkevich, A. Yuvchenko et al., *Sensor Actuat. A-Phys.* **91**, 30 (2001).
4. С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний, та ін., *Успехи физ. мет.* **8**, №4, 247 (2007).
5. O.F. Bakkaloglu, *J. Magn. Magn. Mater.* **182**, 324 (1998).
6. R. Schad, J. Barnas, P. Belien et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **156**, 339 (1996).
7. R. Schad, P. Belien, G. Verbanck et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **198-199**, 104 (1999).
8. A.P. Kuprin, L. Cheng, Z. Altounian et al., *Hyperfine Interact.* **144-145**, 141 (2002).
9. Э.М. Шпилевский, М.Э. Шпилевский, *Тонкие пленки в электронике*, МСТПЭ-12 (Харьков: ННЦ ХФТИ: 2001).
10. Я.Е. Гегузин, Л.В. Герловская, Н.Т. Гладких, и др., *ФММ*, **20** №4, 636 (1965).
11. В.М. Иевлев, Е.В. Шведов, В.П. Ампилогов, и др., *Вестник ВГТУ. Серия: Материаловедение* **1.4**, 41 (1998).
12. В.В. Бібик, Л.В. Одноворець, І.О. Шпетний, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка* **9(93)**, 91 (2006).
13. В.В. Бібик, Т.М. Гричановська, М. Маршалек, та ін., *Металлофиз. новейшие технол.* **28** №6, 707 (2006).
14. С.И. Проценко, О.В. Сынашенко, Е. Забила, и др., *Поверхность* (принято в печать)
15. И.А. Гарифуллин, Н.Н. Гарифьянов, Р.И. Салихов, *Известия РАН. Серия физическая* **71** №2, 280 (2007) (I.A. Garifullin, N.N. Garif'yanov, R.I. Salikhov, *V. Russ. Acad. Sci. Phys.* **71** No2, 272 (2007)).

16. І.М. Пазуха, *Фізичні процеси в чутливих елементах датчиків температури, деформації і тиску: Автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.01* (Суми: Вид-во СумДУ: 2009).
17. J.W.C. de Vries, *Solid State Commun.* **65** No3, 201 (1988).
18. І.М. Пазуха, С.І. Проценко, І.Ю. Проценко, та ін., *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка* **9(93)**, 7 (2006).