

ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ ТОНКИХ ПЛІВОК НА ОСНОВІ ПЕРЕХІДНИХ d – МЕТАЛІВ

А.М.Чорноус, ст.викл., канд. фіз.-мат. наук

ВСТУП

Явище зміни електричного опору в процесі деформації зразка – тензорезистивний ефект – характеризується двома коефіцієнтами. У випадку, коли напрямок протікання електричного струму збігається (протилежний) з напрямком деформації – характеризується коефіцієнтом повздовжньої тензочутливості γ_l та коефіцієнтом поперечної тензочутливості γ_t – якщо електричний струм протікає перпендикулярно розтягувальним (стискальним) силам [1]. Як правило, величина γ_l більша γ_t , але вони мають однакову природу. Для полікристалічного металевого зразка γ_l являє собою суму двох коефіцієнтів: $\gamma_l = \gamma_{l3} + \gamma_{lm}$ і складає приблизно одиницю. γ_{l3} пов'язаний з процесами, що відбуваються в середині зерна під час деформації. У свою чергу, γ_{lm} характеризує процеси розсіювання, які відбуваються на межі зерен.

При переході від масивного полікристала до плівки величини γ_{l3} та γ_{lm} змінюються, і, як правило, в бік збільшення. γ_{l3} змінюється в меншій мірі, що пов'язано не стільки зі збільшенням параметра кристалічної решітки, а з тим, що реальні плівки є більш дефектними у порівнянні з масивними зразками. У більшій мірі підлягає зміні величина γ_{lm} , перш за все з тієї причини, що товщина плівки накладає обмеження на середній розмір кристалітів. Це, в свою чергу, призводить до зменшення середньої довжини вільного пробігу носіїв електричного струму (СДВП). Крім зміни γ_{l3} та γ_{lm} , у плівкових зразках істотний вплив починає відігравати розсіювання на зовнішніх поверхнях. Це приводить до виникнення ще однієї складової в коефіцієнті тензочутливості – γ_{ln} . Четвертий доданок γ_{lp} з'являється при переході до дво- та багат шарових плівкових структур, пов'язаний із розсіюванням на межі розділу між шарами та приводить до підвищення γ_l багат шарової плівки порівняно із одношаровою такої ж товщини.

1 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ

Наведемо короткий огляд теорій тензоефекту одно – та багат шарових плівок металів. Історично першою була побудована модель розмірного ефекту в тензочутливості монокристалічних плівок на основі теорії електропровідності Фукса–Зондгеймера, яка описана в [1]. Згідно з нею вираз для γ_l має такий вигляд:

$$\gamma_l = \gamma_{0l} - \frac{Y}{Z}(\eta_l - \mu_f), \quad (1)$$

де γ_{0l} – коефіцієнт тензочутливості масивного зразка; Y і Z – деякі функції зведеної товщини плівки k ($k = d/\lambda_0$; d – товщина; λ_0 – СДВП); $\eta_l = \lambda_0^{-1} d\lambda_0/d\varepsilon_l$ – деформаційний коефіцієнт СДВП; ε_l – повздовжня деформація плівки; μ_f – коефіцієнт Пуассона плівки. У зв'язку з тим що дана теорія не враховує розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен, вона має недостатню відповідність з експериментом. Подальший розвиток теоретичних уявлень про розмірний ефект у тензочутливості пов'язаний з роботами французьких вчених Тельє, Тоссе, Пішара (ТПП). Ними був врахований поряд із зовнішнім також і внутрішній розмірний ефект. Так, вони у роботі [2] на основі теорії електропровідності

металевих плівок Маядаса і Шатцкеса одержали вирази для γ_l і γ_t , які мають дуже складний вигляд і не дозволяють аналітично оцінити величину коефіцієнтів тензочутливості та порівняти їх із експериментальними результатами. З цієї причини Пішаром і Тельє в роботі [3] була здійснена лінеаризація одержаних в [2] співвідношень до вигляду, придатного для порівняння з експериментом. Вираз для γ_l в цьому випадку має такий вигляд:

$$\gamma_l \cdot d \cong (\eta_l + 1)f(\alpha)d - (1-p)\lambda_0[(\eta_l + 1)f(\alpha)H(\alpha) - (1-\mu')U(\alpha)], \quad (2)$$

де $f(\alpha)$; $\alpha = \lambda_0/L(R/(1-R))$ - функція та параметр розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен; (L - середній розмір кристалітів); $H(\alpha)$ та $U(\alpha)$ - відомі (див., наприклад, [4]) функції параметра α ; $\mu' = \mu_f(1 - \mu_s)/(1 - \mu_f)$ (μ_s - коефіцієнт Пуассона підкладки); p - коефіцієнт дзеркальності зовнішньої поверхні плівки.

Більш загальна теорія тензоефекту була розроблена Тельє, Тоссе і Пішаром [5] на основі власної тривимірної моделі електропровідності. Для врахування як зовнішнього, так і внутрішнього розмірних ефектів ТП вводять два параметри розсіювання носіїв електричного струму на межах кристалітів (ν) та на поверхні плівки (μ). На основі одержаних співвідношень для γ_l і γ_t можна вести розрахунок коефіцієнтів тензочутливості та порівнювати їх із експериментом. Згідно з [6, 7] спостерігається задовільна відповідність розрахункових та експериментальних результатів.

На відміну від одношарових для дво- та багатошарових плівок у теоретичному плані питання розмірного ефекту залишається фактично невирішеним, незважаючи на те, що існує ряд теоретичних моделей. У роботі єгипетських вчених Катара і Ель-Хіті [8] запропонована теорія розмірного ефекту тензочутливості двошарових монокристалічних металевих плівок. Врахування розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен було здійснено у роботі [9], яка ґрунтується на ідеях [8]. Згідно з [9] вираз для коефіцієнта повздовжньої тензочутливості має вигляд

$$\gamma_l = A \left[1 + \eta_{l1} - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{01}} \right) \left(\eta_{l1} + \eta_{l2} \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} \right) \right] + B \left[1 + \eta_{l2} - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{02}} \right) \left(\eta_{l2} + \eta_{l1} \frac{\beta_{02}}{\beta_{01}} \right) \right] + 1 + 2\mu_f, \quad (3)$$

де $A = \frac{d_1 \sigma_{01} F_1}{d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2}$; $B = 1 - A$; $F_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_0}$ (σ_i , σ_{0i} - питома провідність для

плівки і масивного зразка); β , β_{0i} - температурний коефіцієнт опору двошарової плівки та масивного зразка матеріалу окремо взятого шару. Як буде показано далі, експериментальні результати збігаються з розрахунковими на основі (3) лише якісно. Основною причиною цього є, на нашу думку, недосконалість виразу (3). Зокрема, він не враховує дифузійних процесів між шарами, а також був одержаний за умови, що коефіцієнт дзеркальності та розсіювання на межі зерен не залежить від деформації. Наведене співвідношення по своїй суті є мікроскопічним. Нами у роботі [10] було одержано у макроскопічному наближенні вираз для коефіцієнтів тензочутливості двошарових плівок у вигляді

$$\gamma_l = \gamma_{l1} - \mu_{f1} + \gamma_{l2} - \mu_{f2} - \frac{d_1 \rho_2 (\gamma_{l2} - 2\mu_{f2} - 1) + d_2 \rho_1 (\gamma_{l1} - 2\mu_{f1} - 1)}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1} - \frac{d_1 \mu_{f1} + d_2 \mu_{f2}}{d_1 + d_2} - 2. \quad (4)$$

Співвідношення для багатошарової плівки є аналогічним.

Запропонована нами модель не оперує мікроскопічними параметрами у явному вигляді. Крім цього, не враховує розсіювання носіїв електричного струму на межі розділу шарів. Але основним недоліком даної моделі є те, що вона побудована для багатшарової плівки, виходячи з припущення, що остання є паралельним з'єднанням провідників.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вивчення тензочутливості металевих плівок проводилось двома

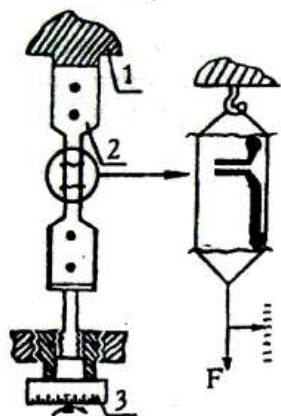


Рисунок 1 - Схема установки для дослідження тензочутливості на розтягання: 1 - нерухома пластинка; 2 - підкладка; 3 - мікрометричний гвинт

методами: методом деформації плівки на згинання (область малих деформацій - до (0,04-0,06) %) та методом деформації плівки на розтягання (область великих деформацій - до (2-4) %).

Методика дослідження тензочутливості методом згинання докладно описана в роботах [11, 12], де припускається, що деформація здійснюється по стороні циліндра і визначається згідно з співвідношенням $\varepsilon \cong Dh / l_{II}^2$, де D - товщина підкладки; l_{II} - початкова довжина деформованої ділянки; h - прогин підкладки.

Для дослідження тензоефекту методом деформації на розтягання був сконструйований пристрій, схема якого представлена на рис.1. У даному випадку величина деформації визначалась за співвідношенням $\varepsilon_l = \Delta l / l_{II}$, де Δl - видовження підкладки.

Величина коефіцієнтів тензочутливості розраховувалась по тангенсу кута нахилу залежності $\Delta R / R_{II}$ від ε_l .

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На основі експериментальних результатів були розраховані розмірні

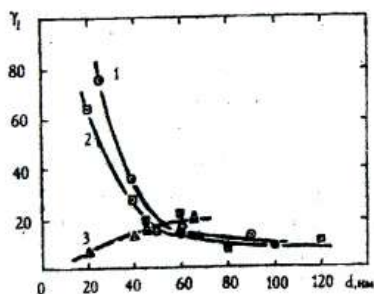


Рисунок 2 - Залежність η_l від d для плівок Cr(1), Ni(2), Co(3) [13]

залежності η_l від товщини плівки. Як видно з рис.2, у плівках Cr і Ni із збільшенням товщини величина η_l зменшується, прямуючи до асимптотичного значення $\eta_{\infty} = 1,5$ та 2 відповідно. У плівках Co спостерігається обернена тенденція в інтервалі товщин 20-70 нм. Далі при $d=70$ нм залежність проходить через максимум і виходить на насичення $\eta_{\infty} = 3$.

На основі лінеаризованого співвідношення (2), перебудувавши залежність η_l від d у координатах $\eta_l d$ від d , нами було розраховано значення η_l . У

результаті було одержано, що для плівок Cr в інтервалі товщин $d=25-100$ нм величини деформаційного коефіцієнта СДВП носіїв електричного струму приймає значення 2-4,3. У плівках Ni при товщинах $d=20-120$ нм величина η_l така: 0,6-1,3. І, нарешті, для одношарових плівок Co η_l приблизно дорівнює 19 при товщинах 20-65 нм та 4,3 в інтервалі товщин 70-110 нм. Наведені результати говорять про те, що η_l є розмірно залежною величиною.

Залежність коефіцієнтів γ_l і γ_t від товщини другого шару при фіксованій товщині базисного для двошарових плівок на основі Cr, Co та Ni, досліджених в області малих деформацій, наведена на рис.3. Рис.4 ілюструє аналогічну залежність, одержану в області великих деформацій.

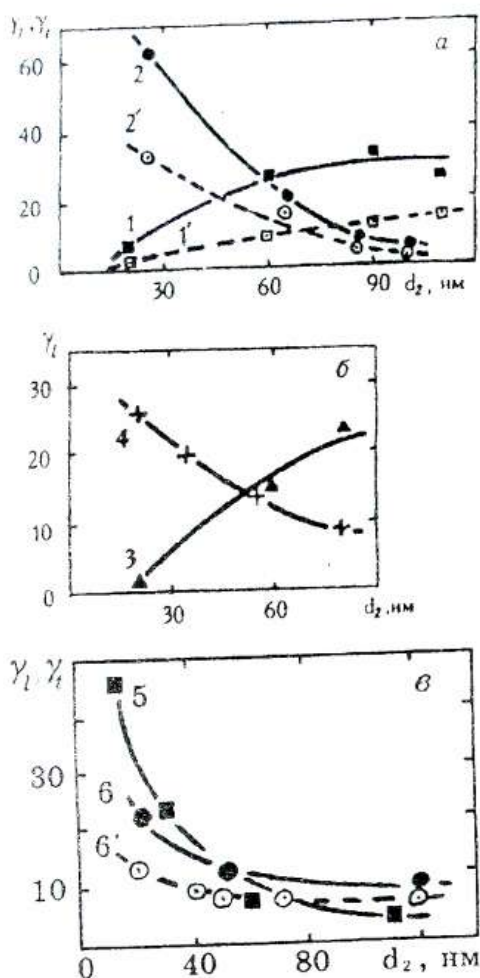


Рисунок 3 - Розмірна залежність γ_l (1-6) і γ_t (1', 2', 6') для плівок, досліджених методом деформації на згин: 1, 1' - Cr/Co ($d_1 = 90$ нм); 2, 2' - Co/Cr ($d_1 = 60$ нм); 3 - Ni/Co ($d_1 = 30$ нм); 4 - Co/Ni ($d_1 = 50$ нм); 5 - Cr/Ni ($d_1 = 30$ нм); 6, 6' - Ni/Cr ($d_1 = 70$ нм)[13,14]

тензочутливості від товщини у плівках Cr і Ni, з одного боку, і Co, з іншого. Не виключено, що на інверсію залежності $\gamma_l(d)$ в плівках Co впливає також і технологічний фактор, оскільки дослідження проводились у вакуумі $\sim 10^{-3}$ Па.

Що стосується інверсії розмірної залежності в двошарових плівках Cr/Co і Co/Ni, то основним фактором є взаємна дифузія атомів. Оскільки процеси взаємної дифузії істотно впливають на величину коефіцієнта розсіювання на межі зерен, а нами було показано раніше [5], що у досліджених системах активно ідуть дифузійні процеси, слід відзначити, що найбільш «чутливим» до атомів чужого сорту є плівки Co та Cr.

Із експериментальних результатів розмірної залежності коефіцієнтів тензочутливості одно- та двошарових плівок можна відзначити наступні закономірності: у одношарових плівках Cr, Ni із збільшенням товщини значення коефіцієнтів тензочутливості зменшується, в той час як у плівок Co спостерігається обернена тенденція в інтервалі товщин 20–65 нм; у плівках, досліджених методом деформації на згинання Co/Ni, Co/Cr, Ni/Cr, Cr/Ni із збільшенням товщини d_2 (при $d_1 = \text{const}$) величина коефіцієнтів γ_l і γ_t зменшується, а для Ni/Co та Cr/Co має місце інверсійна залежність; для всіх двошарових систем, крім Cr/Co, досліджених методом деформації на розтягання із збільшенням товщини верхнього шару значення γ_l зменшується; величина γ_l більше γ_t .

З наведених результатів тензочутливості одношарових плівок впливає, що потрібно звернути увагу на те, що у плівках Co розмірна залежність γ_l має нетиповий характер. Питання про вплив товщини плівки і розміру кристалів на величину коефіцієнтів тензочутливості аналізувалось у

роботі [5]. Якщо оцінити величини μ і ν [13], то можна зробити висновок:

у плівках Cr і Co розсіювання на межі зерен та поверхневе розсіювання проявляється більш ефективно порівняно з плівками Ni, у той час як у плівках Co відносно більшу роль відіграє розсіювання на межі зерен. Це, можливо, і обумовлює різний характер розмірної залежності коефіцієнтів

досліджених системах активно ідуть дифузійні процеси, слід відзначити, що найбільш «чутливим» до атомів чужого сорту є плівки Co та Cr.

Про більшу ефективність розсіювання на межі зерен у плівках Cr/Co порівняно з іншими двошаровими системами свідчать і розрахунки, зроблені на основі співвідношення для параметра v двошарової плівки, який ми визначаємо таким чином [14]:

$$v = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \frac{L_1}{\lambda_{01}} \left(\ln \frac{1}{r_1} \right)^{-1} + \frac{d_2}{d_1 + d_2} \frac{L_2}{\lambda_{02}} \left(\ln \frac{1}{r_2} \right)^{-1} \quad (5)$$

Якою мірою експериментальні дані для двошарових плівок збігаються з розрахунковими за співвідношенням (3) (для плівок з числом шарів

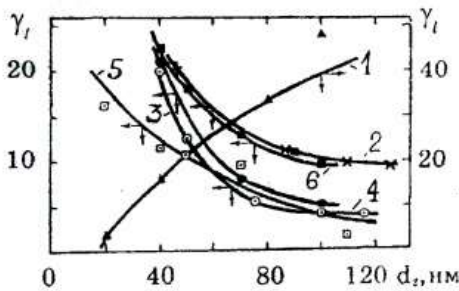


Рисунок 4 - Залежність γ_i від d для плівок, досліджених методом деформації на розтягання: 1 - Cr/Co ($d_1=95$ нм); 2 - Co/Cr ($d_1=120$ нм); 3 - Ni/Co ($d_1=90$ нм); 4 - Co/Ni ($d_1=70$ нм); 5 - Cr/Ni ($d_1=90$ нм); 6 - Ni/Cr ($d_1=80$ нм) [14]

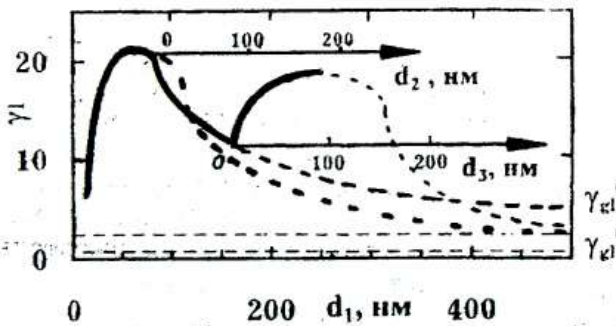


Рисунок 5 - Розрахункова розмірна залежність γ_i для багатошарової плівкової структури Cr/Co/Cr/Co [10]

більше двох дану модель застосувати неможливо), ілюструє таблиця 1. При розрахунках у виразі (3) замість β_{0i} було використано β_{gi} - ТКО плівки при $d \rightarrow \infty$. Результати, які наведені у таблиці 2, дозволяють судити про ступінь відповідності експериментальних та розрахункових величин коефіцієнтів тензочутливості на основі макроскопічної моделі, для дво- та багатошарових плівок.

Як показують наведені в таблицях дані, трохи краще узгодження теорії з експериментом спостерігається в рамках макроскопічної моделі. Незважаючи на недоліки, вона дозволяє побудувати узагальнені діаграми в координатах γ_i від d для будь-якої багатошарової структури.

Рисунок 5 ілюструє таку діаграму для багатошарової плівки Cr/Co/Cr/Co. Коротко зупинимось на діаграмі. Суцільними лініями показано хід розмірної залежності окремо взятого шару, нанесеного на попередній. Крива, зображена пунктирними лініями, ілюструє, як би

себе вела ця залежність далі, якщо ми не наносили наступний шар. Іншими словами, залежність γ_i кожного i -го шару від d аналогічна наведеним на рис. 2.

Таблиця 1 - Експериментальні та розрахункові на основі співвідношення (3) дані з тензочутливості двошарових плівок

Плівка (d, нм)	η		Метод деформації
	Експеримент	Розрахунок	
Cr(60)/Co(90)	26,7	16,1	згинання
Cr(40)/Co(95)	16,0	2,6	розтягання
Co(65)/Cr(60)	21,0	13,2	згинання
Co(90)/Cr(120)	11,8	4,6	розтягання
Ni(60)/Co(30)	14,4	3,6	згинання
Ni(75)/Co(90)	5,4	3,3	розтягання
Co(55)/Ni(50)	13,5	10,5	згинання
Co(70)/Ni(70)	7,9	1,7	розтягання
Ni(50)/Cr(70)	7,7	4,7	згинання
Ni(70)/Cr(80)	12,9	3,2	розтягання
Cr(60)/Ni(30)	8,7	4,9	згинання
Cr(100)/Ni(90)	1,5	1,0	розтягання

Таблиця 2 - Експериментальні та розрахункові на основі макроскопічних співвідношень дані з тензочутливості багатошарових плівок

Плівка (d, нм)	η	
	Експеримент	Розрахунок
Cr(30)/Co(90)	13,0	18,3
Co(60)/Cr(60)	22,0	18,6
Co(20)/Ni(50)	25,8	20,3
Ni(60)/Co(30)	14,4	15,6
Ni(90)/Co(70)	9,0	11,6
Cr(20)/Co(20)/Ni(20)	22,7	24,3
Co(20)/Cr(50)/Co(55)	19,8	21,2
Cr(40)/Co(30)/Cr(40)	22,3	28,3
Ni(50)/Cr(10)/Ni(50)/Cr(10)	20,1	22,2

Завершаючи обговорення розмірних ефектів у тензочутливості багатошарових плівок, потрібно з'ясувати, як співвідносяться між собою величина η багатошарової плівки і окремо взятого шару. Щоб дати конкретну відповідь на поставлене запитання, потрібно розглянути багатошарові плівки такої ж товщини, як і одношарові. Іншими словами, потрібно, щоб виконувалась умова $d=d_1=d_2=\dots=d_n$. Експериментальні результати показують (таблиця 3), що величина η багатошарової плівки є більшою порівняно з η одношаровою. Серед причин, які приводять до збільшення коефіцієнтів тензочутливості багатошарової плівки порівняно з одношаровою такої ж товщини, можна вказати появу нового механізму розсіювання – межі розділу шарів.

Поряд з розмірними ефектами в тензочутливості двошарових плівок нами були досліджені і температурні в інтервалі 200–400 К. На основі залежності коефіцієнтів η і η_t від температури (T) було проведено розрахунок температурних коефіцієнтів тензочутливості ($\beta_{\eta}, \beta_{\eta_t}$) і похідної $\partial^2 R / \partial \varepsilon \partial T$ (таблиця 4).

Таблиця 3 - Порівняння величини коефіцієнтів тензочутливості в одношарових та багатшарових плівках

Система	$d=d_1=d_2=\dots=d_n$, нм	η/η_1	η/η_2	η/η_3
Cr/Ni	60	1,4	1,4	-
Ni/Cr	90	2,2	2,4	-
Cr/Co	120	1,3	1,7	-
Co/Cr	120	3,1	2,3	-
Ni/Co	100	1,3	2,0	-
Co/Ni	100	1,0	1,0	-
Cr/Co/Ni	60	1,5	1,5	1,3
Ni/Co/Cr	215	4,1	4,1	4,1
Ni/Cr/Ni/Cr	120	2,6	2,6	2,6
Ni/Co/Cr/Ni/Co/Cr	180	6,6	6,6	6,6

Таблиця 4 - Температурна залежність коефіцієнтів тензочутливості

Плівка (d , нм)	T , К	$\frac{\partial^2 R}{\partial \varepsilon_1 \partial T}$	$\beta_{\gamma_t} \cdot 10^2$, К ⁻¹	$\frac{\partial^2 R}{\partial \varepsilon_t \partial T}$	$\beta_{\gamma_t} \cdot 10^2$, К ⁻¹	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹
Cr(20)/Co(90)	300	0,375	3,76	0,150	3,75	2,78
Cr(60)/Co(90)	300	0,750	5,00	0,625	1,00	2,70
Cr(90)/Co(90)	300	0,750	2,50	0,150	1,25	2,60
Co(25)/Ni(50)	300	0,125	0,60	0,250	0,18	3,60
Co(30)/Ni(50)	300	0,500	1,30	0,750	1,07	3,58
Co(50)/Ni(50)	300	0,600	3,30	2,500	0,10	3,52

Як показують результати експериментальних досліджень, величина β менша порівняно з β_{γ_t} і β_{γ_l} приблизно на порядок. Наші дані не відповідають висновку Катара і Ель-Хіті [16], згідно з яким $\beta_{\gamma_l} = \beta_{\gamma_t} = -\beta$, а також підтверджуються експериментальними результатами [11].

ВИСНОВКИ

Більш вагомий внесок поверхневого (плівки Cr та Ni) або розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен (плівка Co) та частково взаємна дифузія атомів і технологічний фактор обумовлюють інверсію розмірної залежності (збільшення коефіцієнтів η і γ_t при збільшенні товщини верхнього шару) у плівках Co, Ni/Co та Cr/Co порівняно з плівками Cr, Ni, Co/Cr, Co/Ni, Ni/Cr та Cr/Ni.

Експериментальні та розрахункові результати по розмірній залежності коефіцієнтів тензочутливості дво- та багатшарових плівок мають кращу відповідність у випадку макроскопічної моделі порівняно з мікроскопічною. На основі одержаного співвідношення для η в рамках макроскопічного наближення можна отримати узагальнені діаграми розмірної залежності.

Експериментально встановлено, що розсіювання носіїв електричного струму на межі розподілу шарів обумовлює збільшення

Дослідження температурної залежності коефіцієнтів тензочутливості на прикладі двошарових плівок дозволили зробити висновки, відомий для одношарових плівок, що емпіричне правило $\beta = -\beta$ не виконується.

SUMMARY

The strain sensitivity effect in single- and multi-layer films based on Cr, Co and Ni has been studied. The aprobation of strain sensitivity models for double- and multi-layer films has been carried out. The increase of multi-layer films strain sensitivity coefficients in comparison with single-layer films with same thickness is caused by dispersion of electric current carriers on inter-layer boundaries.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мейкени З.Р. Несплошные керметные пленки/ Физика тонких пленок, т. VII.- Москва: Мир, 1978.- С. 106 - 179.
2. Tellier C.R., Tosser A.J. Approximate Strain Coefficient of Metallic Films Deduced from an Effective Fuchs-Sondheimer Conduction Model from an Effective Relaxation Time Method// Thin Solid Films.- 1979.- V.57, №1.- P. 163 - 168.
3. Pichard C.R., Tellier C.R. Linearization of Polycrystalline Films Gauge Factor// Rev. Phys. Appl.- 1979.- V. 14, №8.- P. 743 - 750.
4. Tosser A.J., Tellier C.R., Pichard C.R. Thin Polycrystalline Metallic - Films Conductivity Under the Assumption of Isotropic Grain - Boundary Scattering// J.Mater. Sci.- 1981.- V. 16, №3.- P. 944 - 948.
5. Tellier C.R., Pichard C.R., Tosser A.J. Threedimensional Strain Coefficients of Resistivity of Thin Polycrystalline Metals Films// J.Mater. Sci.- 1981.- V. 16, №8.- P. 2281 - 2286.
6. Петренко С.В., Проценко І.Е., Смолин М.Д. Исследование тензочувствительности тонких пленок хрома и молибдена// Изв. вузов. Физика.- Томск.- 1987.- 12с.- Деп. в ВИНТИ 16.11.1987.- №9128.- P87.
7. Петренко С.В., Проценко І.Ю., Смолин М.Д. Дослідження тензочутливості тонких плівок тугоплавких металів/ Наукові праці. Серія: Фізика твердого тіла.- Суми: СДП, 1993.- С. 4 - 12.
8. Khater F., El-Niti M. Strain Coefficient of Electrical Resistance of Double - Layer Thin Metallic Films// Phys. stat. sol.(a).- 1988.- V. 108, №1.- P. 241 - 249.
9. Кузьменко А.И., Петренко С.В., Проценко І.Е. Эффект тензочувствительности в двухслойных пленках переходных металлов// ВАНТ.- 1990.- №2(10).- С. 87 - 89.
10. Однорець Л.В., Проценко І.Е., Черноус А.Н. Тензочувствительность многослойных металлических пленок//Труды Укр. Вак. Общ.- Харьков: Укр. Вак. общ., 1996.- Т.2.-С. 225-229.
11. Петренко С.В., Проценко І.Е., Смолин М.Д. Электрофизические свойства аморфных и металлических пленок вольфрама// Металлофизика.- 1986.- Т.8, №6.- С. 22 - 24.
12. Петренко С.В., Проценко І.Е., Шамоля В.Г. Эффект тензочувствительности в дисперсных металлических пленках// Металлофизика.- 1989.- №1.- С. 180 - 186.
13. Проценко І.Е., Черноус А.Н. Тензочувствительность одно- и двухслойных пленок на основе хрома, никеля и кобальта// Металлофизика и новейшие технологии.- 1994.- Т.16, №12.- С. 18-23.
14. Однорець Л.В., Проценко І.Е., Черноус А.И. Электрофизические свойства одно- и многослойных плёнок металлов. II. Кинетические явления в многослойных плёнках //Вісник Сумського університету.- 1996.- №2(6).- С. 20-28.
15. Проценко І.Ю., Черноус А.М. Розмірний ефект електропровідності двошарових полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії металів// Вісник Сумського університету.- 1994.- №1.- С. 19 - 25.
16. Khater F., El-Niti M. Temperature Coefficient of the Strain Coefficient of Electrical Resistivity of Double - Layer Thin Metallic Films// Phys. Stat. Sol.(a).- 1988.- V. 109, №2.- P. 517-523.

Надійшла до редколегії 21 березня 1997 р.