

ОСОБЛИВОСТІ РОЗМІРНОГО ЕФЕКТУ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ДВОШАРОВИХ ПЛІВОК З ВІДМІННИМИ ТЕМПЕРАТУРНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ ОПОРУ

*А.М.Чорноус, ст.викл.; Ю.М.Овчаренко, асп.; О.В.Шовкопляс, асп.;
С.І.Проценко, студ.*

ВСТУП

Апробація теоретичних моделей розмірної залежності температурного коефіцієнта опору (ТКО) для двошарових плівок [1,2] є складним завданням. В експериментальному плані виникають труднощі із з'ясуванням причин незбігання експериментальних результатів з розрахунковими. Серед факторів, які призводять до невідповідності даних експерименту та розрахунку, можна виділити три основні: технологічний, процеси взаємної дифузії, макронапруження термічного походження. Роль технологічного фактору можна звести до мінімуму, поставивши експеримент в чистих вакуумних умовах або технологічних, але провести розрахунки з використанням розмірних залежностей питомого опору та ТКО для одношарових плівок, одержаних в однакових умовах із двошаровими, що і було зроблено в даній роботі.

Процеси взаємної дифузії призводять до зміни коефіцієнтів проходження та розсіювання на межі розділу між шарами та кристалітів, а також, в окремих випадках, до виникнення перехідного шару. Завдяки дії макронапружень термічного походження внаслідок деформації плівки можливо як збільшення, так і зменшення опору, відповідно зменшення та збільшення ТКО.

Метою роботи є дослідження розмірної залежності ТКО двошарових плівок Ti/Ni/П, Ni/Ti/П, Cu/Cr/П та a-Ge/Cr/П (a - аморфний, П - підкладка) та апробація теоретичних моделей [1, 2]. При цьому необхідно було розв'язати такі завдання. По-перше, експериментально дослідити кристалічну структуру та розмірну залежність опору та ТКО для одношарових (Ni, Ti, Cr, Cu, a-Ge) та двошарових на основі вказаних плівок металів. По-друге, провести розрахунок параметрів електропереносу одношарових та розмірної залежності ТКО двошарових плівок. По-третє, провести порівняння розрахункових та експериментальних результатів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗМІРНОГО ЕФЕКТУ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

У роботі [1] Р. Дімміхом було одержано співвідношення для розмірної залежності ТКО двошарової полікристалічної плівки, яке було спрощено нами раніше [3] до вигляду, придатного для порівняння з експериментом:

$$\beta = A\beta_{g1} \left[1 - \frac{d \ln F_1}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln l_1} \right] + B\beta_{g2} \left[1 - \frac{d \ln F_2}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln l_2} \right], \quad (1)$$

де $A = \frac{d_1 \sigma_{01} F_1}{d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2}$, $B = 1 - A$, $F_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}}$ - функція Фукса (σ_i , σ_{0i} - питома провідність плівки та масивного зразка відповідно);

$k_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}}$, $l_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$ (d_i - товщина плівки, L_i - середній розмір

кристалітів, l_{0i} - середня довжина вільного пробігу носіїв електричного струму); β_{gi} - асимптотичне значення ТКО при $d_i \rightarrow \infty$.

Апробацію даного співвідношення для двошарових плівок на основі Cr, Ni та Co було проведено в цій же роботі [3]. Розрахунки на основі (1) дали можливість встановити загальні закономірності розмірного ефекту в ТКО двошарових плівок. Залежність $\beta(d_2)$ при $d_1 = \text{const}$ відрізняється від аналогічної для одношарових, в яких ТКО з ростом товщини монотонно збільшується, виходячи на асимптотичне значення β_g . У двошарових плівках можлива протилежна тенденція. Всі залежності $\beta(d_2)$ починаються в точках, які належать залежності $\beta(d_1)$ для базисного шару, і асимптотично наближаються знизу чи зверху (в залежності від співвідношень β_{g1} і β_{g2}) до величини β_{g2} .

Якщо перейти до граничного випадку двошарової плівки, де нижнім шаром є полікристалічний метал з питомим опором ρ_1 , а верхнім - аморфний напівпровідник, вираз (1) можна привести до вигляду

$$\beta \approx A\beta_{g1} \left(1 - \rho_1 d_1 \frac{\partial \rho_1^{-1}}{\partial d_1} - \rho_1 L_1 \frac{\partial \rho_1^{-1}}{\partial L_1} \right) + B\beta_{g2}. \quad (2)$$

Тут враховано, що $L_2 \rightarrow 0$, а $\rho_2 \cong \text{const}$, починаючи з $d_2 \cong 15$ нм. Очевидно, що дане співвідношення має дуже наближений характер, оскільки воно одержано із (1), яке має місце лише для полікристалічних зразків.

В рамках макроскопічної моделі [2] вираз для ТКО двошарової плівки має вигляд

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 - \frac{d_1 \beta_2 \rho_2 + d_2 \beta_1 \rho_1}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1}. \quad (3)$$

Слід відзначити, що розрахункові залежності $\beta(d_1)$, зроблені на основі співвідношення (3), мають аналогічний характер тому, що одержані на основі (1) (це буде показано нижче на прикладі двошарових плівок Ti/Ni/P та Ni/Ti/P).

У двох граничних випадках $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$ та $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ при $\frac{d_2}{d_1} \sim 1$ співвідношення (3) спрощується до вигляду

$$\beta \cong \beta_2 - \frac{d_1}{d_2} \frac{\rho_2}{\rho_1} \beta_2 \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1 \right), \quad \beta \cong \beta_1 - \frac{d_2}{d_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \beta_1 \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1 \right). \quad (4)$$

І, нарешті, коли $\frac{\rho_2}{\rho_1} \ll 1$ та $\frac{\rho_2}{\rho_1} \gg 1$, що має місце для плівкових структур на основі Cu і Cr та Ge і Cr, останній вираз можна записати таким чином:

$$\beta \cong \beta_2 \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \ll 1 \right) \quad \text{та} \quad \beta \cong \beta_1 \quad \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \gg 1 \right). \quad (4')$$

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Одно- та двошарові плівки на основі Cu, Ni, Ti, Cr та a-Ge були одержані шляхом термічного та електронно-променевого випаровування у вакуумі $\sim 10^{-3}$ Па на скляній підкладці при температурі 300К. Методика вимірювання електрофізичних властивостей плівок описана нами раніше [1]. У процесі виготовлення тонкоплівкових зразків проводився контроль складу залишкової атмосфери за допомогою мас-спектрометра МХ-7304А. Як ілюстрація на рис.1 показано, як змінюється на мас-спектрах

інтенсивність ліній O_2^+ та $N_2^+ + CO^+$ на різних стадіях одержання плівок Cr, Cu, та Ge. Загальною особливістю досліджуваних плівок є поглинання кисню.

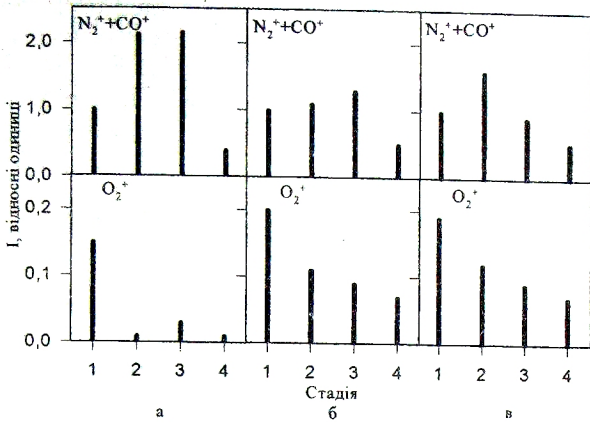


Рисунок 1 - Зміна інтенсивності ліній $N_2^+ + CO^+$ та O_2^+ на мас-спектрах залишкових газів при конденсації плівок Cr (а), Cu (б), Ge (в) у вакуумі $\sim 10^{-3}$ Па: 1 - до конденсації; 2,3 - у процесі конденсації на екран та підкладку відповідно; 4 - після конденсації

3 РЕЗУЛЬТАТИ, ЇХ ОБРОБКА ТА ОБГОВОРЕННЯ

Двошарові металеві плівки. Розрахункові розмірні залежності для двошарових плівок Ni/Ti/П, Ti/Ni/П та Cu/Cr/П, проведені на основі (3), мають аналогічний вигляд, як і наведені у [4]. Рис.2 ілюструє залежність $\beta(d_2)$ при $d_1 = \text{const}$ для плівок Ni/Ti/П (криві 3-5) та Ti/Ni/П (криві 6-8). На цьому ж рисунку лініями з точками нанесено експериментальну розмірну залежність для плівок Ni (1) та Ti (2).

Наведені (рис.2) розрахункові залежності $\beta(d_2)$ ($d_1 = \text{const}$)

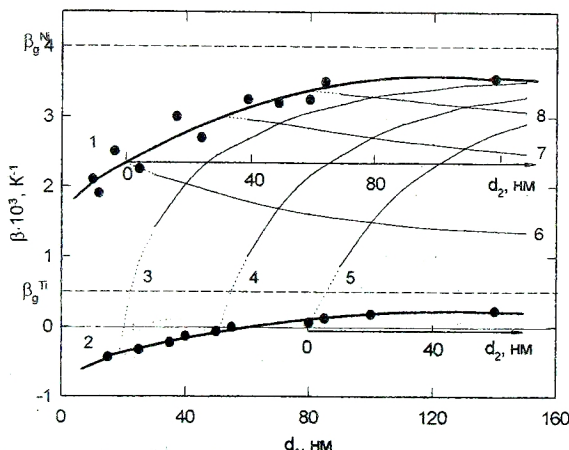


Рисунок 2 - Залежність ТКО від товщини для двошарових плівок Ni/Ti/П і Ti/Ni/П: 1, 2 - експериментальна залежність $\beta(d_1)$ для плівок Ni та Ti; 3 - 5, 6 - 8 - розрахункові залежності $\beta(d_2)$ для плівок Ni/Ti/П, Ti/Ni/П

підтверджуються експериментально, про що свідчать дані для плівок Ti/Ni/П ($d_1 = 75$ нм), які подані в таблиці 1 (ці ж дані дозволяють також судити про ступінь відповідності розрахункових та експериментальних результатів). Розрахункові значення ТКО на основі співвідношення (1) не зовсім відповідають експерименту порівняно з проведеними на основі (3). Аналіз показує, що розглянуті моделі однаковою мірою не враховують розсіювання носіїв на межі розділу шарів, термічні макронапруження

та взаємну дифузію атомів. Але на відміну від макроскопічної моделі для розрахунків на основі теорії Дімміха потрібно використовувати мікроскопічні параметри, які входять у логарифмічні похідні. Визначення цих похідних, на нашу думку, вносить похибку в розрахункове значення β згідно із співвідношенням (1).

Що стосується різної відмінності експериментальних та розрахункових даних ТКО, наведених в таблиці, то, на нашу думку, тут діє декілька механізмів, які проявляються різною мірою, пов'язаних із зміною (як збільшення, так і зменшення) коефіцієнтів проходження та розсіювання

носіїв електричного струму на межах зерен. Вони, як вже відмічалось, пов'язані, перш за все, з дифузійними процесами в двошарових системах. Про взаємну дифузію у двошарових плівках на основі Ni і Ti говорять дані, наведені в [4], а на основі Cu та Cr - в [5]. В свою чергу, дифузійні процеси можуть або послаблюватись, або підсилюватись дією макронапружень в залежності від товщини плівки. Як показує таблиця 1, краще узгодження теорії та експерименту ми маємо у випадку відносно товстих зразків.

Таблиця 1 - Експериментальні та розрахункові значення ТКО для двошарових металевих плівок

Зразок (d, нм)	$\beta \cdot 10^3, K^{-1}$			$(\beta_{розр} - \beta_{експ}) / \beta_{розр}$		$\Delta S^*)_{рез} \cdot 10^{-8},$ Па
	Експери мент	Розрахункові дані		Співв.(1)	Співв.(3)	
		Співв.(1)	Співв.(3)			
Ti(20)/Ni(75)/П	2,98	3,89	3,17	0,25	0,06	4,14÷5,80
Ti(50)/Ni(175)/П	2,96	3,74	3,05	0,21	0,03	
Ti(115)/Ni(75)/П	2,78	3,45	2,83	0,20	0,02	
Ni(30)/Ti(15)/П	2,22	3,69	2,49	0,40	0,11	2,98÷3,89
Ni(30)/Ti(25)/П	2,15	3,48	2,40	0,38	0,10	
Cu(48)/Cr(15)/П	2,22	-	3,43	-	0,35	9,60
Cu(48)/Cr(55)/П	2,58	-	3,43	-	0,25	

*) $\Delta S_{рез}$ - результуюче значення макронапружень термічного походження при $\Delta T = 100K$

Закінчуючи обговорення даного питання, необхідно звернути увагу ще на один аспект. Він пов'язаний з утворенням проміжного шару в двошарових плівках (внаслідок слабкої розчинності їх складових або через утворення бар'єрів (стопорів). Дане питання аналізувалось нами в роботі [6] на прикладі двошарових плівок Co/Cr/П та в [5]. Автори [5] якраз і пояснюють появу проміжного шару в плівковій системі Cu/Cr/П утворенням стопорів.

Не виключено, що у випадку Cu/Cr/П та Ni/Ti/П ми маємо справу з тришаровою плівкою, що деякою мірою може пояснити відмінність теоретичних та експериментальних результатів у даних системах.

Двошарові плівки a-Ge/Cr/П. Таблиця 2 дає уявлення про характер розмірної залежності ТКО двошарової плівки a-Ge/Cr/П

Таблиця 2 - Експериментальні та розрахункові значення ТКО для плівок a-Ge/Cr/П та Cr

Зразок (d, нм)	$\beta_{експ} \cdot 10^4, K^{-1}$		$\beta_{теор} \cdot 10^4, K^{-1}$		$(\beta_{експ} - \beta_{розр}^*) / \beta_{розр}$
	Cr	a-Ge/Cr/П	Співв.(2)	Співв.(3)	
			a-Ge/Cr/П	a-Ge/Cr/П	
a-Ge(50)/Cr(55)/П	0,30	0,33	0,38	0,30	0,10
a-Ge(50)/Cr(85)/П	0,41	0,44	0,36	0,41	0,07
a-Ge(50)/Cr(95)/П	0,46	0,50	0,34	0,46	0,09

*) На основі співвідношення (3)

Як і у випадку розглянутих вище двошарових структур, гірша відповідність розрахункових та експериментальних значень ТКО ся стерігається в рамках моделі Дімміха. Таку розбіжність можна пояснити виключно тим, що граничне співвідношення (2) одержано з (1),

яке описує розмірну залежність ТКО двошарових металевих полікристалічних плівок.

Одержані результати дають підставу говорити про те, що плівку a-Ge/Cr/П можна розглядати (у відношенні електричних властивостей) не як двошарову, а як плівку з покриттям. Відмінність величин ТКО Cr та a-Ge/Cr/П (як і у випадку плівок Ni з покриттям [7]) пояснюється зміною коефіцієнта проходження межі зерен (r) внаслідок дифузії атомів Ge по межах зерен у Cr. Атоми Ge, які локалізуються на межі зерен, частково заліковують дефекти структури, що обумовлює збільшення параметра r та відповідне збільшення ТКО. Розрахунки, проведені в рамках ізотропної моделі ТТП розмірного ефекту ТКО одношарових плівок [8], показують, що r збільшується приблизно на 5-6%.

ВИСНОВКИ

Висновки до даної роботи можна сформулювати таким чином. Незбігання розрахункових та експериментальних значень ТКО для двошарових плівок на основі Ti і Ni та Cr і Cu можна пов'язати з дифузійними процесами, які обумовлюють зміну коефіцієнтів проходження та розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен, а в окремих випадках - утворення проміжного шару.

Систему a-Ge/Cr/П стосовно електричних властивостей можна розглядати не як двошарову, а як плівку Cr з покриттям. Збільшення ТКО такої плівки порівняно з конденсатами Cr пояснюється збільшенням коефіцієнта проходження межі зерен внаслідок дифузії атомів Ge.

SUMMARY

The size dependence of temperature coefficient of resistance (TCR) in double-layer Ti/Ni/S, Ni/Ti/S, Cu/Cr/S and a-Ge/Cr/S films (a - amorphous, S - substrate) has been researched. The difference between calculated and experimental values of TCR can be explained by interdiffusion processes and, in some cases, by formation of intermediate layer. The system a-Ge/Cr/S (electrical properties) can be considered as Cr film with overlayer.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dimmich R. Electrical Conductance and Temperature Coefficient of Double-Layer Films// Thin Solid Films.- 1988.- V.158, №1.- P.13-24.
2. Chornous A., Odnodvoretz L., Protsenko I. Size Effect in Temperature coefficient of Resistance in Multilayer Films Structure of General Type/ Book of Abstracts II International Conference MPSL'96.- Sumy: SSU, 1996.- P.74-75.
3. Кузьменко А.І., Проценко І.Ю., Черноус А.М. Апробація теоретичної моделі Дімміха для електропровідності двошарових металевих плівок// Наукові праці Сумського педагогічного інституту. Серія: Фізика твердого тіла.- Суми: СДПІ.- 1993.- С.29-34.
4. Проценко І.Ю., Черноус А.М. Розмірний ефект в електропровідності двошарових полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії металів// Вісник Сумського університету.- 1994.- №1.- С.19-25.
5. Волошко С.М., Сидоренко С.И., Макеева И.Н. Исследование взаимной диффузии в тонкопленочной системе Cr-Cu-Ni-Au методом электронной оже-спектроскопии // Металлофизика и новейшие технологии.- 1994.- №10(16) - С.61-68.
6. Проценко И.Е., Петренко С.В., Черноус А.Н., Оdnодворец Л.В. Элементный состав и диффузионные процессы в многослойных пленочных системах// ВАНТ.- 1994.- №1(27).- С.88-89.
7. Овчаренко Ю.М., Опанасюк Н.М., Проценко І.Ю., Шовкопляс О.В. Розрахунок параметрів електропереносу тонких металевих плівок в умовах зовнішнього та внутрішнього розмірних ефектів// УФЖ (прийнято до друку).
8. Tellier C.R., Boufrit C.A. Comparison Between Linearized Expression of the Polycrystalline Metallic Film Conductivity Under the Assumption of Isotropic Grain-boundary scattering // J.Mater.Sci.- 1981.- №7.- P.944-948.

Надійшла до редколегії 25 березня 1997 р.