

PACS numbers: 68.55.Ln, 68.55.Nq, 73.50.Lw, 73.61.At, 73.90.+f, 81.40.Rs, 81.70.Jb

Температурні та розмірні ефекти в електрофізичних властивостях двошарових плівок на основі Ni і V

Т. М. Гричановська, І. Ю. Проценко, А. М. Черноус,
І. О. Шпетний

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми-7, Україна*

Комплексне дослідження фазового складу, кристалічної структури і дифузійних процесів показало, що, змінюючи співвідношення товщин окремих шарів і підбираючи режими термообробки, можна сформувати заданий структурно-фазовий стан зразків — від двошарової плівки до твердого розчину по всьому об'єму зразка. Порівняння експериментальних значень з розрахованими в рамках теоретичних моделей для термічного коефіцієнта опору (ТКО) двошарових плівок або співвідношення для плівкових стопів вказує на кореляцію величини ТКО і структурно-фазового стану плівкових систем.

Комплексное исследование фазового состава, кристаллической структуры и диффузионных процессов показало, что, изменяя соотношение толщин отдельных слоев и подбирая режимы термообработки, можно сформировать определенное структурно-фазовое состояние образцов — от двухслойной пленки до твердого раствора по всему объему образца. Сравнение экспериментальных значений с рассчитанными в рамках теоретических моделей для термического коэффициента сопротивления (ТКС) двухслойных пленок или формулы для пленочных сплавов указывает на существование корреляции величины ТКС и фазово-структурного состояния пленочных систем.

A complex study of the phase composition, crystal structure, and diffusion processes shows that it is possible to form a certain structural-phase state of the specimens by changing a ratio of thicknesses of separate layers and by selecting the modes of heat treatment from a two-layer film up to a solid solution throughout the bulk of a specimen. The comparison of experimental data with calculated according to the theoretical models for TCR of the two-layer films and for homogeneous-alloy films is shown that there is a correlation between the TCR and a structural-phase state of film systems.

Ключові слова: структурно-фазовий стан, твердий розчин, дифузійні

процеси, температурний коефіцієнт опору, розмірний ефект.

(Отримано 24 листопада 2005 р.)

1. ВСТУП

Розвиток мікро- та оптоелектроніки потребує широкого впровадження нових багатошарових плівкових систем на основі металів. Але їх практичне застосування ускладнюється досить відчутною неврівноваженістю таких структур та малими товщинами шарів компонентів плівкової системи. Це стимулює дифузійні процеси [1], які супроводжуються фазоутворенням і суттєво впливають на електрофізичні властивості багатошарових плівкових систем, такі, як електропровідність, термічний коефіцієнт опору та ін.

У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні експериментальних і теоретичних досліджень з вивчення електрофізичних властивостей плівкових систем у взаємному зв'язку з фазовим та елементним складом при різних температурах, оскільки їх знання дасть змогу контролювати і прогнозувати експлуатаційні характеристики тонкоплівкових елементів приладів, а визначення закономірностей дає можливість сформувати задану структуру з необхідними електрофізичними властивостями.

Вибір як об'єкту дослідження двошарових плівок на основі Ni і V обумовлений тим, що, згідно з діаграмою станів [2], у плівкових зразках слід очікувати утворення евтектик, твердих розчинів або проміжних фаз, що може впливати на електрофізичні властивості.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для отримання плівкових зразків і дослідження їх електрофізичних властивостей використовувалися вакуумна установка ВУП-5М (тиск газів залишкової атмосфери у робочому об'ємі $\sim 10^{-4}$ Па) та високовакуумна установка [3] на основі магніторозрядного насоса НМДО-160 ($\sim 10^{-5}$ Па). Зразки отримували методом електронно-променевого випаровування у вакуумі при температурі підкладки $T \approx 300$ К. Щойносконденсовані плівки витримували у вакуумі протягом години при температурі підкладки для стабілізації їх властивостей. Кінцеву товщину плівок вимірювали методом кварцового резонатора. При вивченні електрофізичних властивостей як підкладки використовували скляні пластини з вплавленими молібденовими електродами (термообробка до 700 К) або пластини ситалу з попередньо нанесеними мідними контактами з підшаром хрому (термообробка до 900 К). Відпалювання зразків з метою рекристалізації та термостабілізації електрофізичних властивостей

здійснювалося за схемою «нагрівання–охолодження» з постійною швидкістю (2–3) К/хв протягом двох-трьох циклів в інтервалах температур 300–(650–700) К та 300–900 К. Дослідження фазового складу та кристалічної структури здійснювали на вільних плівках після охолодження їх до кімнатної температури з використанням електронного мікроскопа ЕММА-4. При дослідженні дифузійних процесів використовувалася метода ВІМС (прилад МС-7201М). Для рекристалізації та активації процесів фазоутворення і дифузії плівки відпалювали у вакуумі при фіксованих значеннях температури в інтервалі 500–900 К впродовж 10–15 хв.

3. СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН ТА ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ

Згідно з даними електронно-мікроскопічних досліджень, у двошарових плівках на основі Ni і V з товщиною окремих шарів 20–50 нм у невідпаленому стані фазовий склад відповідає ОЦК-V + ГЦК-Ni (табл. 1). Параметри ґратниці ОЦК-V і ГЦК-Ni мають величину $a = 0,303\text{--}0,304$ нм і $a = 0,351\text{--}0,353$ нм відповідно, що близько до параметрів ґратниці одношарових плівок та масивних зразків V та Ni ($a_0 = 0,3028$ нм (V), $a_0 = 0,3524$ нм (Ni) [4]). Відмітимо, що плівки у невідпаленому стані є високодисперсними з розміром зерен $L = 15\text{--}25$ нм. Відпалювання при температурі $T_v < 700$ К не призводить до зміни фазового складу зразків та помітних процесів рекристалізації.

Результати дослідження дифузійних процесів якісно узгоджуються з даними вивчення фазового складу (рис. 1). При відпалюванні до $T_v < 700$ К плівка зберігає свою двошарову структуру, хоча має місце досить значне взаємне проникнення атомів (рис. 1). Серед причин, що призводять до такого результату, можна вказати конденсаційно-стимульовану дифузію і вплив градієнта концентрацій біля межі поділу шарів [6]. Звертає на себе увагу той факт, що у невідпалених зразках атоми ванадію не досягають поверхні другого шару (Ni). Відпалювання плівкових зразків при $T_v = 500$ К призводить до виходу атомів V на поверхню плівки Ni (рис. 1, б) та накопичення атомів Ni біля підкладки.

У плівках, відпалених при температурах $700 \leq T_v < 800$ К, спостерігається збільшення параметра ґратниці Ni до значення $a = 0,353\text{--}0,354$ нм і зменшення параметра ґратниці V до значення $a = 0,301$ нм. Відмітимо, що в одношарових плівках Ni, які пройшли таку термообробку, величина параметра ґратниці складає $a = 0,351\text{--}0,352$ нм. Збільшення параметра ґратниці Ni у двошаровій плівковій системі пов'язано з утворенням ГЦК твердого розчину TP (Ni–V) з середнім розміром зерна $L = 30\text{--}40$ нм на основі кристалічної ґратниці Ni. Виходячи із залежності параметра TP (Ni–V) від концентрації ванадію [7], можна оцінити вміст атомів V (5–9% ат.). Лінії на дифракційних картинах від ОЦК-V

у більшості випадків не фіксуються.

Винятком є зразки, для яких товщина шару V становить вели-

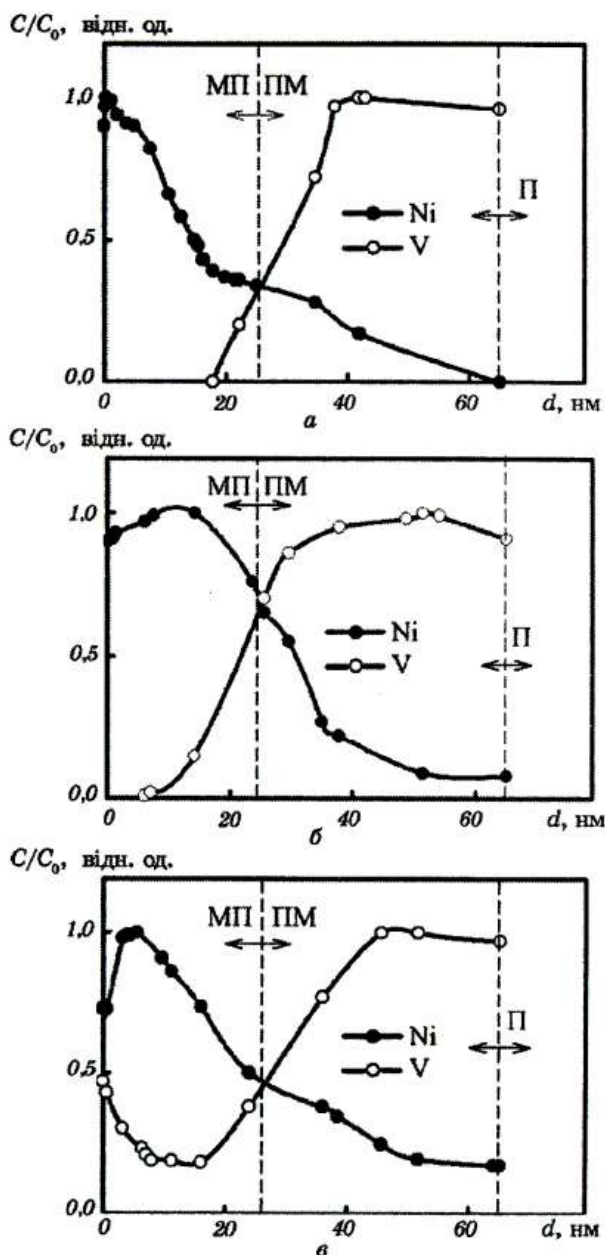


Рис. 1. Дифузійні профілі для плівкової системи Ni(25)/V(40)/Pi у невідпаленому (а) та відпаленому при $T_a = 500$ (б) і 700 К (в) станах. МП — межа поділу, ПМ — площина Матано, Pi — підкладка. У дужках вказано товщину плівки в нм.

чину, більшу за 45 нм. Враховуючи те, що одношарові плівки V товщиною $d > 35$ нм в даному температурному інтервалі мають ОЦК-ґратницю, а для двошарових зразків при такій товщині шару V лінії від ОЦК-фази не спостерігаються, можна зробити висновок про локалізацію атомів V на межах зерен та зовнішній поверхні TP (Ni-V). Цей висновок підтверджується також і результатами дослідження дифузійних процесів методом ВІМС (рис. 1, *е*).

Подальше відпалювання у температурному інтервалі 800–900 К стимулює підвищення термодифузії атомів V по межах зерен з накопиченням їх на зовнішній поверхні Ni та в об'ємі зерен. Параметр ґратниці (TP) (Ni-V) збільшується до $a = 0,356$ нм. Потрібно відмітити, що з насиченням меж зерен процеси взаємної дифузії уповільнюються. Фазовий склад плівок після відпалювання при $T_b = 800\text{--}900$ К відповідає TP (Ni-V) + VO_x + V_2O_3 (середній розмір зерна (TP) (Ni-V) складає 40–50 нм). В окремих випадках поряд з дифракційними лініями від Ni на місці ліній від V з'являються чотири лінії з міжплощинними відстанями $d = 0,2516, 0,2350, 0,1449$ та $0,1188$ нм. Найімовірніше, ці лінії пов'язані з проміжною фазою V_2Ni , оскільки вона, як і вказані дифракційні лінії, зникає у зразках, відпалених при $T_b = 1000$ К. Однозначно ідентифікувати дану фазу неможливо через малу кількість дифракційних ліній. У зразках, відпалених при $T_b = 1000$ К, фазовий склад відповідає TP (Ni-V) + сліди V_2O_3 .

4. ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ОПОРУ ТА ТЕРМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ

В результаті проведених експериментальних досліджень виявлено, що у щойносконденсованих плівок на основі Ni і V величина питомого опору становить $10^{-6}\text{--}10^{-7}$ Ом·м. Так, наприклад, у невідпалених плівок V(40)/Ni(40)/П $\rho = 8 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, а в системі Ni(32)/V(50)/П $\rho = 1,07 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. На рис. 2 показано типові температурні залежності опору двошарових плівок впродовж двох трьох термостабілізаційних циклів в інтервалі температур 300–900 К.

Як видно з рис. 2, при першому циклі «нагрівання–охолодження» в температурному інтервалі від 300 до $T = 370\text{--}380$ К спостерігається збільшення опору з ростом температури. При температурі Θ_1 , яка співпадає з температурою Дебая для масивного V, на залежностях $R(T)$ має місце перегин з наступним зменшенням опору (рис. 2, *а*) або більш повільною тенденцією до його збільшення (рис. 2, *б*). На більшості залежностей опору від температури при $\Theta_2 = 608$ К спостерігається мінімум. Ця особливість спостерігається і для одношарових плівок Ni і може бути пов'язана з процесом заліковування дефектів.

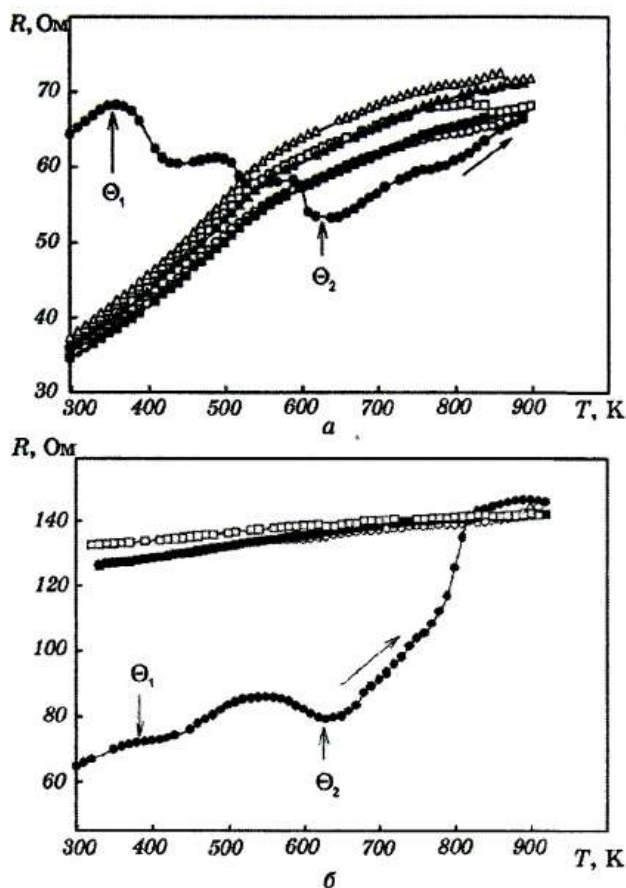


Рис. 2. Залежність $R(T)$ для двох-трьох циклів «нагрівання \leftrightarrow охолодження» для плівок V(20)/Ni(50)/П (а) і Ni(32)/V(50)/П (б). Номер циклу: \bullet , \circ — I цикл; \blacksquare , \square — II цикл; \blacktriangle , \triangle — III цикл (темні точки — нагрівання, світлі — охолодження).

Криві охолодження для першого та наступних термостабілізаційних циклів розташовані вище кривої першого нагрівання. Опір плівок після термообробки до 700–900 К має більшу величину (до 2 разів), ніж у щойносконденсованих плівках, що обумовлено утворенням високоомних твердих розчинів. Винятком є лише плівки, концентрація Ni в яких набагато більша за концентрацію V. У цьому випадку матеріал Ni не повністю витрачається на утворення високоомних твердих розчинів і шар металу, нездійняний в твердотільній реакції, шунтує опір плівки в цілому.

Дані електронографічних досліджень плівки Ni(32)/V(50)/П, залежність $R(T)$ для трьох термостабілізаційних циклів якої приведено на рис. 2, б, показують наступне. Плівка, відпалена до

температури $T_b = 670$ К, має двофазний склад ОЦК-V + ГЦК-Ni. Двошарову структуру зразки втрачають, коли в них утворюються тверді розчини. Вони фіксуються вже при $T_b = 700$ К і, як наслідок, опір плівок після відпалювання має більше значення у порівнянні з невідпаленими.

Оскільки в більшості випадків криві нагрівання і охолодження для другого та третього циклів накладаються одна на одну, можна зробити висновок про закінчення процесів термостабілізації та масоперенесення (взаємна дифузія, утворення твердих розчинів та домішкових фаз) у плівкових зразках на основі Ni і V протягом другого-третього термостабілізаційних циклів.

Аналіз температурної залежності питомого опору $\rho(T)$ та ТКО $\beta(T)$ термостабілізованих плівок (розрахунок ТКО на основі кривої охолодження третього циклу) показав (рис. 3), що в двошарових зразках проявляються особливості при характерних температурах Дебая (Θ_{OD}) і Кюрі (Θ_{OC}), які мають місце в одношарових плівках Ni і V ($\Theta_{OD}^{Ni} = 465$ К, $\Theta_{OC}^{Ni} = 631$ К, $\Theta_{OD}^V = 380$ К). Зміна значень характеристичних температур Θ_C та Θ_D по відношенню до масивних зразків пов'язана не тільки з розмірними ефектами, як в одношарових зразках, а також і з концентраційними ефектами,

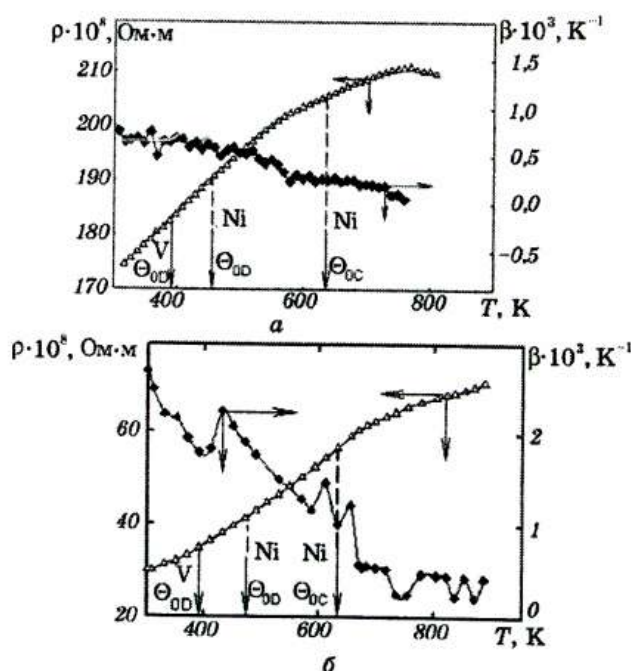


Рис. 3. Температурна залежність питомого опору та ТКО плівок Ni(35)/V(60)/П (а) і Ni(110)/V(20)/П (б). Стрілками вказано положення температур Дебая і Кюрі на вісі температур.

у результаті прояву яких перехідна область біля характеристичних температур є більш розмитою. Це обумовлено тим, що для кожного зерна значення характеристичних температур залежить не тільки від його розміру, але й від кількості домішкових атомів іншого сорту, які проникають за рахунок об'ємної дифузії.

Слід відмітити, що при температурі 730–740 К на залежності $\rho(T)$ змінюється величина кутового коефіцієнта, що може бути пов'язано з початком утворення інтерметалевої фази. У деяких випадках після температури 840 К (рис. 3, а) спостерігається майже горизонтальна ділянка на графіках $\rho(T)$. До причин такої поведінки опору з ростом температури можна віднести вплив окислювальних процесів, а саме утворення незначної кількості V_2O_3 .

5. КОНЦЕНТРАЦІЙНА ТА РОЗМІРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ТКО

Експериментальними дослідженнями було визначено, що у температурному інтервалі 300–400 К залежність $\rho(T)$ має монотонний характер. Останнє дає підставу для використання вказаного температурного інтервалу при розрахунках ТКО, значення якого можна використати для порівняння з розрахованими на основі робочих співвідношень теоретичних моделей для ТКО двошарових плівок. Для прогнозування величини ТКО у двошарових плівках можна скористатися напівкласичним моделью Дімміха [8] або макроскопічним співвідношенням [9].

У першому випадку спрощене співвідношення [9] має вигляд:

$$\beta = A_1 \beta_{\infty 1} \left(1 - \frac{d \ln F_1}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln m_1} \right) + A_2 \beta_{\infty 2} \left(1 - \frac{d \ln F_2}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln m_2} \right), \quad (1)$$

де

$$A_1 = \frac{d_1 \sigma_{\infty 1} F_1}{d_1 \sigma_{\infty 1} F_1 + d_2 \sigma_{\infty 2} F_2}; \quad A_2 = \frac{d_2 \sigma_{\infty 2} F_2}{d_2 \sigma_{\infty 2} F_2 + d_1 \sigma_{\infty 1} F_1};$$

$\beta_{\infty i}$ — асимптотичне значення ТКО при $d_i \rightarrow \infty$ (масивного конденсату); $k_i = d_i / \lambda_{0i}$, $m_i = L_i / \lambda_{0i}$ — наведені товщина та середній розмір зерна i -го шару (d_i і L_i — товщина і середній розмір зерна; λ_{0i} — середня довжина вільного пробігу носіїв електричного струму в об'ємі i -го шару); $F_i = \sigma_i / \sigma_{\infty i}$ — функція Фукса (σ_i та $\sigma_{\infty i}$ — питомі провідності плівки і масивного конденсату відповідно).

У рамках макроскопічного підходу [9] співвідношення для ТКО двошарової плівки має вигляд:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 - \frac{d_1 \beta_2 \rho_2 + d_2 \beta_1 \rho_1}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1}, \quad (2)$$

ТАБЛИЦЯ 1. Розрахунок електронограм від плівки Ni(20)/V(30)/П.

№ п/п	$T_n = 300 \text{ K}$				$T_n = 610 \text{ K}$				$T_n = 830 \text{ K}$				d_{hkl}^0 нм [5]			
	$I, \text{ в.о.}$	$d_{hkl}, \text{ нм}$	hkl	фаза	$a, \text{ нм}$	$I, \text{ в.о.}$	$d_{hkl}, \text{ нм}$	hkl	фаза	$a, \text{ нм}$	$I, \text{ в.о.}$	$d_{hkl}, \text{ нм}$		hkl	фаза	$a, \text{ нм}$
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	сл.	0,233	111	VO_x	0,404	-
2	Д.С.	0,214	110	V	0,303	Д.С.	0,211	110	V	-0,298	-	-	-	-	-	0,214
3	Д.С.	0,203	111	Ni	0,352	Д.С.	0,204	111	Ni	0,353	Д.С.	0,204	200	VO_x	0,407	-
4	сер.	0,176	200	Ni	0,352	сер.	0,177	200	Ni	0,354	сер.	0,179	200	ТР(Ni-V)	0,353	0,204
5	сер.	0,151	200	V	0,303	сер.	0,149	200	V	0,299	-	-	-	ТР(Ni-V)	0,358	0,177
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	сер.	0,146	220	VO_x	0,413	-
7	С.	0,124	220	Ni	0,351	С.	0,126	220	Ni	0,356	сер.	0,126	220	ТР(Ni-V)	0,357	0,124
8	С.	0,106	311	Ni	0,353	С.	0,107	311	Ni	0,354	сер.	0,108	311	ТР(Ni-V)	0,358	0,107

Примітка: Д.С. — дуже сильна, С. — сильна, сер. — середня, сл. — слабка.

ТАБЛИЦЯ 2. Експериментальні та розраховані значення ТКО для двошарових плівок на основі Ni і V.

Зразок	Т, К	c_{Ni}/c_V	$\beta_{експ} \cdot 10^3, K^{-1}$	$\beta_{розр} \cdot 10^3, K^{-1}$			$(\beta_{експ} - \beta_{розр})/\beta_{експ}, \%$		
				співвідн. (1)	співвідн. (2)	співвідн. (3)	співвідн. (1)	співвідн. (2)	співвідн. (3)
Ni(50)/V(90)/П	900	0,69	0,81	-	-	0,51	-	-	37
Ni(35)/V(60)/П	680	0,72	0,78	-	-	0,42	-	-	46
Ni(35)/V(60)/П	800	0,72	0,69	-	-	0,42	-	-	39
Ni(32)/V(50)/П	900	0,79	0,25	-	-	0,38	-	-	52
Ni(35)/V(45)/П	690	0,96	0,48	-	-	0,38	-	-	21
Ni(45)/V(50)/П	670	1,13	0,54	-	-	0,44	-	-	18
Ni(40)/V(40)/П	680	1,27	0,65	-	-	0,40	-	-	38
Ni(65)/V(50)/П	670	1,63	1,88	-	-	0,54	-	-	71
V(40)/Ni(40)/П	660	1,22	1,37	-	-	0,39	-	-	71
V(20)/Ni(20)/П	680	1,27	0,68	-	-	0,91	-	-	34
V(35)/Ni(45)/П	900	1,63	1,46	-	-	0,41	-	-	72
V(30)/Ni(70)/П	700	2,84	2,93	3,92	3,61	0,54	-34	-17	81
V(20)/Ni(50)/П	670	3,17	2,13	3,93	3,57	0,47	-84	-68	78
V(20)/Ni(50)/П	900	3,17	2,22	3,93	3,57	0,47	-77	-61	79

де ρ_i, β_i — питомий опір і ТКО окремих компонентів системи.

Оскільки у двошарових плівках має місце утворення твердих розчинів, то в такому випадку для розрахунку величини β можна використати співвідношення для ТКО плівкового стопу, запропоноване у роботі [10] у такому вигляді:

$$\beta = \frac{\beta_1}{1 + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}} + \frac{\beta_2}{1 + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}}, \quad (3)$$

де c_i — концентрація атомів i -го шару.

Результати апробації робочих співвідношень (1)–(3) наведено в табл. 2. Аналіз цих результатів показав, що у випадку, коли $c_{Ni}/c_V = 0,69$ – $1,27$, експериментальні значення ТКО якісно (до (18–52)%) узгоджуються з розрахованими на основі формули для стопу (3). При вказаних концентраціях величини ТКО, розраховані на основі співвідношень (1) та (2), відрізняються від експериментальних на 300–500%, у зв'язку з чим вони не приводяться в табл. 2. Розбіжність між розрахованими значеннями ТКО на основі співвідношень (1) та (2) для двошарових плівок з експериментальними результатами підтверджує висновок про утворення ТР (Ni–V).

Слід відмітити, що при $d_{Ni} \ll d_V$ ТР(Ni–V) буде займати лише невеликий прошарок біля поверхні V. Такі зразки стосовно електрофізичних властивостей потрібно розглядати як одношарові плівки V з тонким покриттям.

В інтервалі концентрацій $1,27 \leq c_{Ni}/c_V \leq 1,63$ (табл. 2) плівка має перехідний стан між стопом і квазидвошаровою структурою. Внаслідок цього не спостерігається відповідності між експериментальними значеннями ТКО і розрахованими на основі співвідношень (1)–(3).

При концентраціях $c_{Ni}/c_V \geq 2,84$ має місце якісне узгодження експериментальних величин ТКО і розрахованих на основі співвідношень (1) і (2). Точність співпадання становить (17–84)%. У цьому випадку плівка ще частково зберігає двошарову структуру з розмитою межею поділу. У таких зразках один шар складається з кристалів ГЦК-Ni (шар Ni є тоншим, ніж у щойносконденсованому стані), а інший — із ТР (Ni–V). Оскільки опір шару із ТР (Ni–V) набагато більший, ніж опір шару із ГЦК-Ni, то через останній буде шунтувати опір шару із ТР і, як наслідок, термічний коефіцієнт опору буде мати значення, близьке до одношарової плівки Ni.

Додатковим підтвердженням зроблених висновків може бути порівняння (більш детально див. роботу [11]) експериментальних і розрахованих залежностей ТКО від d_2 при сталому значенні товщини d_1 нижнього шару (рис. 4). Краща відповідність між експе-

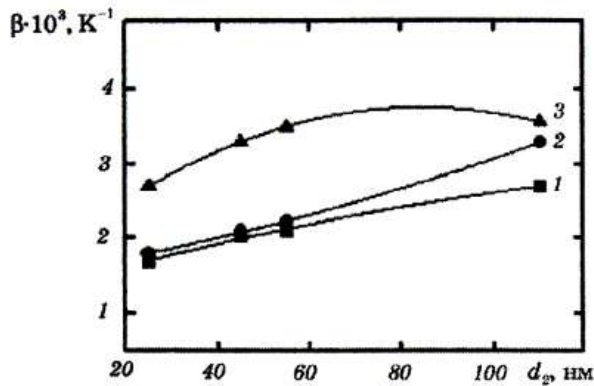


Рис. 4. Залежність експериментальних (крива 1) та розрахованих значень ТКО від товщини d_2 при $d_1 = \text{const}$ на основі співвідношень (1) (крива 3) або (2) (крива 2) для плівок $\text{Ni}(d_2)/\text{V}(20)/\text{П}$.

риментальними даними і співвідношенням (2) цілком зрозуміла, оскільки в модель (1) використовуються величини (наприклад, λ_{0i} , L_i та ін.), які можуть визначатися з великою похибкою або невизначеністю).

6. ВИСНОВКИ

Проведені комплексні дослідження структурно-фазового стану, дифузійних процесів та електрофізичних властивостей плівкових зразків показали, що, змінюючи співвідношення концентрацій компонентів системи і температуру відпалювання, можна сформулювати заданий структурно-фазовий стан.

На температурних залежностях питомого опору і ТКО термостабілізованих плівкових систем спостерігаються особливості при характерних температурах Θ_C та Θ_D , зміна значень яких по відношенню до масивних зразків пов'язана не тільки з розмірними ефектами, як в одношарових зразках, а також і з концентраційними ефектами, у результаті прояву яких перехідна область біля характеристичних температур є більш розмитою.

Апробація теоретичних моделей дала можливість визначити межі застосування кожної з них в залежності від співвідношення концентрацій компонентів системи у щойносконденсованому стані. Одним із факторів, який призводить до відмінності розрахованих та експериментальних результатів для ТКО двошарових плівок, є процеси взаємної дифузії атомів, які обумовлюють зміну коефіцієнта розсіяння електронів на межі зерен.

Роботу виконано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (держбюджетна тема № 0100U003219).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. Каур, В. Густ, *Диффузия по границам зерен и фаз* (Москва: Машиностроение: 1991).
2. *Диаграммы двойных металлических систем* (Ред. Н. П. Лякишев) (Москва: Машиностроение: 1996), т. 1, 2.
3. І. Ю. Проценко, А. М. Черноус, І. О. Шпетний, *Наук. вісн. Ужгородського ун-ту. Сер. Фізика*, № 10: 199 (2001).
4. *Физико-химические свойства элементов: Справочник* (Ред. Г. В. Самсонов) (Киев: Наукова думка: 1965).
5. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков, *Рентгенографический и электронно-оптический анализ* (Москва: Металлургия: 1970), приложение.
6. М. Г. Исаков, В. А. Карпельев, *ФТТ*, 43, вып. 3: 563 (2001).
7. О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль, *Структура и свойства металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 1986).
8. R. Dimmich, *Thin Solid Films*, 158: 13 (1988).
9. I. Yu. Protsenko, L. V. Odnodvoretz, and A. M. Chornous, *Металлофиз. новейшие технол.*, 20, № 1: 36 (1998).
10. В. Б. Лобода, С. М. Пирогова, С. І. Проценко, *Вісн. СумДУ. Сер. Фізика, математика, механіка*, № 3/4: 74 (2001).
11. A. Chornous, I. Protsenko, and I. Shpetnyi, *Cryst. Res. Technol.*, 39, No. 7: 602 (2004).