

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе методами теории марковских процессов получены общие выражения для первого и второго моментов распределения времени первого пересечения заданного уровня параметром состояния одномерных стохастических систем, взаимодействующих с флуктуирующей в пространстве и во времени окружающей средой. Установлено, что в случае, когда временные флуктуации среды отсутствуют, а пространственные флуктуации моделируются произвольной ограниченной случайной функцией, первый момент зависит лишь от одномерной плотности вероятности этой функции. Определена также средняя скорость достижения параметром состояния заданного уровня.

SUMMARY

Within the theory of continuous Markovian processes the first and the second moments of the first-passage time distribution of a given level by the state parameter of one-dimensional systems interacting with fluctuating medium, are found.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорстхемке В., Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы. - М.: Мир, 1987. - 400 с.
2. Ван Кампен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии. - М.: Высшая школа, 1990. - 376 с.
3. Sinai Ya.G. // Theor. Prob. Appl, 1982. - V 27. - P.247-251.
4. Bouchaud J.P., Georges A. // Phys. Rep. - 1990. - V.195. - N 4,5. - P.124-293.
5. Bouchaud J.P., Comtet A., Georges A., Le Doussal P. // Annals of Phys. 1990. - V.201. - N 2. - P.285-341.
6. Дуб Дж.Л. Вероятностные процессы. - М.: ИЛ, 1956. - 605 с.
7. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. - М.: Мир, 1986. - 528 с.
8. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. - М.: Наука, 1987. - 304 с.
9. Денисов С.И. Письма в ЖЭТФ, 1994. Т.20, N 11. - С.32-34.

Поступила в редколлегию 6 марта 1996 г.

УДК 535.24.2

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНО- И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ II. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ

Л.В.Одноворец, ст.преп.; И.Е.Проценко, проф.; А.Н.Чорноус, ст.преп.

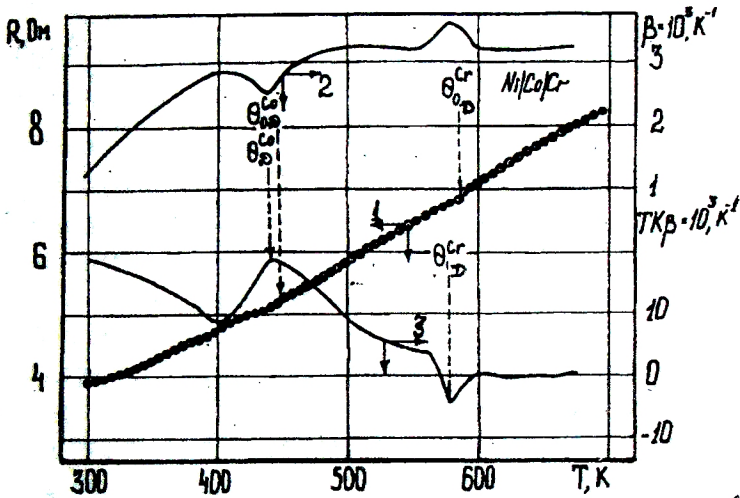
ВВЕДЕНИЕ

В работе приведены результаты дальнейших исследований электрофизических свойств (удельного сопротивления, тензочувствительности), выполненных на примере многослойных пленок на основе хрома, кобальта и никеля. Полученные результаты расширяют представление о температурно-размерных эффектах в пленочных образцах.

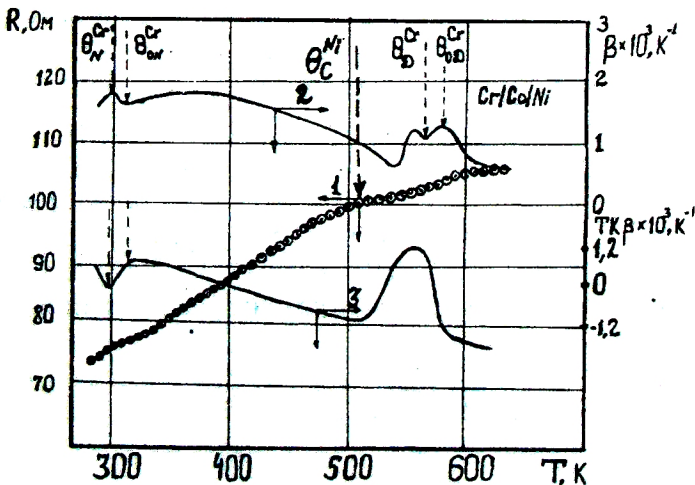
1 ТЕМПЕРАТУРНО-РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Температурная зависимость удельного сопротивления и ТКС металлических однослойных пленок изучена достаточно хорошо. Известно [1], что для пленок ОЦК металлов в интервале температур 100 -

$400 \text{ K } \rho \sim T^2$ и данная зависимость обусловлена электрон-фононным взаимодействием в условиях сильного проявления размерного эффекта. При более высоких температурах $\rho \sim T$. Для пленок ферромагнетиков (никель и кобальт) наблюдается квадратичная по температуре зависимость $\rho(T)$, причем в случае никеля - в двух температурных интервалах, обусловленная электрон-магнонным рассеянием. В области относительно низких температур ($\sim 100 \text{ K}$) в пленках кобальта фиксируется зависимость $\rho \sim T^3$. На температурной зависимости $\rho(T)$, и особенно $\beta(T)$, наблюдаются особенности в точке Нееля, $2/3 \Theta_{oD}$ и Θ_{oD} (Θ_{oD} - температура Дебая для массивных образцов).



а)



б)

Рисунок 1 - Температурная зависимость сопротивления (1), ТКР (2), ТКРβ (3) для пленок Ni/Co/Cr/Π ($d_1=65 \text{ нм}$, $d_2=75 \text{ нм}$, $d_3=80 \text{ нм}$) (а); Cr/Co/Ni/Π ($d_1=20 \text{ нм}$, $d_2=20 \text{ нм}$, $d_3=20 \text{ нм}$) (б).

θ_N^{Cr} , θ_{ON}^{Cr} , θ_C^{Ni} , θ_D^{Cr} , θ_{oD}^{Cr} , θ_D^{Co} , θ_{oD}^{Co} - температуры Нееля, Кюри, Дебая для пленочных и массивных образцов

В наших более ранних работах [2, 3] исследована температурная зависимость $\rho(T)$ и $\beta(T)$ на примере двухслойных и трехслойных двухкомпонентных пленок на основе никеля, кобальта и хрома. В пленках на основе никеля и кобальта в интервале температур $100 - \Theta_c$ (Θ_c - температура Кюри для пленки никеля) наблюдается $\rho \sim T^2$. В точке Θ_c квадратичная зависимость переходит в линейную, что проявляется в виде минимума и максимума на зависимости $\beta(T)$. В пленках на основе кобальта и хрома проявляется очень сильная особенность в точке Нееля (Θ_N). Выше температуры Нееля $\rho \sim T$, но с различными угловыми коэффициентами в интервалах $\Theta_N - 2/3 \Theta_D^{Cr}$ и $2/3 \Theta_D^{Cr} - 700K$. При температуре $2/3 \Theta_D^{Cr}$ наблюдается еще одна особенность.

На рис.1 представлена температурная зависимость R , β и $TK\beta$ для трехслойных пленок. В пленке $Ni(80)/Co(75)/Cr(65)/\Pi$ (рис.1,а) наблюдаются особенности в точках Θ_D^{Co} и Θ_D^{Cr} , которые более сильно выражены в виде минимумов и максимумов на зависимости $\beta(T)$ и $TK\beta(T)$. Что касается пленки $Cr(20)/Co(20)/Ni(20)/\Pi$ (рис.1,б), то особенности на температурной зависимости наблюдаются в точке Нееля и точке Дебая для хрома и в точке Кюри - для никеля. В исследуемом интервале толщин зависимость $R(T)$ является линейной.

На основе полученных данных была проведена апробация модели Р.Диммиха [4], примененная нами ранее для двухслойных [5] и трехслойных двухкомпонентных [3] пленок. Исходя из предположения о параллельном соединении двух слоев, Диммихом [4] было получено самое общее выражение для β , которое нами [5] было упрощено до вида, пригодного для сравнения с экспериментом. Применительно к параллельному соединению трех слоев ТКС можно было записать таким образом:

$$\beta \approx \sum_{i=1}^3 A_i \beta_{gi} \left(1 - \frac{d \ln F_i}{d \ln K_i} - \frac{d \ln F_i}{d \ln l_i} \right) \quad (1)$$

при условии, что перекрестные производные $\frac{d \ln F_i}{d \ln K_j}$ и $\frac{d \ln F_i}{d \ln l_j}$ ($i \neq j$) равны нулю. В предельном случае больших толщин соотношение (1) упрощается до вида

$$\beta \approx \sum_{i=1}^3 A_i \beta_{gn} \quad (1')$$

Здесь $A_i = \frac{d_i \sigma_{gi} F_i}{\sum d_i \sigma_{gi} F_i}$, $F_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{gi}}$, $K_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}}$, $l_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$, где d_i - толщина i -го слоя; σ_{gi} , σ_i - удельная проводимость материала i -го слоя в массивном и пленочном состояниях соответственно; λ_{0i} - средняя длина свободного пробега носителей электрического тока; L_i - средний размер

кристаллитов; β_{gi} – ТКС поликристаллической пленки большой толщины ($d \rightarrow \infty$).

При использовании соотношения (1) производные

$$\frac{d \ln F_i}{d \ln K_i} \text{ и } \frac{d \ln F_i}{d \ln l_i}$$

находятся из графиков дифференцированием экспериментальных зависимостей $\rho_{gi} \cdot \rho_i^{-1}$ от $\lambda_{0i}^{-1} \cdot d$ или $\lambda_{0i}^{-1} \cdot L_i$. При толщинах, начиная с которых ρ_i не зависит от d_i и L_i , используется соотношение (1').

Результаты расчетов β представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, экспериментальные результаты неплохо соответствуют расчетным, но отличие $(\beta_{расч} - \beta_{экс})/\beta_{расч}$ достигает все-таки 14 - 20%.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные данные по ТКС

Пленки	d , нм	$\beta_{экс} \cdot 10^3, K^{-1}$	$\beta_{расч} \cdot 10^3, K^{-1}$
Ni/Co/Cr/П	80 (Ni)	2,84	3,32
	220 75 (Co)		
	65 (Cr)		
Cr/Co/Ni/П	20 (Cr)	1,80	2,24
	60 20 (Co)		
	20 (Ni)		

Можно указать две основные причины такого отличия экспериментальных и расчетных данных: вклад макронапряжений термического происхождения на границе раздела слоев и взаимная диффузия атомов различных металлов в общее сопротивление. Отметим, что в модели Диммиха [4] эти два дополнительные механизма рассеяния носителей электрического тока совсем не рассматриваются. Согласно оценкам, произведенным в работе [6], термические макронапряжения могут обусловить изменение удельного сопротивления пленки на 2–5%. Следовательно, основной вклад в увеличение общего сопротивления трехслойных пленок (или уменьшение ТКС) обусловлен процессами взаимной диффузии [7].

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК

В отличие от однослойных пленок теоретические модели размерного эффекта в тензочувствительности многослойных (в том числе и двухслойных) пленок к настоящему времени практически не разработаны. В работе [8] этот вопрос рассмотрен на примере двухслойных монокристаллических пленок. На основе этих данных в работе [9] предложено полуфеноменологическое соотношение для коэффициентов γ_l и γ_t применительно к поликристаллическим пленочным образцам. Оно было получено при следующих допущениях о продольной (ϵ_l) и поперечной (ϵ_t) деформациях:

$$\frac{\Delta l}{l_H} = \varepsilon_l, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta a}{a_H} = \varepsilon_a,$$

что упрощает рабочее соотношение до вида, пригодного для сравнения с экспериментом.

Так как выражения для η_l и η_t очень похожи, то достаточно привести одно из них, например, для η_l :

$$\eta_l = \frac{dR/R_H}{dl/l_H} \approx A_1 \left[1 + \eta_1 - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{01}} \right) \left(\eta_1 + \eta_2 \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} \right) \right] + A_2 \left[1 + \eta_2 - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{02}} \right) \left(\eta_2 + \eta_1 \frac{\beta_{02}}{\beta_{01}} \right) \right] + 1 + 2\mu_s. \quad (3)$$

Здесь A_i имеет вид (1');

β и β_{0i} - температурный коэффициент сопротивления двухслойной пленки и массивного образца (при расчетах более корректно вместо β_{01} использовать β_{gi});

$\eta_i = -\frac{1}{\lambda_{0i}} \frac{d\lambda_{0i}}{d\varepsilon_{ii}}$ - деформационный коэффициент средней длины свободного

пробега λ_{0i} электронов в i -м слое;

μ_f и μ_s - соответственно коэффициент Пуассона для материала пленки и подложки;

R_H и l_H - начальное значение сопротивления и длины двухслойной пленки.

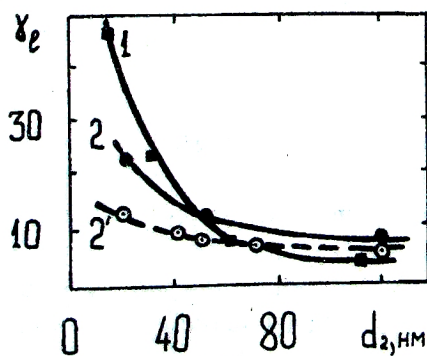


Рисунок 2 - Зависимость $\eta_l(1,2)$ и $\eta_t(2')$ от d_2 для пленок Cr/Ni/Π ($d_1 \approx 30$ нм), (1), Ni/Cr/Π ($d_1 \approx 70$ нм), (2, 2') (деформация методом изгиба)

Учет зернограничного рассеяния электронов в работе [9] осуществляется посредством функции Фукса (функция F_i), как и в теории Диммиха [4].

В работе [10] приведены результаты исследования тензоэффекта в двухслойных пленках Cr/Co/Π, Co/Cr/Π, Co/Ni/Π, Ni/Co/Π методом деформации на изгиб пленки. Здесь были отмечены две основные особенности размерной зависимости коэффициентов η_l и η_t : в пленках, где нижним слоем является кобальт, с ростом толщины второго слоя (d_2) при фиксированной толщине базисного (d_1) величина

коэффициентов η и η_t растет, а в системах $Co/Ni/П$ и $Co/Cr/П$ наблюдается обратная тенденция. Ниже приводятся результаты по исследованию тензочувствительности двухслойных пленок $Cr/Ni/П$, $Ni/Cr/П$ методом изгиба и растяжения и $Co/Cr/П$, $Cr/Co/П$, $Ni/Co/П$, $Co/Ni/П$ - методом растяжения (рис. 2, 3).

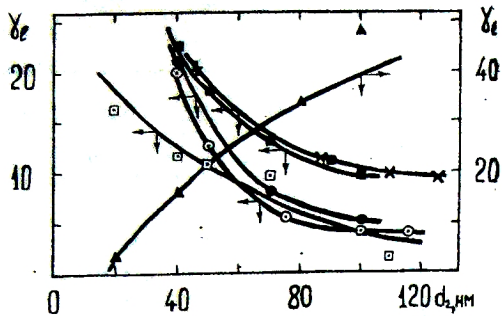


Рисунок 3 - Зависимость η от d_2 для пленок: \square - $Cr/Ni/П$ ($d_1 \approx 90$ нм), \blacksquare - $Ni/Cr/П$ ($d_1 \approx 80$ нм), \bullet - $Co/Ni/П$ ($d_1 \approx 70$ нм), \circ - $Ni/Co/П$ ($d_1 \approx 90$ нм), \times - $Co/Cr/П$ ($d_1 \approx 120$ нм), \blacktriangle - $Cr/Co/П$ ($d_1 \approx 95$ нм) (деформация методом растяжения)

анализируется в работе [11], авторы которой, предполагая независимость поверхностного и зернограничного рассеяний электронов, ввели два параметра:

$$\nu = L\lambda_0^{-1} \left(\ln \frac{1}{r} \right)^{-1}, \quad \mu = d\lambda_0^{-1} \left(\ln \frac{1}{p} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где r - коэффициент прохождения межзеренного барьера; p - параметр зеркальности. Как было показано нами [10] на примере однослойных пленок, эффективность того или другого типа рассеяния оказывает влияние на размерную зависимость.

В случае двухслойных пленок можно записать соотношение для параметров зернограничного ν_{12} и поверхностного μ_{12} рассеяний, которые, однако, не учитывают процессов взаимной диффузии атомов из одного слоя в другой.

Соотношение для параметров ν_{12} и μ_{12} будет иметь следующий вид:

$$\nu_{12} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} L_1 \lambda_{01}^{-1} \left(\ln \frac{1}{r_1} \right)^{-1} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} L_2 \lambda_{01}^{-1} \left(\ln \frac{1}{r_2} \right)^{-1}, \quad (4')$$

$$\mu_{12} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} d_1 \lambda_{01}^{-1} \left(\ln \frac{1}{p_1} \right)^{-1} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} d_2 \lambda_{02}^{-1} \left(\ln \frac{1}{p_2} \right)^{-1}. \quad (4'')$$

Из расчетов, сделанных по соотношениям (4') и (4''), можно сделать два вывода: эффективность поверхностного рассеяния с ростом толщины второго слоя уменьшается, и с ростом d_2 роль зернограничного рассеяния в пленках Cr/Co/P становится более эффективной.

Таблица 2 - Экспериментальные и расчетные данные по тензочувствительности двухслойных пленок

Пленки	$d_1, \text{нм}$	$d_2, \text{нм}$	Экспериментальные данные η	Расчетные данные η с использованием β_g
Деформация на изгиб пленки				
Ni/Cr	70 (Cr)	50	7.70	4.65
		120	7.50	4.11
Cr/Ni	30 (Ni)	60	8.70	4.97
		110	4.70	5.52
Деформация на растяжение пленки				
Ni/Cr	80 (Cr)	70	12.90	3.19
		100	9.70	2.79
Cr/Ni	90 (Ni)	70	9.50	1.60
		110	1.50	0.90
Co/Cr	120 (Cr)	90	11.80	4.89
		110	9.70	4.48
Cr/Co	95 (Co)	40	16.00	2.64
		80	33.70	1.23
Ni/Co	90 (Co)	75	5.40	3.29
		115	3.90	3.96
Co/Ni	70 (Ni)	70	7.90	1.70
		100	5.20	1.30

Последний вывод может в какой-то мере объяснить аномальный характер зависимости η от d_2 для пленок Cr/Co/P.

Другим фактором, который может оказать влияние на величину коэффициентов тензочувствительности и характер размерной зависимости, являются, как и в случае электропроводности, процессы взаимной диффузии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работах комплекс исследований тонких металлических пленок указывает на то, что исследование электрофизических свойств (удельное сопротивление, ТКС,

тензочувствительность и др.) является самостоятельным научным направлением в физике тонких пленок со своими специфическими задачами (яркий пример этого – исследования электропроводности металлической пленки с полупроводниковым покрытием) и нерешенными проблемами. В экспериментальном отношении на пути таких исследований возникают затруднения, связанные с определением послойного распределения элементов в столь тонких, в буквальном понимании этого слова, объектах. В теоретическом плане возникают трудности не только в создании адекватных экспериментальной ситуации теорий, но даже в усовершенствовании известных, так как остаются неизвестными зависимости концентрации элементов, дефектов и др. величин по глубине пленочного образца.

Затронутый круг вопросов и является предметом наших дальнейших исследований.

Эти работы были частично поддержаны Международной Соросовской программой поддержки образования в области точных наук (ISSEP), грант N PSU052138.

SUMMARY

Temperature dependance of resistance and temperature coefficient of resistance of three layer films Cr/Co/Ni/S and Ni/Co/Cr/S (S - substrate) and size dependance of strain coefficient of resistance in double-layer films on base Cr, Co, Ni were investigated. The analysis show, that the main reason for difference between theory and experimental datas is codiffusion.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобода В.Б., Проценко И.Е., Смолин М.Д., Ярёменко А.В. Исследование размерных и температурных эффектов в тонких пленках переходных металлов // УФЖ.- 1985.- Т.30, N5.- С.435 -440.
2. Проценко И.Е., Черноус А.Н., Яременко Л.А. Исследование температурной зависимости сопротивления двухслойных пленочных систем Co/Cr и Co/Ni // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования.- 1994.- N1(27).- С. 83-84.
3. Одиногорец Л.В., Проценко И.Е., Салтыкова А.И. Размерный эффект электропроводности в трехслойных пленочных системах на основе хрома и кобальта и никеля и кобальта // Там же.- С. 85 -87.
4. Dimmich R. Electrical conductance and temperature coefficient of resistivity of double-layer films // Thin Solid Films.- 1988.- v.158, N1.- P.13 -24.
5. Проценко И.Ю., Черноус А.М. Розмірний ефект в електропровідності двошарових полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії металів // Вісник Сумського державного університету.- 1994.- N 1.- С. 19 -25.
6. Проценко И.Е., Смолин М.Д., Ярёменко А.В., Лобода В.Б. Температурная зависимость удельного сопротивления тонких плёнок переходных d-металлов // УФЖ.- 1988.- Т.33, N6.- С.875 -880.
7. Проценко И.Е., Петренко С.В., Черноус А.Н., Одиногорец Л.В. Элементный состав и диффузионные процессы в многослойных пленочных системах // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования.- 1994.- N 1 (27).- С. 88-89.
8. Khater F., El-Hiti M. Strain coefficient of electrical resistance of double-layer thin metallic films// Phys. stat. sol.- 1988.- v.108, N1.- P. 241 -249.
9. Кузьменко А.И., Петренко С.В., Проценко И.Е. Эффект тензочувствительности в двухслойных пленках переходных металлов // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования.- 1994.- N 2 (10).- С. 87-89.
10. Проценко И.Е., Черноус А.Н. Тензочувствительность одно- и двухслойных пленок на основе хрома, никеля и кобальта // Металлофизика и новейшие технологии.- 1994.- Т.16, N12.- С. 18-23.
11. Tellier C.R., Pichard C.R., Tossier A.J. Threedimensional strain coefficients of resistivity of thin polycrystalline metals films// J. Mater. Sci.- 1981.- v.16, N8.- P.2281-2286.

Поступила в редколлегию 6 июля 1995 г.