

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

Магістрант гр. ЕПм-92

Я.А. Кукса

Науковий керівник

д-р фіз.-мат. наук., професор

І.Ю. Проценко

Заст. зав. кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук., професор

Л.В.Однодворець

Суми 2020

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у аналізі результатів стосовно температурної залежності питомого опору багатошарових плівкових матеріалів електроніки та розрахунку термічного коефіцієнту опору та температурного коефіцієнта ТКО.

У результаті проведеного аналізу літературних даних встановлено, що вибір теоретичної моделі для апробації експериментальних даних для двошарових плівкових систем слід робити виходячи із того чи зберігається в системі індивідуальність окремих шарів, утворюється гомогенна система у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарової системи, або формується двошарова система з проміжним біля інтерфейсу шаром плівкового сплаву. Аналіз результатів стосовно температурної залежності питомого опору і розрахунків ТКО для систем $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$ показав, що при збільшенні n з 1 до 3 відбувається відносне зростання величини питомого опору ($\Delta\rho/\rho = 0,30-0,40$) та відносне зменшення величини ТКО ($\Delta\beta/\beta = 0,31-0,38$). Характер температурної залежності ТКО та його величина визначаються характером залежності $\beta(T)$.

Робота викладена на 34 сторінках, зокрема містить 11 рисунків, 4 таблиці, список використаних джерел із 16 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ, БАГАТОШАРОВІ ПЛІВКОВІ СИСТЕМИ, ПИТОМИЙ ОПІР, ТЕРМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТКО.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	6
1.1 Структурно-фазовий стан багатошарових плівкових систем на основі Cr і Cu та Ag, Au і Co	6
1.2 Інтерфейсне розсіювання електронів плівкових матеріалів	13
1.3 Теоретичні феноменологічні моделі	16
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	19
2.1 Методика формування багатошарових плівкових матеріалів електроніки ..	19
2.2 Методика дослідження структурно-фазового складу	20
2.3 Методика дослідження електрофізичних властивостей	22
РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК НА ОСНОВІ Cr і Cu	24
3.1 Аналіз температурних залежностей питомого опору та ТКО	24
3.2 Розрахунок температурного коефіцієнту ТКО	29
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Інтерес до фізичних властивостей багатошарових плівкових матеріалів електроніки зумовлений різними причинами. Так, змінюючи товщину окремих шарів, їх кількість та чергування, можна змінювати у широких межах їх електрофізичні та магніторезистивні властивості. Проте, однією із важливих проблем сучасного матеріалознавства в електроніці залишається нестабільність багатошарових плівкових структур у процесі експлуатації. Це пов'язано з тим, що навіть за кімнатної температури в об'ємі плівкової системи можуть протікати рекристалізаційні процеси. Часом інтенсивні дифузійні процеси спричиняють розмиття меж поділу між окремими шарами (т. зв. інтерфейсамив) або навіть фазоутворення по всьому об'єму багатошарової плівкової структури. Для подолання цієї проблеми до складу багатошарових плівкових структур додаються бар'єрні шари. Компоненти системи підбираються таким чином, щоб вони мали обмежену об'ємну взаємну розчинність. Також матеріали піддаються низькотемпературній термообробці. Відомо, що суттєву роль у взаємній розчинності атомів має режим термообробки плівкових матеріалів, який власне й спричиняє рекристалізаційні процеси. Так, наприклад, у роботі [1] було отримано, що рекристалізації двошарових плівок Cu/Cr в об'ємі великих зерен Cu відбувається сегрегація («захоплення») атомів Cr до 20 ат.% (при об'ємній розчинності в масивних зразках $\sim 0,1\%$), хоча через слабку рекристалізацію зерен Cr зворотній процес не спостерігається. Аналогічний результат отримали автори [2] на прикладі багатошарової плівкової системи, фрагментом якої виступає бішар Cr/Ni. Було показано, що індивідуальність окремих шарів (тобто стабільність інтерфейсів) зберігається до температури відпалювання 670 K, в той час як високотемпературна обробка стимулює інтенсивну дифузію атомів Cr у плівку Ni.

Мета даної роботи полягає у аналізі результатів стосовно температурної залежності питомого опору багатошарових плівкових матеріалів електроніки та розрахунку термічного коефіцієнту опору та температурного коефіцієнта ТКО.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1 Структурно-фазовий стан багатошарових плівкових систем на основі Cr і Cu та Ag, Au і Co

Посинати аналіз багатошарових плівкових матеріалів слід з аналізу структурно-фазового стану складових компонентів системи. У даній роботі розглядаються системи на основі Cr і Cu та Ag, Au і Co. Важливим є те, щоб одношарові плівки, що виступають компонентами багатошарових зразків, мали тип і параметри кристалічної ґратки відповідний до даних для масивних зразків. Так плівки Au, Ag і Cu мають ГЦК ґратку, плівки Cr і Fe – ОЦК, а плівки Co – ГЦП. Кристалічна структура вибраних матеріалів має також свої відмінності: тонкі плівки α -Fe і α -Co – нанокристалічні, а тонкі плівки Au, Ag і Cu – крупнокристалічні. Важливим є аналіз впливу температури на фазовий стан і структури вибраних компонентів багатошарових систем. Так, в одношарових плівках Au і Ag навіть після низькотемпературного відпалювання за $T_{\text{в}} = 600$ К, відбуваються інтенсивні рекристалізаційні процеси, які супроводжуються зростанням середнього розміру кристалітів у 5 – 6 разів. Для одношарових плівок Cr і α -Fe процеси рекристалізація фактично не відбувається. Значно суттєвіші зміни відбуваються як і з фазовим станом, так і кристалічною структурою з плівковими Co у процесі відпалювання. Для невідпалених плівкових зразків ГЦП-Co характерним є утворення значної кількості дефектів пакування. Дані дефекти пакування є областями ГЦК-Co. Дана фаза фіксується електроннографічно. На електроннограмах наявні дві додаткові лінії з міжплощинними відстанями $d_{111} = 2,04$ і $d_{200} = 1,8$ нм. У процесі термовідпалюванні відбувається заліковування дефектів пакування. Такий висновок можна зробити на основі аналізу електроннограм, оскільки зникають додаткові лінії, що належать міжплощинним відстаням d_{111} і d_{200} .

При вивченні електрофізичних властивостей багатошарових плівкових систем є питання стабільності меж поділу між кремимим шарами. Тобто мається на увазі чи зберігається індивідуальність окреми шарів, чи відбувається дифузія по інтерфесам та відбувається розмиття меж поділу. Відповісти на це питання дозволяє аналіз структурно-фазового стану двошарових плівок як складових багатошарових плівкових структур. На рисунку 1.1 представлені мікроснімки кристалічної структури та електронограми від невідпалених та відпалених за $T_v \cong 600 - 650$ К двошарових системи Au/Co/П, Co/Ag/П, Cr/Fe/П та Co/Cu/П. Аналіз електронограм, представлених на рисунку 1.1. свідчить про те, що двошарові плівкові системи Au/Co, Co/Ag після конденсації. Такий висновок робиться на підставі того, що на електронограмах фіксуються ліній як від ГЦК-Au і ГЦП-Co для системи Au/Co та ліній від ГЦК-Ag і ГЦП-Co для системи Co/Ag. У випадку двошарових плівок Cr/Fe/П та Co/Cu/П, то вони вже після конденсації є днофазними. В об'ємі зразків відбувається формування трьох розчинів т.р. (Cu, Co) та (α -Fe, Cr).

Та вже у процесі термообробки в температурному інтервалі 300-700 К фазовий стан зразків Co/Cu, Co/Ag та Co/Au змінюється. Аналіз електронограм свідчить про формування гетерогенного фазового складу та формування ГЦК-т.р. (Cu, Co), (Ag, Co) та (Au, Co). При цьому в об'ємі зразків відбувається формування наногранул, фазовий стан яких відповідає ГЦП-Co. Розмір таких наногранул складає 10-15 нм (рис. 1.1 е). Ці грану дають додаткові дифракційні відбиття на електронограмах у вигляді екстра рефлексів (див. вставку на рис. 1.1 е).

Аналізуючи характер діаграм стану для двокомпонентних систем (Cu-Co), (Ag-Co) та (Au-Co), що знаходяться у масивному стані, можна зробити висновок про метастабільний характер плівкових твердих розчинів. Даний висновок було обґрунтовано авторами роботи [4] для двошарової плівкової системи Co/Cu/П. А саме, порівнюючи дифракційні картини зразків до та після відпалювання, то можна помітити, що на електронограмах для відпалених

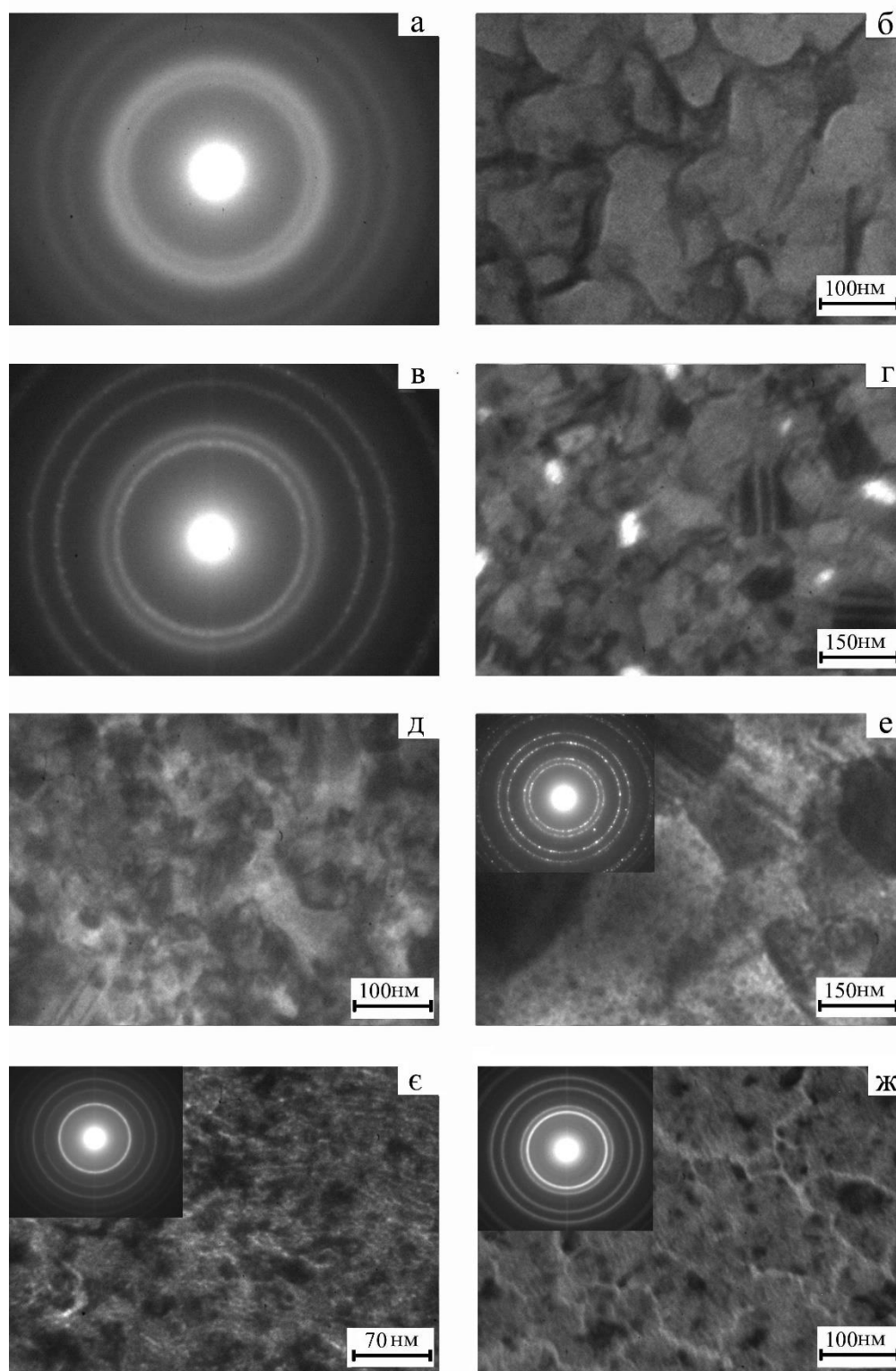


Рисунок 1.1 – Кристалічна структура двошарових плівок Au(20)/Co(20)/П (а-г), Co(20)/Ag(60)/П (д, е), Cr(30)/Fe(30)/П (е) та Co(5)/Cu(10)/П (е) у невідпаленому (а, в, д, е) та відпаленому до $T_b \cong 600 - 650$ К (б, г, е, ж). У дужках вказана товщина в нм [3]

зразків окрім ліній, що відповідають ГЦК-т.р.(Cu, Co) і ГЦК-Cu, фіксуються лінії слабкої інтенсивності або екстра- рефлексів від ГЦП-Co. Поява ліній си екстра-рефлексів від ГЦП-Co залежить від концентрації атомів Co у системі. Це може свідчити про частковий розпад метастабільного т.р. Cu(Co). Як результа відбувається фомування кристалітів ГЦП-Co на основі гранул. Кристаліти ГЦП-Co формуються із атомів, які були розчинені в матриці Cu, а також із надлишкових атомів, що локалізувалися по межах зерен у квазіаморфному стані. Поява на електронограмах ліній від ГЦК-Cu визначається товщиною шару Cu. Зазначається, що за відносно великих товщин міді (відповідно при малих концентраціях атомів Co) формуються зерна Cu, збіднені на атоми Co. На рис. 1.1 ж ілюструє той випадок, коли кристаліти Cu відсутні. Відмітомо, що на електронограмах від двошарових систем Co/Cu/П після високотемпературної обробки до 700-900 К окрім ліній ГЦП-Co фіксуються також лінії ГЦК-Co [4].

У таблиці 1.1 наведено зразок розрахунку електронограми від двошарової системи Au(50)/Co(40)/П.

Таблиця 1.1 – Розшифрування дифракційної картини від термостабілізованої плівкової системи Au(50)/Co(40)/П [3]

I, в.о.	d, нм	hkl	Фаза	Параметр ґратки т.р. (Au, Co), нм
1 С.	0,237	111	т.р.	0,410
2 ср.	0,206	200	т.р.	0,412
3 сл.	0,146	10.2	ГЦП-Co	–
4 ср.	0,145	220	т.р.	0,410
5 сл.	0,124	311	т.р.	0,412
6 сл.	0,107	20.1	ГЦП-Co	–
7 сл.	0,094	331	т.р.	0,409
С. – сильна; ср. – середня; сл. - слабка			\bar{a} (Au, Co) = 0,411 нм; \bar{a} (Au) = 0,417 нм	

Наявність ліній слабкої інтенсивності від ГЦП-Co говорить саме про стабілізацію гранульованого стану. Базуючись на цих результатах автори роботи [3] отримали узагальнені концентраційні залежності параметра ґратки твердого розчину, що утворюється в системі (рис. 1.2). Концентрація компонент визначалася за співвідношенням $C_i = \frac{D_i d_i \mu_i^{-1}}{D_1 d_1 \mu_1^{-1} + D_2 d_2 \mu_2^{-1}}$, де D_i та μ_i – густина і молярна маса i -го шару ($i = 1, 2$).

Згідно [3] концентраційна залежність параметра ґратки твердого розчину для системи Co/Cu добре узгоджується із правилом Вегерда, а величини параметра ґратки – із даними, наведеними у роботі [5] для зразків, що формувалися методом дночної конденсації Co і Cu. Також, у роботах [6-8] встановлено, що максимальне значення концентрації розчинених атомів Co становить 8 ат.% (у матриці Ag), 11 ат.% (у Au) та 44 ат.% (у Cu). Порівнюючи ці дані з даними для масивних зразків можна говорити про значне відхилення. А отже, це дає підставу зробити висновок, що плівкові тверді розчини перенасичені, а система Co/Cu містить атоми, що мають необмежену розчинність. Цим пояснюється відмінний характер залежностей параметра ґратки a від концентрації атомів кобальту c_{Co} , а саме про відповідність правила Вегерда і узгодження даних робіт [3] та [8] і [5]. Отже, співпадіння c_{Co} у плівковій структурі або у твердому розчині можливе лише за умови необмеженої розчинності атомів.

У випадку систем Co/Ag та Co/Au має місце обмежена розчинність атомів Co у Ag чи Au. Наслідком цього є те, що величина параметру ґратки майже для в'язого діапазону концентрації атомів Co (до 8 ат.% Co). Аналізу ю чані роботи [3], також слід зазначити, що вибрані товщини шару Co відповідають концентраціям $c_{Co} = 40 - 80$ ат.%. За таких концентрації на електронограмах фіксуються лише відбиття від гранул ГЦП-Co, тобто відбувається акомодация залишку атомів Co межами зерен т.р. (Me, Co). Це пизводить до того, що вони перебувають у квазіаморфному стані.

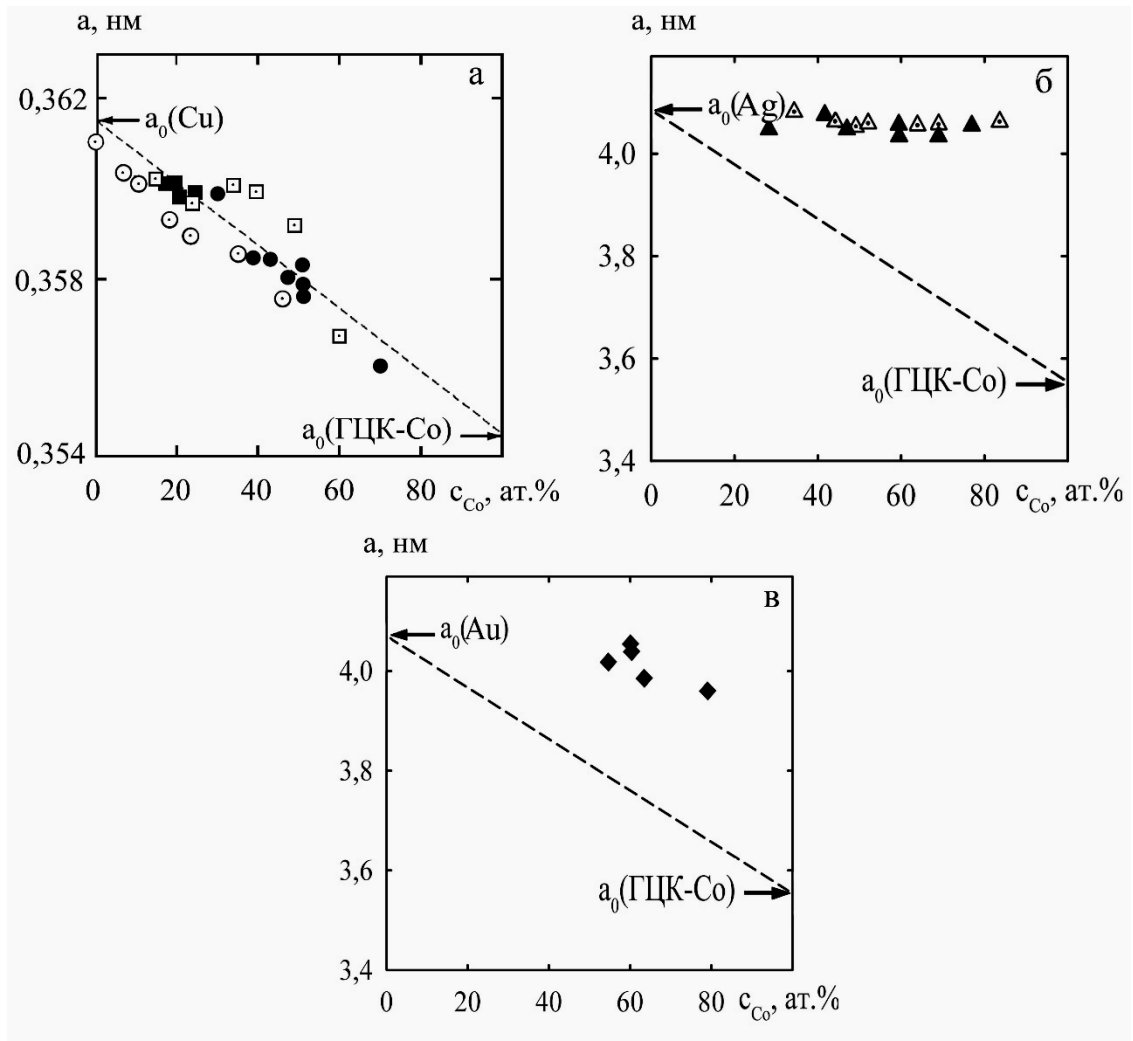


Рисунок 1.2 – Залежність параметра ґратки ГЦК -т.р. (Cu, Co) (а), (Cu, Ag) (б) і (Cu, Au) (в) від концентрації атомів Co у двошаровій системі: ●, ■, ▲ і ◆ - наші дані та □ - дані [8] (залежність від загальної концентрації атомів Co у двошаровій системі); ○ - дані [5] і Δ - дані [6] (залежність від концентрації атомів Co у т.р.). a_0 – параметр ґратки масивних металів. ■ - результати отримані методом рентгенографії [3]

Таблиця 1.2 – Розшифрування дифракційної картини від плівкової системи Cr(30)/Fe(30)/П [3]

I, в.о.	d, нм	hkl	фаза	Параметр ґратки т.р. (α -Fe, Cr), нм
1 Д.С.	0,205	110	т.р. (α -Fe, Cr)	0,289
2 ср.	0,145	200	–//–	0,290
3 ср.	0,118	211	–//–	0,289
4 ср.	0,102	220	–//–	0,288
5 сл.	0,091	310	–//–	0,288
6 сл.	0,077	321	–//–	0,289
Д.С. – дуже сильна; ср. – середня; сл. - слабка			\bar{a} (α -Fe, Cr) = 0,289 нм $a(\alpha$ -Fe) = 0,287 нм $a(\text{Cr}) = 0,288$ нм	

Аналізуючи дані стосовно структурнофазового стану двошарових систем Fe/Cr, можна зробити висновок, що в даній системі також утворюється т.р. (α -Fe, Cr). Формування твердого розчину відбувається вже на стадії конденсації (рис.1.1є, таблиця 1.2). Однак це протерічить діаграмі стаану дл даної системи, згідно якої конденсаційно-температурні інтервали конденсації відповідають евтектичному стану. Можливою причиною утворення твердого розчину на стадії конденсації на думку авторів [3] є перегріванням плівкової системи вцілому вище температури евтектики при осадженні верхнього шару. Також велику роль у формуванні твердого розчину вже на стадії конденсації відіграють процеси конденсаційно-стимульованої зерномежеої дифузії [9].

Висновок про утворення гранульованого стану атомів Fe в матриці Cr був також зроблений авторами [10]. Однак, необхідно зауважити, що конденсації багат шарових плівоквих систем в області евтектичного стану згідно [11] можливе також утворення вторинних кристалітів (гранул) як на межах зерен, так і в об'ємі зерен материнської фази. Ймовірність формування гранул буде залежать від концентрації атомів Fe і Cr в системі.

1.2 Інтерфейсне розсіювання електронів у плівкових системах

У роботі [12] була запропонована методика визначення впливу процесу інтерфейсного розсіювання носіїв заряду на величину електричного опору. Дана методика ґрунтується на високоточному вимірюванні величини питомого опору або термічного коефіцієнту для двох металевих плівкових зразків, що мають однакову товщину, один один з них це одношарова плівкова, а другий - двошарова плівкова система зі штучно змодельованою внутрішньо межею поділу. Штучна межа поділу створюються шляхом зупинки в процесі конденсації плівки на час у 10 хв. Для того, щоб коректно оцінити внесок процесу інтерфейсного розсіювання у величину ρ або β , необхідне дотримання наступних вимог при конденсації одношарової плівки і двошарової системи:

- високоточне вимірювання товщини (з точністю - $\pm 0,5$ нм);
- постійна швидкість конденсації (з точністю $\pm 0,1$ нм/с);
- значення концентрації та енергії активації заліковування дефектів кристалічної будови (вакансійного типу та дефекти пакування), які отримували шляхом побудови спектра дефектів за методикою Венда, повинні бути близькі для двох зразків;
- розподіл зерен за розмірами повинен бути ідентичним, відхилення не повинно перевищувати 10%;
- концентрація зерен з дефектами пакування також повинна бути близькою, оскільки ці зерна мають достатньо велику енергію активації заліковування [13].

Крім однокомпонентних зразків дана методика може бути застосована і до дво- або тришарових плівок систем, шари якої це різні метали.

За умови виконання зазначених вище умов, а також провівши порівняльний аналіз величин ρ або β , можна за їх різницею визначити яку роль відіграє інтерфейсне розсіювання носіїв заряду в електрофізичних властивостях.

Розрахунок спектр дефектуру дефектів у роботі [13] проводився за методикою Венда. Для цього плівки відпалювалися за температурного

інтервалу 300-630 К по схемі «нагрівання – охолодження» протягом двох циклів. Швидкість нагрівання становила 3-5 К/хв. Функція розподілу $F_0(E)$ пов'язана із швидкостями відпалювання $\partial\rho / \partial T$ (перше нагрівання) і $(\partial\rho / \partial T)_1$ (перше або друге охолодження) співвідношенням

$$F_0(E) = -\left(\frac{1}{kU}\right)\left(\frac{\partial\rho}{\partial T} - \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_1\right),$$

де k – стала Больцмана; $E = nkT$ – енергія активації заліковування дефектів; $U = u(u+2)/(u+1)$ – функція, яка пов'язана із числом ступенів вільності систем дефектів.

Величину u обчислюють за допомогою логарифмічного рівняння

$$u + \lg u = \lg(4n\varpi_{\max} / 2\pi),$$

де n – число атомів у дефекті; t – час відпалювання до певної температури; $\varpi_{\max} = k\Theta_D / \hbar$ – дебаївська частота.

За даною методикою автори [12] провели дослідження впливу процесу інтерфейсного розсіювання носіїв заряду у двошарових зразках Cu/Cu/П. Вплив інтерфейсного розсіювання проявляється у зміні характеру функції розподілу дефектів $F_0(E)$ та у величині ρ або β . На рисунку 1.3 наведено спектр дефектів для зразків Cu(24), Cu(36) та Cu(24)/Cu(36)/П. Спектри для двох перших зразків говорить про ідентичність умов конденсації плівок. Поява додаткового максимуму за $E = 0,66$ еВ на спектрі дефектів для зразка зі штучною межею поділу дозволяє зробити висновок про формування штучного інтерфейсу і його внесок у загальний спектр дефектів. Оскільки умови конденсації зразків були ідентичні, та враховуючи розподіл за розмірами зерен і концентрацію дефектів пакування, то різницю у залежностях $\rho(T)$ і $\beta(T)$ для одношарових зразків та зразка зі штучною межею поділу (рис. 1.4) можна пов'язати саме із формуванням штучного інтерфейсу. Розрахунок

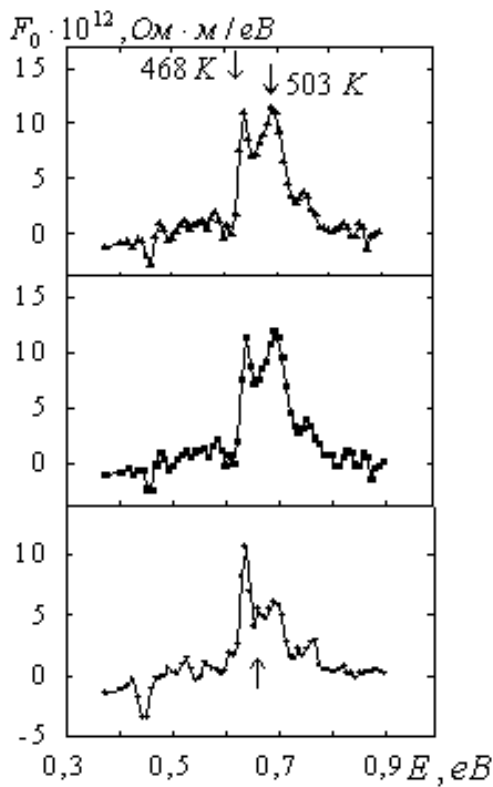
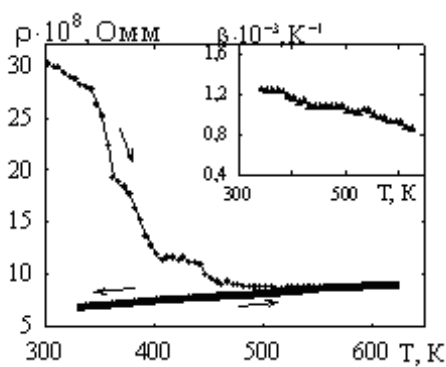
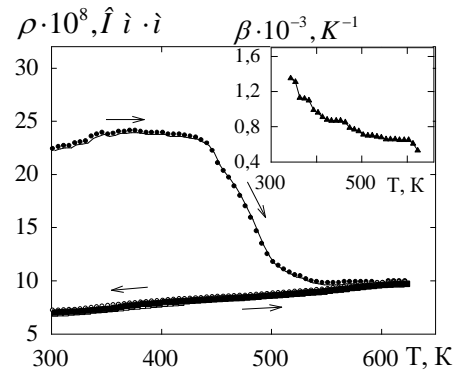


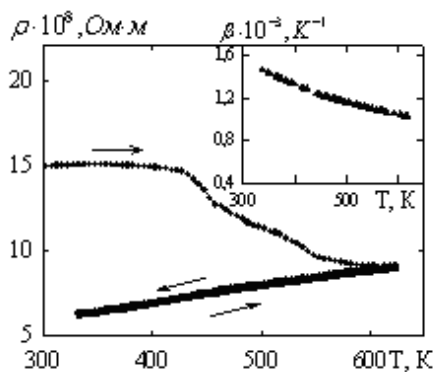
Рисунок 1.3 – Спектр дефектів плівок Cu(24)(а), Cu(36) (б) і плівкової системи Cu(24)/Cu(36)/П (в). Стрілками позначені основні максимуми на спектрі та особливість, пов'язана з наявністю інтерфейсу [13]



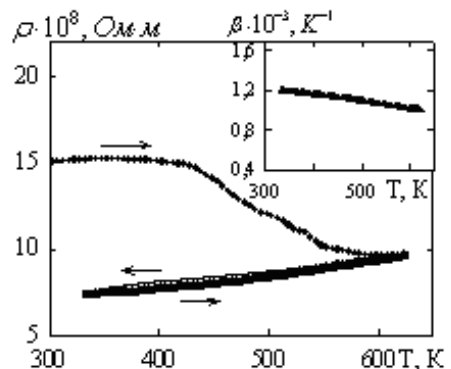
а



б



в



г

Рисунок 1.4 – Температурна залежність питомого опору і ТКО (на вставках) для одношарових (а, б) та двошарових (в, г) плівок Cu для двох термостабілізаційних циклів. Товщина, нм: а, б – 60; в, г – 75 [13]

$$\left(\frac{\rho[Cu(d_1)/Cu(d_2)] - \rho[Cu(d_1 + d_2)]}{\rho[Cu(d_1 + d_2)]} \right) i$$
 відносного зменшення ТКО

$$\left(\frac{\beta[Cu(d_1 + d_2)] - \beta[Cu(d_1)/Cu(d_2)]}{\beta[Cu(d_1 + d_2)]} \right)$$
 дає відповідно величини $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,12-0,21$ та

$\frac{\Delta\beta}{\beta} \Delta\beta/\beta = 0,09-0,20$. Отже автори [13] пов'язують таку зміну у

електрофізичних властивостях саме дією інтерфейсного розсіювання носіїв заряду.

Зауважимо, що певні висновки щодо внеску інтерфейсного розсіювання носіїв заряду можна зробити не тільки провівши аналіз характеру залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ для багат шарових плівкових систем, а також порівнявши експериментальні значення температурного коефіцієнту опору з розрахунковими даними, використавши співвідношення теоретичних моделей для дво шарових систем, в якій згідно аналізу фазового стану, відбувається збереження індивідуальності окремих шарів, або ж відбувається формування плівкового сплаву [3].

1.3 Теоретичні феноменологічні моделі

У роботі [21] були запропоновані напівкласичні теоретичні моделі для аналізу електрофізичних властивостей плівкових систем. Однак, вона виявилася складними для апробації, як і у випадку застосування феноменологічних моделей для β . Тому автори роботи [3], скориставшись основними теоретичними співвідношеннями, що лежать в основі напівкласичних моделей на випадок:

- 1) дво шарової плівкової системи, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів (біпластина);
- 2) гомогенної системи у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної дво шарової системи;

3) двошарової системи з проміжним біля інтерфейсу шаром плівкового сплаву.

При виведенні співвідношень автори [3] базуються на тому, що систему для випадків один та три можна представити як паралельне з'єднання двох чи трьох шарів (загальноприйнятий підхід [15]). Однак, при цьому все ж таки треба враховувати, що в реальних системах відбувається відхилення від умови паралельності, тому при апробації теоретичних моделей допускається похибка $\pm 15\%$. Таким чином, на основі співвідношень для питомого опору дво- чи тришарової системи

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2 (d_1 + d_2)}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \text{ та } \rho = \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 (d_1 + d_2 + d_3)}{\rho_2 \rho_3 d_1 + \rho_1 \rho_3 d_2 + \rho_1 \rho_2 d_3},$$

означень для β

$$\beta = \frac{d \ln \rho}{dT},$$

де l – довжина плівки,

та формули для питомого опору сплава

$$\rho = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2,$$

де c – концентрація,

авторами [3] було отримано вираз для термічного коефіцієнту опору біпластини, плівкового сплаву і двошарової системи із проміжним шаром відповідно:

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_1 + \beta_2 + \frac{d_1 \alpha_1 + d_2 \alpha_2}{d_1 + d_2} - \frac{\beta_1 \rho d_2 + \rho d_2 \alpha_2 + \beta_2 \rho d_1 + \rho d_1 \alpha_1}{\rho d_2 + \rho d_1} \cong \\ &\cong \beta_1 + \beta_2 + \frac{\beta_1 \rho d_2 + \beta_2 \rho d_1}{\rho d_2 + \rho d_1} \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $\alpha_i = \frac{d \ln l_i}{dT}$ - термічний коефіцієнт лінійного розширення;

$$\beta_c \cong \frac{\beta_1}{1 + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}} + \frac{\beta_2}{1 + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}}, \quad (1.5)$$

де c_i можна розрахувати за співвідношенням (1).

Для того, щоб отримати вираз для третього типу зразків з проміжним шаром твердого розчину біля інтерфейсів автори [3] скористалися геометричною моделлю, наведеною на рисунку 1.5.

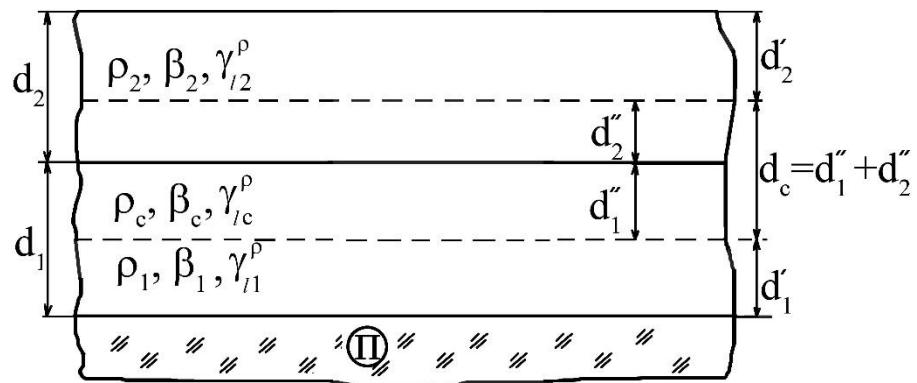


Рисунок 1.5 – Геометрична модель двошарової плівкової системи із проміжним шаром сплаву (т.р.) біля інтерфейсу [3]

По аналогії з (1.4) було отримано співвідношення:

$$\beta \cong \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{(d_1 - d_1'')(\beta_c \rho_c \rho_2 + \beta_2 \rho_c \rho_2) + (d_2 - d_2'')(\beta_c \rho_c \rho_1 + \beta_1 \rho_c \rho_1)}{(d_1 - d_1'')\rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'')\rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'')\rho_1 \rho_2} + \frac{(d_1'' + d_2'')(\beta_1 \rho_1 \rho_2 + \beta_2 \rho_1 \rho_2)}{(d_1 - d_1'')\rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'')\rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'')\rho_1 \rho_2}, \quad (1.6)$$

в чисельнику якого знехтували доданками, пропорційними α , тобто доданками такого типу $d_i \alpha_i \rho_i \rho_k$. Застосовуючи такі позначення $A_1 = (d_1 - d_1'')\rho_c \rho_2$, $A_2 = (d_2 - d_2'')\rho_c \rho_1$ та $A_3 = (d_1'' + d_2'')\rho_1 \rho_2$, вираз (1.6) можна спостити до виду:

$$\beta \cong \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{A_1(\beta_c + \beta_2) + A_2(\beta_c + \beta_1) + A_3(\beta_1 + \beta_2)}{A_1 + A_2 + A_3}, \quad (1.6')$$

який зручний для апробації.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика формування багат шарових плівкових матеріалів електроніки

Плівкові зразки отримувалися методами резистивного (Cu) та електронно-променевого випаровування (Co, Au і Fe) у вакуумі при температурі підкладки $T_{\text{п}} = 300$ К. Для створення вакуумних умов були використані установки на основі пароструменевих (тиск $10^{-3} - 10^{-4}$ Па) та магніто-розрядних ($10^{-5} - 10^{-6}$ Па) насосів. Свіжосконденсовані плівки витримувались у вакуумі при температурі $T = 300$ К. протягом 20 хвилин для стабілізації їх електрофізичних властивостей.

Кінцева товщина як одно-, так і двошарових плівок визначалась інтерферометричним методом (прилад МП-4) із реєстрацією картини інтерференції цифровою камерою Panasonic KXL-600 і комп'ютером, що забезпечувало точність $\pm 0,5$ нм при товщині плівок 1-100 нм.

Вимірювання товщини у процесі конденсації здійснювалося методом кварцового резонатора. Як датчик товщини використовувалися кварцові пластини РГ-08 з резонансною частотою 10 МГц, що вмикалися в схему генератора. Для живлення генератора використовувалося стабілізоване джерело живлення Б5-50. Частота вихідного сигналу вимірювалася приладами Ф5035 або ЧЗ-34А. Товщина плівок визначалася за співвідношенням

$$d = \frac{N_q \cdot \rho_q}{\rho_f \cdot f_q} \cdot (f_q - f), \quad (2.1)$$

де ρ_q , ρ_f – питома густина ($\text{кг}/\text{м}^3$) кварцу та плівки відповідно; f_q , f – резонансні частоти кварцової пластини (Гц) перед і після напилення

відповідно; $N_q = 1,668 \cdot 10^3$ Гц·м – частотна константа, яка залежить від кристалографічної орієнтації площини зрізу кварцової пластини.

Одним з суттєвих джерел похибки вимірювання методом кварцового резонатора є температурна нестабільність його резонансної частоти. Указана похибка зводиться до мінімуму шляхом термостабілізації датчика товщини.

Як підкладки для дослідження електрофізичних властивостей (температурна залежність опору) використовувалися скляні поліровані пластини зі вплавленими металевими стержнями та ситалові пластини. В останньому випадку на них наносилися контакти у вигляді двошарової плівки Cu/Cr/П (П – підкладка). Нижній шар хрому забезпечував високу адгезію контактів, а верхній шар міді – високу електропровідність.

2.2 Методика дослідження структурно-фазового складу

Для вивчення кристалічної будови плівкових зразків та для проведення електроннографічного аналізу використовувався електронний мікроскоп високої розрізняювальної здатності ПЕМ 125К. Підкладкою для відносно тонких зразків служили вільні плівки С ($d \sim 10$ нм), отримані нанесенням на (001) NaCl. Діапазон збільшень у режимі ПЕМ склав величину $(40-500) \cdot 10^3$ разів. Плівкові системи, отримані при $T_{\text{п}}=300$ К, відпалювалися до 5 хвилин при $T_{\text{в}} = 500, 600, 700$ та 900 К, і після охолодження до кімнатної температури було проведено дослідження їх структурних характеристик методом електронної мікроскопії та електроннографії.

В основі методу розшифрування електроннограмми лежать п'ять співвідношень [15]. Перше співвідношення пов'язує кут розсіювання з довжиною хвилі та міжплощинними відстанями (закон Бреггів):

$$2d_{hkl} \cdot \sin \Theta = n \cdot \lambda, \quad (2.2)$$

де d_{hkl} – міжплощинна відстань (hkl – індекси Міллера); n – порядок

відбиття хвилі (в електронографії $n = 1$).

Друге співвідношення пов'язує між собою діаметр дифракційного кільця з так званою сталою приладу. У зв'язку з тим, що кути Θ мають малу величину (2-4), можна записати $\text{tg}2\Theta \cong \sin 2\Theta \cong 2\Theta = D/2L$. Із (2.3) визначаємо 2Θ як відношення $2\lambda/2d_{hkl} = \lambda/d_{hkl}$. Звідси

$$D/2L = \lambda/d_{hkl} \text{ або } D \cdot d_{hkl} \cong 2L \cdot \lambda \quad (2.3)$$

Величина $2L \cdot \lambda = C$ одержала назву сталої приладу:

$$C = 2L \cdot \lambda = (D \cdot d_{hkl}) \quad (2.3')$$

Її можна визначити за допомогою електронограми від еталонного зразка (це плівки Al, Au, Ag, NaCl, TiCl, MgO) з відомими міжплощинними відстанями. Знаючи C , ми можемо знайти d_{hkl} для невідомого зразка та визначити тип і параметри решітки.

Для визначення величини C необхідно заміряти якомога точніше ($\pm 0,1$ мм) діаметри кілець на електронограмі від еталона.

Для розрахунків електронограм від невідомого зразка необхідно скористатися третім, четвертим та п'ятим рівняннями електронографії. Третім рівнянням може бути т.зв. квадратична форма, яка у випадку кубічної сингонії має такий вигляд:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_{hkl}^2} \quad (2.4)$$

Звідси випливають четверте і п'яте співвідношення електронографії

$$\frac{1}{d_{h_1 k_1 l_1}^2} : \frac{1}{d_{h_2 k_2 l_2}^2} : \frac{1}{d_{h_3 k_3 l_3}^2} : \dots = (h_1^2 + k_1^2 + l_1^2) : (h_2^2 + k_2^2 + l_2^2) : (h_3^2 + k_3^2 + l_3^2) : \dots \quad (2.5)$$

$$a_{hkl} = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.6)$$

2.3 Методика дослідження електрофізичних властивостей

Електричний опір плівок вимірювався з точністю $\pm 0,06\%$ цифровим вольтметром АРРА-109 (здійснювалося два вимірювання за секунду). Температура контролювалася за допомогою хромель-алюмелевої термопари і вольтметра UT-70В, що забезпечило точність $\pm 1\text{К}$. Дані про опір і температуру в процесі вимірювання заносилися до комп'ютера (рис. 2.1), що давало можливість отримати графіки залежності опору від температури.

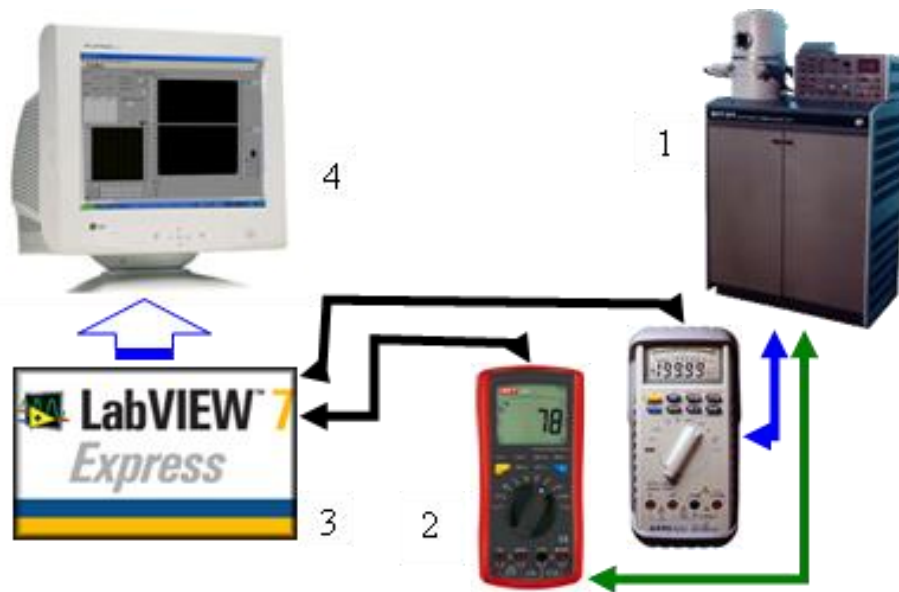


Рисунок 2.1 – Блок-схема комп'ютерної системи реєстрування та оброблення результатів вимірювання електричного опору: 1 – вакуумна камера; 2 – прилади для вимірювання опору; 3 – програмне забезпечення; 4 – дисплей комп'ютера [13]

Для характеристики температурної залежності опору плівок чи масивних зразків вводиться поняття термічного коефіцієнта опору (ТКО) β :

$$\beta_R = \frac{1}{R_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \text{ або } \beta_\rho = \frac{1}{\rho_n} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}, \quad (2.7)$$

де R_n, ρ_n – початкове значення опору та питомого опору, а величини β_R та β_ρ практично не відрізняються. У зв'язку з тим, що R_n і ρ_n знаходяться у знаменнику, то величина ТКО у плівках значно менша порівняно з масивними зразками. Слід також мати на увазі, що в чистих металевих масивних чи в плівкових зразках ТКО завжди більше нуля. Але при одержанні плівки в поганих вакуумних умовах, з малою швидкістю конденсації або коли плівка не суцільна її ТКО може виявитися від'ємним [15].

Також в роботі проводилися розрахунки температурного коефіцієнта термічного коефіцієнту опору (ТК ТКО) за співвідношенням

$$TKTKO = \frac{1}{TKO(300K)} \cdot \frac{TKO(T) - TKO(300K)}{T - 300K}. \quad (2.8)$$

Для розрахунків ТК ТКО був вибраний температурний інтервал $\Delta T = 50$ К.

РОЗДІЛ 3

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК НА ОСНОВІ Cr і Cu

3.1 Аналіз температурних залежностей питомого опору та ТКО

Як зазначалося у літературному огляді про вплив інтерфейсного розсіювання носіїв заряду на електрофізичні властивості багат шарових плівкових систем можна судити не тільки аналізуючи характер температурних залежностей питомого опору, а також порівнюючи експериментальні дані стосово величини термічного коефіцієнту опору з розрахунковими даними, використовуючи для цього відомі теоретичні моделі.

Згідно аналізу літературних даних вдвошарових плівкових системах Cu/Cr зберігається індивідуальність окремих шарів, тому для розрахунків у даному випадку краще скористатися виразом (1.4). Згідно розрахунків, наведених у таблиці 3.1, можна підтвердити висновок, що система Cr/Cu/П задовольняє умові двошаровості. Враховуючи припущення, що в реальних системах відбувається відхилення від умови паралельності, тому при апробації теоретичних моделей допускається похибка $\pm 15\%$, отримані результати можна трактувати як задовільні, і як такі, що підтверджують висновок про структурно-фазовий стан системах на основі Cr і Cu.

Таблиця 3.1 – Порівняння експериментальних та розрахованих за співвідношенням (1.4) величин ТКО при $T \approx 300\text{K}$

Плівкова система	$\beta \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$\beta_{\text{розр}} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$\frac{\beta - \beta_{\text{роз}}}{\beta}, \%$
Cr(30)/Cu(30)/П	1,34	1,12	16,4
Cr(180)/Cu(90)/П	1,90	1,30	30,0
Cu(48)/Cr(15)/П	2,22	1,90	14,0
Cu(48)/Cr(55)/П	2,58	2,37	8,1

Процедура термостабілізація електрофізичних властивостей плівкових зразків $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$ була проведена наступним чином: нагрівання до заданої температури \leftrightarrow охолодження до кімнатної температури з повторм протягом трьох циклів. Температурний інтервал відпалювання ΔT на першому циклі становив 300-450 К, а на кожному з послідуєчих поступово збільшувався на 100 К. Таким чином на третьому циклі термообробка становив $T_{\text{в}} = 300\text{-}650$ К. Це було зроблено для того, щю визначити як змінюється величини питомий опір та ТКО при збільшенні номеру термостабілізаційного циклу. На рисунку 3.1 наведні температурні залежності опору для багат шарових плівкових систем $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$, де $n = 1\text{-}3$ – число фрагментів у системі.

Зробимо аналіз температурної залежності $\rho(T)$, наведених на рисунку 3.1. У процесі нагрівання на першому циклі на графіку $\rho(T)$ для системи $[\text{Cu}/\text{Cr}]_1/\text{П}$ спостерігаються дві ділянки, на кожній з яких величина питомого опору по-різному змінюється при збільшенні температури: 1) $T = 300 - 350$ К - має місце незначне збільшення величини ρ при зростання температури; 2) $T = 350 - 400$ К – різке спадання величини ρ при нагріванні, яке закінчується невеличким збільшення величини питомого опору. Ділянка охолодження на першому циклі, а також другий та третій цикли (як ділянка нагрівання, так і ділянка охолодження) на залежності $\rho(T)$ майже паралельні, що характерно для плівок металів. Такий металевий характер температурної залежності питомого опору дозволяє зробити висновок, що вже на першому циклі нагрівання відбулися процеси заліковування дефектів кристалічної будови.

Розрахунок відносного зміни величини питомого опору і зменшення ТКО проводилися за відповідними співвідношеннями:

$$\frac{\rho[\text{Me}_1/\text{Me}_2]_n - \rho(\text{Me}_1/\text{Me}_2)}{\rho(\text{Me}_1/\text{Me}_2)}, \quad \frac{\beta[\text{Me}_1/\text{Me}_2]_n - \beta(\text{Me}_1/\text{Me}_2)}{\beta(\text{Me}_1/\text{Me}_2)},$$

де $\rho(\text{Me}_1/\text{Me}_2)$ і $\beta(\text{Me}_1/\text{Me}_2)$ – відповідно питомий опір і ТКО двошарової системи; $\rho[\text{Me}_1/\text{Me}_2]_n$, $\beta[\text{Me}_1/\text{Me}_2]_n$ – відповідно питомий опір і

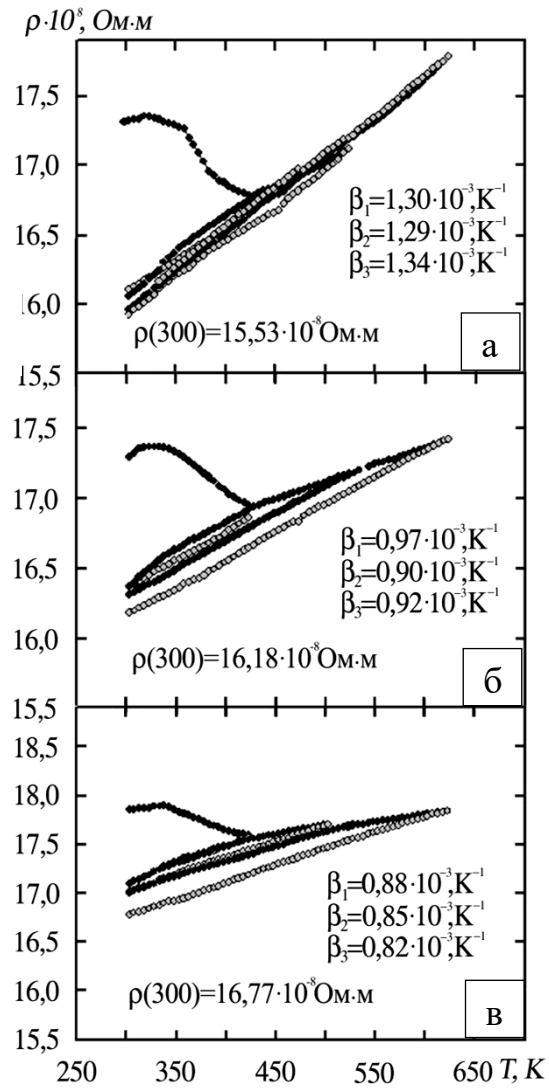


Рисунок 3.1 – Залежність питомого опору від температури для плівкових систем $\text{Cr}(30)/\text{Cu}(30)/\text{P}$ (а), $[\text{Cr}(15)/\text{Cu}(15)]_2/\text{P}$ (б) та $[\text{Cr}(10)/\text{Cu}(10)]_3/\text{P}$ (в). Величина β розрахована за першими трьома кривими охолодження [13]

ТКО багат шарової системи; n – кількість повторів.

Розрахунки показали, що при збільшенні числа фрагментів n в системі $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$ з 1 до 3 при однаковій загальній товщині зразків $d_{\text{заг}} = 60$ нм відбувається відносне збільшення величини питомого опору та відносне зменшення величини термічного коефіцієнту опору: $\Delta\rho/\rho = 0,30-0,40$, а $\Delta\beta/\beta = (0,31-0,38)$. Таку зміну електрофізичних властивостей можна пояснити дією додаткового механізму розсіювання електронів на інтерфейсі.

Крім того, як видно з графіків, представлених на рисунку 3.1 величина ТКО залежить не тільки від числа фрагментів n в системі $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$, а й від номеру термостабілізаційного циклу.

Необхідно особливо підкреслити, що у плівкових системах на основі Cr і Cu значною мірою зберігається індивідуальність шарів, що впливає не тільки із досліджень методом ВІМС [16], але і з електронографічних даних (на дифракційних картинах фіксується система кілець від Cr і Cu).

Порівняльний аналіз експериментальних даних термічного коефіцієнту опору для двошарових плівкових систем Au/Co/П і Ag/Co/П, які відповідно представлені на рисунках 3.2 та 3.3 із розрахунковими даними, отриманими при розрахунках за співвідношенням (1.5) свідчать про задовільну відповідність експериментальних результатів розрахунковим (результати розрахунків наведені у таблиці 3.2). Це підтверджує те, що відповідає умовам за яких відбувається формування плівкових сплавів. Таке задовільна відповідність може

Таблиця 3.2 – Порівняння експериментальних та розрахованих за співвідношенням (1.5) величин ТКО при $T \approx 300\text{K}$

Плівкова система	$\beta \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$\beta_{\text{розр}} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	$\frac{\beta - \beta_{\text{роз}}}{\beta}, \%$
Au(50)/Co(40)/	1,25	1,44	15,2
Au(8)/Co(20)/	0,95	0,82	13,7
Ag(90)/Co(30)/П	2,30	1,68	26,9
Ag(20)/Co(10)/П	1,90	2,37	28,0

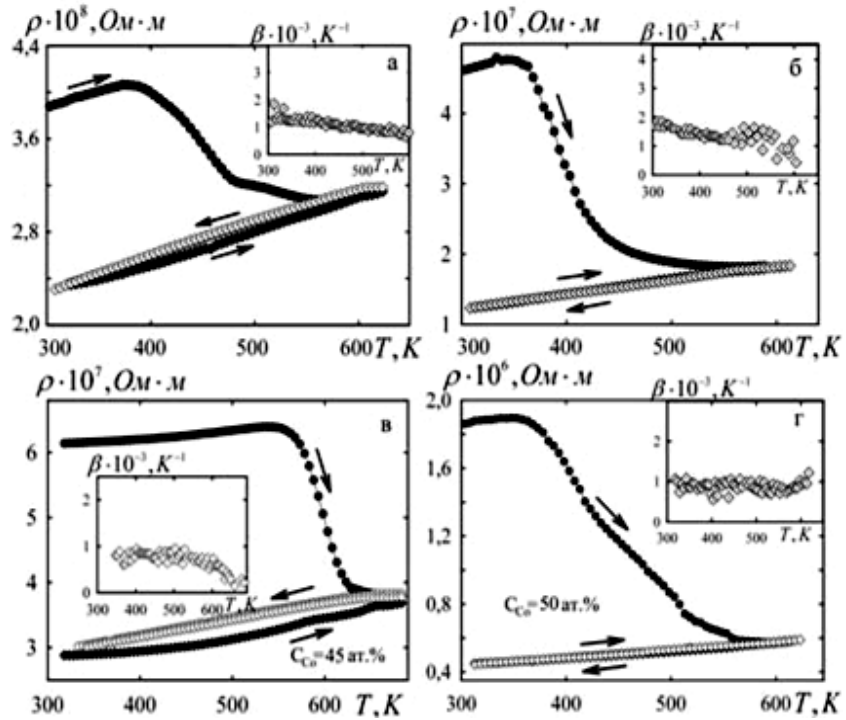


Рисунок 3.2 – Залежність питомого опору і ТКО (вставка) для плівкових систем Au(8) (а), Au(50) (б), Au(50)/Co(40)/П (в) та Au(8)/Co(20)/П (г) [13]

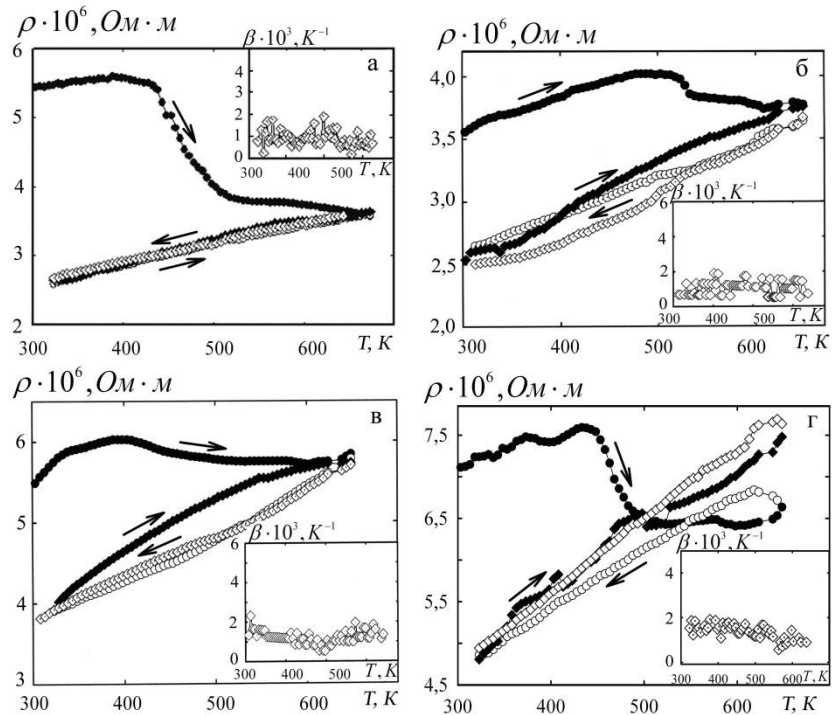


Рисунок 3.3 – Залежність питомого опору та ТКО від температури для плівкових систем Залежність питомого опору і ТКО (вставка) для плівкових систем на основі Ag(20) (а), Ag(60) (б), Ag(90)/Co(30)/П (в) та Ag(20)/Co(10)/П (г) [13]

бути додатковим аргументом, який підтверджує висновок, що в двошарових системах Au/Co/П і Ag/Co/П у процесі термообробки відбувається утворення твердих розчинів т.р.-(Au,Co) і (Ag,Co) з елементами гранульованого стану.

3.2 Розрахунок ТКО та температурного коефіцієнту ТКО

Виходячи з експериментальних даних температурних залежностей питомого опору, представлених на рисунку 3.1 для двошарової плівкової системи Cr(30)/Cu(30)/П та багатошарових плівкових систем [Cr(15)/Cu(15)]₂/П та [Cr(10)/Cu(10)]₃/П були проведені розрахунки термічного коефіцієнту опору β за співвідношенням (2.7). Розрахунки проводилися для температурного інтервалу $\Delta T = 50$ К. Базуючись на розрахункових даних були побудовані температурні залежності ТКО, які наведені на рисунках 3.4 а, в, д. Оскільки ТКО згідно означення це величина обернено пропорційна до величини питомого опору, то отримуємо, що значення β спадає при зростанні температури.

Використовуючи дані для температурного коефіцієнта опору були проведені розрахунки температурного коефіцієнта ТКО за співвідношенням (2.8), наведеним у другому розділі роботи. Для розрахунків, як і у випадку розрахунків величини ТКО, був обраний температурний інтервал $\Delta T = 50$ К. Виходячи з розрахунків за співвідношенням (2.8) були побудовані температурні залежності ТК ТКО для двошарової плівкової системи Cr(30)/Cu(30)/П та багатошарових плівкових систем [Cr(15)/Cu(15)]₂/П та [Cr(10)/Cu(10)]₃/П, представлені на рисунках 3.4 б, г, е. Як видно з даного рисунка величина ТК ТКО є від'ємною та поступово зростає при збільшенні температури.

Для двошарових плівок Au(50)/Co(40)/П та Au(8)/Co(20)/П характер температурних залежності ТК ТКО (рис. 3.5 а, б) свідчить про незначну залежність термічного коефіцієнту опору від температури, особливо у випадку системи Au(8)/Co(20)/П. Для системи Au(8)/Co(20)/П величина ТК ТКО фактично не змінюється при зміні температури і становить $-1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

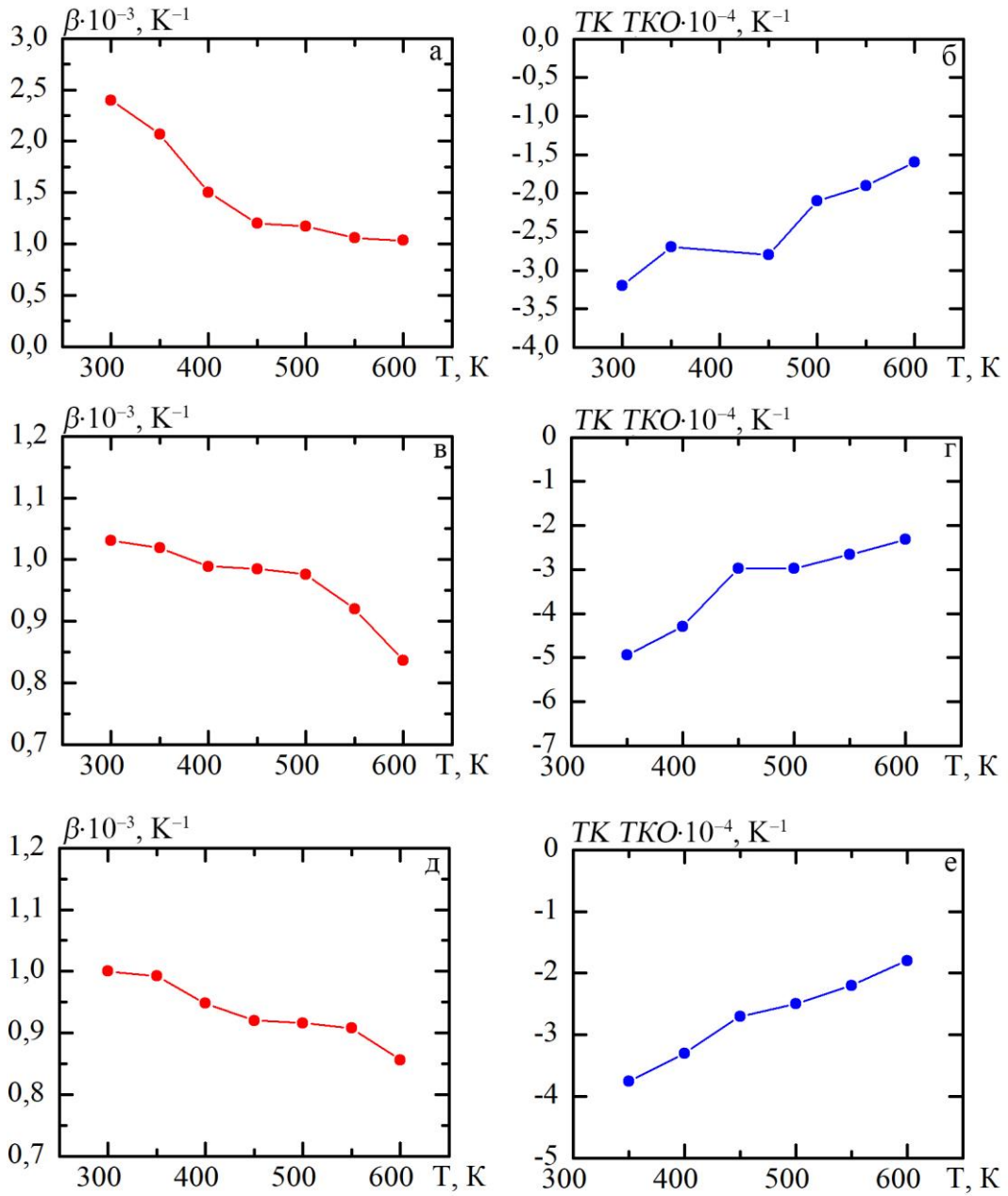


Рисунок 3.4 – Температурні залежності термічного коефіцієнту опору (TKO) (а, в, д) та ТК TKO (б, г, е) для плівкових систем Cr(30)/Cu(30)/П (а, б), [Cr/Cu]₂/П (в, г) та [Cr/Cu]₃/П (д, е)

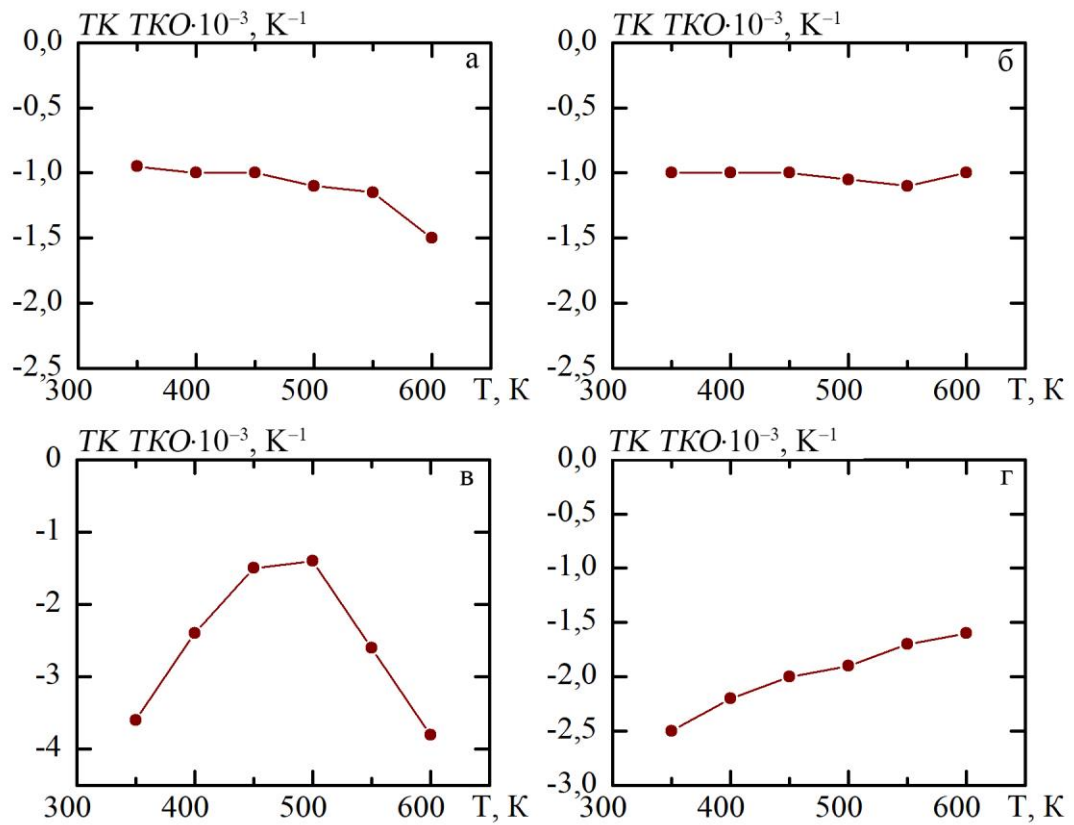


Рисунок 3.5 – Температурні залежності ТК ТКО для плівкових систем Au(50)/Co(40)/П (а), Au(8)/Co(20)/П (б), Ag(90)/Co(30)/П (в) та Ag(20)/Co(10)/П

Температурна залежність для двошарової системи має свої особливості Ag(90)/Co(30)/П (рис. 3.5в). На графіку $TK \cdot TKO(T)$ спостерігається максимум у вигляді вертикальна ділянка, що відповідає температурному діапазону $T = 450-500$ К. Поява даного пов'язана з провом мінімуму на залежності $TKO(T)$ (див. рис. 3.4 в), при $T_b = 490$ К. Для двошарової системи Ag(20)/Co(10)/П величина ТК ТКО є від'ємною та поступово зростає при збільшенні температури.

ВИСНОВКИ

На основі узагальнення літературних даних та аналізу експериментальних результатів можна зробити такі висновки:

1. Вивчення структурно-фазового стану двошарових плівок як складових багатошарових плівкових систем дозволяє зробити висновок стосовно можливої стабільності інтерфейсів, впливу на це дифузійних процесів та спрогнозувати фазові перетворення на випадок багатошарової плівкової системи.

2. Методика вивчення впливу інтерфейсного розсіювання електронів на електричний опір ґрунтується на високоточному вимірюванні питомого опору або ТКО двох металевих плівкових зразків однакової товщини, один з яких є одношаровою плівковою, а другий - двошаровою плівковою системою, в якій штучно змодельована внутрішня межа поділу шляхом припинення конденсації плівки на певний час.

3. Вибір теоретичної моделі для апробації експериментальних даних для багатошарових плівкових систем слід робити виходячи із того чи зберігається в системі індивідуальність окремих шарів, утворюється гомогенна система у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарової системи, або формується двошарова система з проміжним біля інтерфейсу шаром плівкового сплаву.

4. Аналіз результатів стосовно температурної залежності питомого опору і розрахунків термічного коефіцієнту опору для багатошарових плівкових систем $[\text{Cr}/\text{Cu}]_n/\text{П}$ показав, що величини ρ та β залежать від номера термостабілізаційного циклу та від числа фрагментів n у системі. При збільшенні n з 1 до 3 відбувається відносне зростання величини питомого опору ($\Delta\rho/\rho = 0,30-0,40$) та відносне зменшення величини ТКО ($\Delta\beta/\beta = 0,31-0,38$).

5. Характер температурної залежності ТК ТКО та його величина визначаються характером залежності $\beta(T)$. Для всіх досліджуваних систем ТК ТКО є відємною величиною та має порядок $10^{-4}-10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волошко С.М., Сидоренко С.И. Макеева И.Н. Исследование взаимной диффузии в тонкопленочной системе Cr/Cu/Ni/Au методом электронной оже-спектроскопии // Металлофиз. новейшие технол. - 1994. - Т.16, №10. - С. 61 - 68.
2. Проценко І.Ю., Черноус А.М., Шпетний І.О., Вісник Львівського національного університету. Серія фізична. – 2003. - №36. – С. 116.
3. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем / С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний та ін. // Успехи физ. мет. – 2007. – Т.8, №4. – С. 247–278.
4. The strustura and phase composition of Co/Cu bilayers-sensing elements for magnetoresistive application / K. Marszalek, M. Marszalek, S. Protsenko et. al // Materialy IX Konferencja Gzujniki Optoelektroniezne i Elektronicze.- Krakov-Zakopane: IFJ PAN, 2006. - P.161-164.
5. Yamamoto K., Kitada M. Microstructure and magnetoresistance in Cu-Co alloy thin films // Thin Solid Films. – 1995. - V.263. - P.111-116.
6. M. Kitada. Magnetoresistance and microstructure of sputtered Au-Co thin films// J. Magnet. Mat. Mater. – 2000. - V. 208. - P.244-250.
7. Correlation between the structural and transport properties of granular CoAg systems prepared by MBE / A. Aziz, S.M. Thompson, K. Ounadjela et. al // J. Magn. Magn. Mater. - 1995. - V.191. - P. 313-314.
8. Yang G.H., Geng G.H., Zeng F. Formation of metastabile phases and their effect on the magnetic properties of Co-Cu multilayers // Thin Solid Films. - 2005. - V.484. - P. 283-289.
9. Дифузійні процеси в нанокристалічних двошарових плівкових системах на основі металів / В.В. Бібик, Т.М. Гричановська, М. Маршалек та ін. // Металлофиз. новейшие технол. – 2006. – Т.28, №6. – С.707 - 715.
10. Influence of a Pb buffer layer on structural and magnetotransport properties of Co/Cu multilayers / M. Marszalek, J. Jaworski, M. Kas et al. // Vacuum.–

- 2004.– V. 74. – P. 287 - 291.
11. Koltunowicz T.N., Bondariev V., Odnodvoretz L.V., Shumakova M., Tkach O.P. Electro physical properties of granular film alloys.–Vacuum. – 2019. – V.164. – P.165–169.
 12. Однодворець Л.В., Проценко С.І., Чорноус А.М. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія ; за заг. ред. проф. І.Ю. Проценка. – Суми: СумДУ, 2011. – 203 с.
 13. Saltykov D., Shumakova N., Pazukha I., Shkurdoda Y., Protsenko S. The Effect of the Structural-Phase State and Diffusion Processes on Electrical Conductivity of Nanocrystalline $Fe_xCo_{100-x}/Cu/ Fe_xCo_{100-x}$ Thin Films ($0 < x < 100$). – Cryst.Res. Technol. – 2020. – V. 55. – Iss. 10. – ID 2000071.
 14. Дехтярук Л.В., Проценко І.Ю., Чорноус А.М. Транспортні розмірні ефекти у двошарових полікристалічних плівках / Л.В Дехтярук., І.Ю Проценка, А.М Чорноус // Успехи физ. мет. - 2007. - Т.8, №1. - С. 21-64.
 15. Проценко І.Ю., Однодворець Л.В. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми): навчальний посібник. - Суми: Сумський державний університет, 2011. - 231 с.
 16. Saltykov D., Shumakova N., Pazukha I., Shkurdoda Y., Protsenko S. The Effect of the Structural-Phase State and Diffusi on Processeson Electrical Conductivity of Nanocrystalline $Fe_xCo_{100-x}/Cu/ Fe_xCo_{100-x}$ Thin Films ($0 < x < 100$). – Cryst. Res. Technol. – 2020. – V. 55. – Iss. 10. – ID 2000071.