

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

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ З РІЗНОЮ
АРХІТЕКТУРОЮ**

Студента гр. ЕПм – 81н



М. В. Васюхно

Науковий керівник,
д.ф.-м.н., професор



І. Ю. Проценко

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д.ф.-м.н., професор



І. Ю. Проценко

Суми – 2020

Реферат

Об'єктом дослідження кваліфікаційної магістерської роботи є особливості електрофізичних властивостей плівкових матеріалів електроніки з різною архітектурою.

Мета роботи полягала в дослідженні особливостей електрофізичних властивостей (термічний коефіцієнт опору – ТКО; коефіцієнт поздовжньої тензочутливості - КТ) плівкових матеріалів електроніки з різною архітектурою двошарових плівкових систем Co(Cu), Ag(Ni), Fe(Ni), Ag(Co), Cr/Ni/П, Cr/Co/П, Ag/Cr/П, Ag/Ni/П, Fe/Ni/П, Ni/Co/П, Mo/Co/П.

У результаті виконання роботи були проведені розрахунки ТКО та КТ для двошарових систем з різною архітектурою, а саме: систем, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів (модель біпластини); систем у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарових систем; систем з проміжним шаром плівкового сплаву біля інтерфейсу.

При виконанні досліджень такого характеру використовуються такі методи: електронно-променевого випаровування для отримання тонких плівок, метод кварцового резонатора для виміру товщини плівки, метод просвічувальної електронної мікроскопії і електроннографії для дослідження кристалічної структури і фазового складу плівкових систем; методики для виміру залежностей (термічний коефіцієнт опору, коефіцієнт поздовжньої тензочутливості).

Робота викладена на 33 сторінках, у тому числі містить 17 рисунків, 7 таблиць, список літератури складається із 20 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА : ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ПЛІВКОВІ СИСТЕМИ З РІЗНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ, ПИТОМИЙ ОПР, ТЕРМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДУЛ 1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)	5
1.1. Загальна характеристика, кристалічна структура і фазовий склад багатокomпонентних плівкових матеріалів	5
1.2. Феноменологічні моделі для ТКО і КТ.....	9
РОЗДУЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	12
2.1. Застосування методів просвічувальної електронної мікроскопії та електронографії	12
2.2. Методика проведення досліджень ТКО і КТ	13
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ З РІЗНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ	17
3.1. Термічний коефіцієнт опору двошарових плівкових систем	17
3.1.1. Двошарові плівкові системи із необмеженою розчинністю	17
3.1.2. Двошарові плівкові системи із обмеженою розчинністю	19
3.1.3. Двошарові плівкові системи із збереженням індивідуальності шарів	22
3.1. Коефіцієнт тензочутливості двошарових плівкових систем	23
3.1.1. Двошарові плівкові системи із необмеженою розчинністю	23
3.1.2. Двошарові плівкові системи із обмеженою розчинністю	24
3.1.3. Двошарові плівкові системи із збереженням індивідуальності шарів	27
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Плівкові системи є фундаментальними основами мікро- та наноелектроніки. Особливо важливим є питання вивчення фізичних процесів, що впливають на електрофізичні властивості плівкових систем з різною архітектурою металів і залишається актуальною тематикою як фізики твердого тіла, матеріалознавства так і електроніки. Отже до таких матеріалів ставлять високі технологічні вимоги: стабільність та термічна стійкість структурно-фазового складу, а також чутливість робочих характеристик до дії температури, деформації, магнітного поля тощо. Велика увага до наноматеріалів викликаний різними причинами, одна з них в тому, якщо змінити розмір наночастинок та їх концентрацію, використовувати різні комбінування методів одержання плівок, а саме (одночасна або пошарова конденсація компонент) та умови формування плівкових матеріалів (температура підкладки, тиск у вакуумній камері, швидкість конденсації) товщину окремих шарів та їх чергування, може серйозно вплинути на фізичні та електрофізичні властивості.

На сьогодні накопичений певний експериментальний матеріал стосовно електрофізичних властивостей (ТКО і КТ) плівкових матеріалів із різним ступенем взаємної розчинності атомів, що дозволяє здійснювати моделювання цих властивостей, а на його основі – прогноз ТКО і КТ.

Для проведення коректного моделювання необхідно враховувати фазовий склад одно- і двокомпонентних плівок; розмірні і концентраційні залежності питомого опору, ТКО і КТ та використовувати відповідні експериментальній ситуації теоретичні моделі феноменологічного характеру. Оскільки такі моделі містять велику кількість емпіричних параметрів, то при моделюванні їх необхідно брати із літературних джерел.

Результати кваліфікаційної роботи були представлені і обговорені на Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ-2020» (м.Суми).

РОЗДУЛ 1. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Загальна характеристика, кристалічна структура і фазовий склад багатокomпонентних плівкових матеріалів

Зацікавленість до плівкових матеріалів як до одношарових, так і до багатшарових плівок, а також до мультишарів, плівкових сплавів, гранульованих плівок і гетерогенних матеріалів обумовлений перспективою варіювання їх електрофізичних та магніторезистивних властивостей шляхом зміни умов конденсації, фазового складу та концентрації компонент. Важливим є дослідження особливостей формування структурно-фазового складу плівок на основі феромагнітних та немагнітних металів в умовах термообробки, впливу деформації і магнітного поля [1].

Завдяки високій температурній стійкості плівкові матеріали на основі металів (оксиди, карбіди, нітриди, і т.п.) можна застосовувати для формування методом багатшарової металізації пасивних елементів інтегральних мікросхем (ІМС) із наперед заданою структурою шарів і значенням робочих параметрів. У багатьох випадках вони можуть змінити багатшарові системи, адже мають ряд переваг: стабільність температурних, магнітних і деформаційних характеристик, чутливих елементів в умовах підвищених температур. Характер і особливості температурних залежностей опору пояснено не тільки з точки зору неупорядкованої атомної структури, а й виникнення ефектів слабкої локалізації. Можна виділити основні типи гранульованих плівкових матеріалів на основі діелектричних і провідних матриць, які формуються різними методами: магнетронного розпилення при постійній або змінній високочастотній прискорюючій напрузі та іонного розпилення в тліючому розряді інертного газу при тиску $1 - 10^{-2}$ Па; термічного випаровування у вакуумі $10^{-4} - 10^{-7}$ Па. Широко застосовуються наступні методи одночасного розпилення металів із двох незалежних джерел шляхом термічного або електронно-променевого

випаровування. Використовується також метод пошарового осадження різних металів на одну підкладку, при якому реалізуватися гранульований плівковий сплав [2].

Із аналізу літературних даних, впливає що найбільш досліджені електрофізичні та магніторезистивні властивості багатошарових і багатокомпонентних плівкових систем на основі феромагнітних (Co, Fe, Ni) та благородних (Cu, Ag, Au) металів. Певний об'єм експериментальних даних був накопичений стосовно їх фазового складу та магнітних властивостей. Різними авторами було досліджено вплив температури на структуру і властивості гранульованих плівок при варіюванні температури підкладки або температурного інтервалу відпалювання (див., наприклад [3-8]).

На нинішньому етапі розвитку електронного приладобудування основними типами плівкових матеріалів для формування чутливих елементів електроніки: багатошарові плівкові системи та мультишари (чергування магнітних та немагнітних шарів); комбіновані багатошарові системи із нанорозмірних магнітних шарів у вигляді гранульованих нанокомпозитів із магнітних наногранул; гранульовані плівкові матеріали, використаних у немагнітну матрицю, немагнітних прошарків та проміжних шарів твердого розчину. Крім твердого розчину, у системах метал/метал можуть утворитися кристалічні фази з деякими особливостями в яких хімічна сполука має визначене співвідношення атомів елементів, яке відповідає стехіометричному складу, а також кристалічну решітку, що може відрізнятися від решіток вихідних компонент і мати сталу температуру плавлення або певні унікальні властивості [9, 10].

У процесі проходження практики детально, на основі літературних джерел, був вивчений фазовий склад плівок на основі Co і Cu, Ag або Au (таблиця 1.1) і частково це питання проаналізовано стосовно інших, запланованих у завданні практики, систем. Обов'язковою складовою досліджень подібного характеру є аналіз бінарних діаграм стану (див., наприклад, [11]).

Таблиця 1.1

**Фазовий склад приладових плівкових систем на основі
Co і Cu, Ag або Au при 300 К. Адаптовано із робіт [7, 9]**

Система	Загальна товщина, нм	Умови отримання, фазовий склад	
		Температура підкладки, $T_{\text{п}} = 300\text{К}$	Температура відпалювання, $T_{\text{в}} = 870 - 900\text{К}$
Двошарові плівки на основі Co і Cu	10 – 35	т.р. Cu (Co)	ГЦК - Cu + т.р. Cu (Co) при $C_{\text{Co}} < C_{\text{Cu}}$
		т.р. Cu (Co)	т.р. Cu (Co) + гранули ГЦП-Co при $C_{\text{Co}} > C_{\text{Cu}}$
		т.р. Cu (Co)	т.р. Cu (Co) + гранули ГЦП-Co при $C_{\text{Co}} = C_{\text{Cu}}$
Плівковий сплав на основі Co і Ag	35 – 40	Гранули Co (2 нм) + аморфні ділянки	Гранули Co (30 нм) + ділянки з упорядкованою структурою (8 нм) при $C_{\text{Co}} = 22\%$
Двошарові плівки на основі Co і Au	55	ГЦП-Co + ГЦК-Au + т.р. Au (Co)	Гранули ГЦП-Co + т.р. Au (Co)
Плівковий сплав на основі Co і Au	50	Гранули ГЦП-Co (1–2 нм) + ГЦК-Au + т.р. Au (Co)	Гранули ГЦП-Co (4 нм) + ГЦК-Au + т.р. Au (Co)

Приклад кристалічної структури та фазового складу плівкових зразків на основі Fe та Ag, сформованих методом пошарової конденсації, наведений на рис. 1.1. У невідпаленому стані на електронограмах спостерігаються лінії, які належать ОЦК- Fe (параметр $\bar{a} = 0,2880$ нм) та ГЦК- Ag ($\bar{a} = 0,4086$ нм). При зміні товщини окремих шарів у системі Ag/Fe/П фазовий склад залишається той же. Це свідчить про те, що у плівкових системах на основі Fe і Ag, сформованих методом пошарової конденсації, до великої міри зберігається індивідуальність окремих шарів.

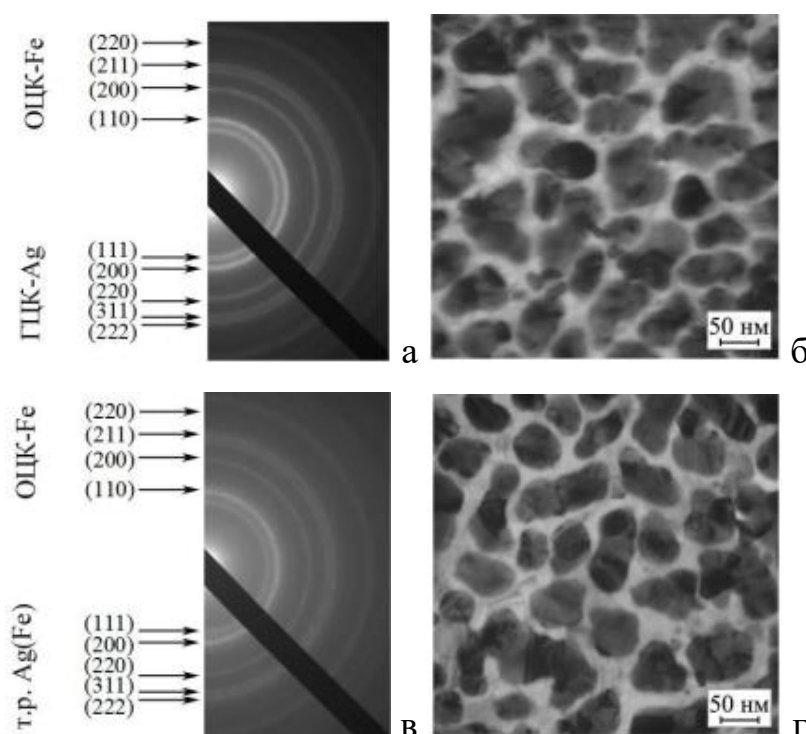


Рис. 1.1. Дифракційні картини (а, в) та мікроснімки кристалічної структури (б, г) тонкоплівкової системи Ag(30)/Fe(30)/П, отримано методом пошарової конденсації, до (а, б) та після термовідпалювання до $T_b = 800$ К (в, г). Адаптовано із роботи [12]

Аналізуючи літературні дані можна сказати, що фізичні властивості різних типів плівкових матеріалів будуть до великої міри визначатись їх фазовим складом, кристалічною структурою систем і процесами фазоутворення в процесі термообробки.

1.2. Феноменологічні моделі для ТКО і КТ

Складність апробації напівкласичних моделей, не дає певної їх переваги перед феноменологічними моделями для ТКО і коефіцієнта повздовжньої тензочутливості. У зв'язку з цим скористаємося основними співвідношеннями цих моделей [2] для випадків:

- Двошарова плівкова система, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів (модель біпластини);
- Гомогенна система у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарової системи;
- Двошарова система з проміжним шаром плівкового сплаву біля інтерфейсу.

Отримуємо необхідні співвідношення для ТКО біпластини, плівкового сплаву і двошарової системи із проміжним шаром відповідно:

$$\begin{aligned} \beta &= \beta_1 + \beta_2 + \frac{d_1 \alpha_1 + d_2 \alpha_2}{d_1 + d_2} - \frac{\beta_1 \rho_1 d_2 + \rho_1 d_2 \alpha_2 + \beta_2 \rho_2 d_1 + \rho_2 d_1 \alpha_1}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \cong \\ &\cong \beta_1 + \beta_2 + \frac{\beta_1 \rho_1 d_2 + \beta_2 \rho_2 d_1}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} \end{aligned} \quad (1.1)$$

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

В теорії металів для розрахунку двокомпонентного т.р. використовується співвідношення:

$$\rho_c = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2. \quad (1.2)$$

ρ_1, ρ_2 – питомий опір першої та другої компоненти, c_1, c_2 – концентрація першої та другої компоненти.

Співвідношення для термічного коефіцієнту двокомпонентного т.р. з необмеженою розчинністю:

$$\beta_c \cong \frac{\beta_1}{1 + \frac{c_2 \rho_2}{c_1 \rho_1}} + \frac{\beta_2}{1 + \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}} \quad (1.3)$$

Для отримання співвідношення (1.3) ми скористаємось геометричною моделлю двошарової системи із проміжним шаром сплаву (рис. 1.2). За аналогією з (1.1) отримуємо таке співвідношення:

$$\beta \equiv \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{(d_1 - d_1'')(\beta_c \rho_c \rho_2 + \beta_2 \rho_c \rho_2) + (d_2 - d_2'')(\beta_c \rho_c \rho_1 + \beta_1 \rho_c \rho_1)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2} + \frac{(d_1'' + d_2'')(\beta_1 \rho_1 \rho_2 + \beta_2 \rho_1 \rho_2)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2}, \quad (1.4)$$

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 $A_3 = (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2$, співвідношення (1.4) можна спростити до виду:

$$\beta \equiv \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{A_1(\beta_c + \beta_2) + A_2(\beta_c + \beta_1) + A_3(\beta_1 + \beta_2)}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (1.5)$$

який зручний для апробації.

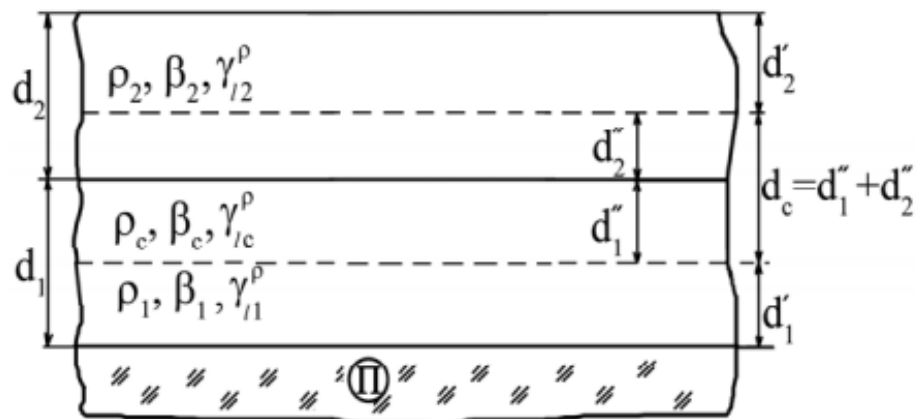


Рис. 1.2. Геометричний модель двошарової плівкової системи із проміжним шаром сплаву (т.р.) біля інтерфейсу. Адаптовано із роботи [2]

Для коефіцієнта γ_i^ρ нами отримані аналогічні співвідношення:

$$\begin{aligned} \gamma_i^\rho &= \gamma_{i1}^\rho + \gamma_{i2}^\rho - \frac{d_1\mu_1 + d_2\mu_2}{d_1 + d_2} - \frac{\gamma_{i1}^\rho\rho_1d_2 - \rho_1d_2\mu_2 + \gamma_{i2}^\rho\rho_2d_1 - \rho_2d_1\mu_1}{\rho_1d_2 + \rho_2d_1} \cong \\ &\cong \gamma_{i1}^\rho + \gamma_{i2}^\rho - \frac{\gamma_{i1}^\rho\rho_1d_2 + \gamma_{i2}^\rho\rho_2d_1}{\rho_1d_2 + \rho_2d_1} \end{aligned} \quad (1.6)$$

де μ_i – коефіцієнт Пуассона i -го шару;

$$\begin{aligned} \gamma_i^\rho &= \frac{\gamma_{i1}^\rho\rho_1c_1 + \rho_1c_1\gamma_{i1}^c + \gamma_{i2}^\rho\rho_2c_2 + \rho_2c_2\gamma_{i2}^c}{c_1\rho_1 + c_2\rho_2} \cong \\ &\cong \frac{\gamma_{i1}^\rho\rho_1c_1 + \gamma_{i2}^\rho\rho_2c_2}{c_1\rho_1 + c_2\rho_2} = \frac{\gamma_{i1}^\rho}{1 + \frac{c_2\rho_2}{c_1\rho_1}} + \frac{\gamma_{i2}^\rho}{1 + \frac{c_1\rho_1}{c_2\rho_2}}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

де $\gamma_{ii}^c = \frac{d \ln c_i}{d \ln l}$ – відносна зміна концентрації i -го елемента при деформації.

За аналогією із (1.4) отримуємо співвідношення для γ_i^ρ для системи третього типу:

$$\begin{aligned} \gamma_i^\rho &\cong \gamma_{i1}^\rho + \gamma_{ic}^\rho + \gamma_{i2}^\rho - \\ &- \frac{(d_1 - d_1'')(\gamma_{ic}^\rho \rho_c \rho_2 + \gamma_{i2}^\rho \rho_c \rho_2) + (d_2 - d_2'')(\gamma_{ic}^\rho \rho_c \rho_1 + \gamma_{i1}^\rho \rho_c \rho_1)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2} + \\ &+ \frac{(d_1'' + d_2'')(\gamma_{i1}^\rho \rho_1 \rho_2 + \gamma_{i2}^\rho \rho_1 \rho_2)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2} = \\ &= \gamma_{i1}^\rho + \gamma_{ic}^\rho + \gamma_{i2}^\rho - \frac{A_1(\gamma_{ic}^\rho + \gamma_{i2}^\rho) + A_2(\gamma_{ic}^\rho + \gamma_{i1}^\rho) + A_3(\gamma_{i1}^\rho + \gamma_{i2}^\rho)}{A_1 + A_2 + A_3} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Відмітимо, що між експериментальними величинами коефіцієнта тензочутливості, які вимірюються через відносну зміну опору чи питомого опору, існує взаємозв'язок:

$$\gamma_i = \gamma_i^\rho + 1 + 2\mu, \quad (1.9)$$

який буде враховуватись при апробації співвідношення (1.9).

РОЗДУЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Застосування методів просвічувальної електронної мікроскопії та електроннографії

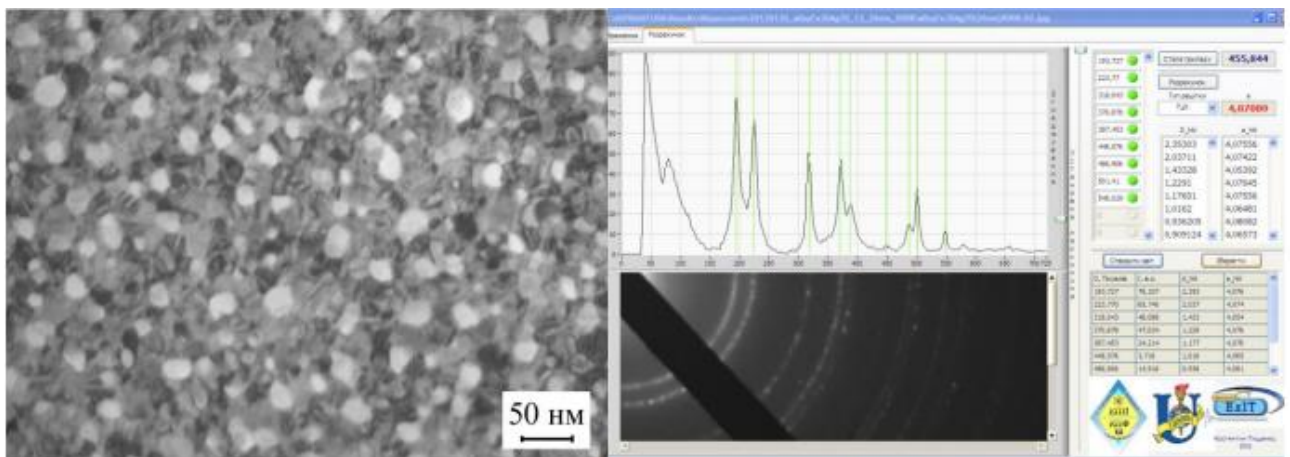
Структура плівкових зразків та їх фазовий склад залежить багатьох факторів різних фізичних факторів: температури, магнітних та електричних полів, деформації тощо. Проведення електроннографічних та електронно-мікроскопічних досліджень відбувалося за допомогою просвічувального електронного мікроскопа з високою розрізнявальною здатністю ПЕМ-125К. Діапазон збільшень в режимі ПЕМ складає величину $(1-200) \cdot 10^3$ разів, точність визначення параметру кристалічної ґратки $\pm 0,0001$ нм. Використовувалися підкладки на основі вуглецевої плівки попередньо сконденсованої на монокристалу NaCl та препаровані на мікроскопічні мідні сіточки [13].

Обробка електроннограм проводилась за методикою детально описаною в роботі [13]. На основі дифракційної картини від тонкої плівки Al (еталоний зразок) товщиною 30-40 нм визначалася стала приладу. Далі на електроннограмах отриманих для досліджуваних зразків проводились вимірювання діаметрів дифракційних кілець, які розраховувались відповідно міжплощинним відстаням (d_{hkl}) та параметрам ґратки (a) за допомогою співвідношень для кристалів кубічної сингонії:

$$C = D_{hkl}^0 \cdot d_{hkl}^0, d_{hkl} = \frac{C}{D_{hkl}}, a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}. \quad (2.1)$$

Мікроструктура та електроннограма від плівкової системи на основі Ag та Fe представлено на рис. 2.1. Аналіз дифракційних картин було використано програмне забезпечення описане у роботах [14-15], зовнішній вигляд вікна програми представлено на рис. 2.1. Програма дає можливість видаляти фон з отриманого спектру, який не є корисною інформацією, проводити згладжування для зниження рівня шуму, пов'язаного з оцифруванням зображення.

Положенням піків на отриманих спектрах для еталонного зразка відбувалося визначення сталої приладу, після чого проводилося безпосереднє розшифрування дифракційних картин згідно вище згаданої методики. Перевагами програмного забезпечення є знаходження на електроннограмах положення кілець малої інтенсивності, точне визначення інтенсивності всіх кілець відносно найяскравішого та можливість аналізу їх ширини.



а

б

Рис. 2.1. Структура (а) та зовнішній вигляд вікна програми аналізу дифракційної картини (б) плівкового зразка $\text{Ag}(\text{Fe})/\text{P}$, де $x = 30$ ат.%, товщиною 30нм, відпаленого до 900К. Адаптовано із роботи [14]

2.2. Методика проведення досліджень ТКО і КТ

За результатами літературного огляду була визначена методика формування зразків і проведення експериментальних досліджень у відповідності із метою роботи, яка полягає у комплексному вивченні електрофізичних (питомий опір, ТКО, коефіцієнта тензочутливості), різних систем та архітектур.

При формуванні плівкових систем, як правило, використовують методи одночасної та пошарової вакуумної конденсації плівок (установка ВУП -5М, рис. 2.2), метод кварцового резонатора для точного контролю товщини;

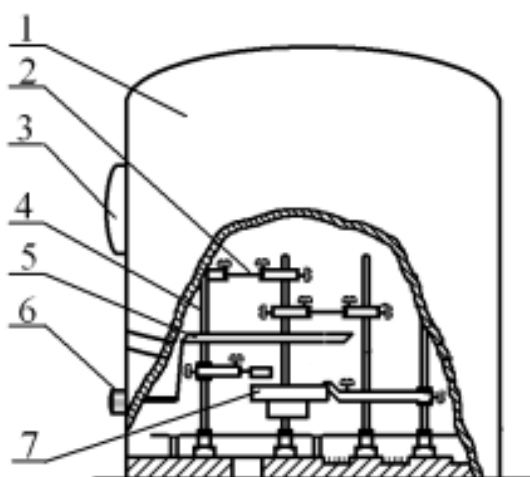


Рис. 2.2. Схема робочої камери ВУП-5М (а): 1 – корпус камери; 2 – випаровувачі; 3 – спостережувальне віконце; 4 – стійка; 5 – захисна маска; 6 – обертова ручка маски; 7 – столик для відпалювання зразків. Адаптовано із роботи [12]

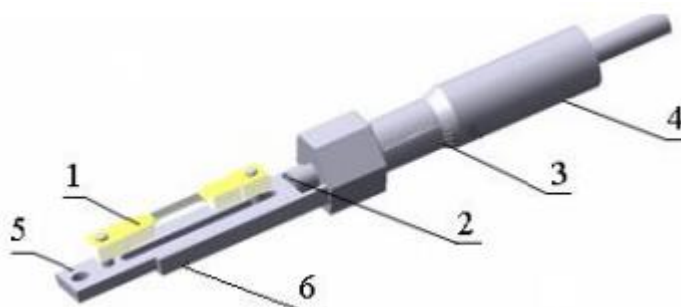


Рис. 2.3. Схема деформаційного пристрою 1 – закріплена підкладка; 2 – рухомий шток; 3 – мікрометрична шкала; 4 – мікрогвинт; 5 – повзун; 6 – поздовжня напрямна повзуна. Адаптовано із роботи [12]

просвічувальна електронна мікроскопія та електроннографія для вивчення процесів фазоутворення і кристалічної структури двокомпонентних плівок; вакуумна термообробка з метою вивчення терморезистивних властивостей; тензометрія для вивчення тензорезистивних властивостей.

Щоб забезпечити кращу візуалізацію та контроль за товщиною осаджуваного матеріалу було використано програмне забезпечення у середовищі програмування Arduino. Концентрація окремих компонент двошарової плівкової системи визначається за співвідношенням (2.2) [16].

$$C_i = \frac{D_i d_i \mu_i^{-1}}{D_1 d_1 \mu_1^{-1} + D_2 d_2 \mu_2^{-1}}, \quad (2.2)$$

де D_i – густина матеріалу; d_i – товщина окремого шару; μ_i – молярна маса елементів.

На рисунку 2.3 наведена схема деформаційного пристрою, який використовувався при дослідженні тензорезистивного ефекту. У цьому випадку використовуються, як правило підкладки із полістиролу, який характеризується пружною деформацією на розтяг у межах заданого діапазону вимірювань (до 2%).

Для визначення коефіцієнта поздовжньої тензочувливості в області пружної і пластичної деформації в інтервалі $\Delta \varepsilon_l$ будуються деформаційні залежності $\Delta R/R_n$ від поздовжньої деформації ε_l для перших двох деформаційних циклів "навантаження-зняття навантаження", детальне дослідження електрофізичних властивостей плівкових матеріалів представлено в роботах [17-20]. Розрахунок величини інтегрального (γ_l) та диференціального (γ_{ld}) коефіцієнта поздовжньої тензочувливості здійснюється за співвідношеннями:

$$\gamma_l = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(\varepsilon_l) - R(0)}{R(0)} \quad \text{і} \quad \gamma_{ld} = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{dR}{d\varepsilon_l}, \quad (2.4)$$

де $R(\varepsilon_l)$ – опір плівки при деформації ε_l ; $R(0)$ – опір недеформованого зразка.

Розрахунок інтегрального (β) і диференціального (β_M) значень ТКО здійснювався за кривою охолодження останнього термостабілізаційного циклу на основі експериментальних залежностей $R(T)$ або $\rho(T)$, відповідно, за співвідношеннями:

$$\beta = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \text{ або } \beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T},$$

$$\beta_M = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{dR}{dT} \text{ або } \beta_M = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}. \quad (2.3)$$

Термообробка зразків проводиться, протягом декількох циклів «нагрівання↔охолодження» у автоматизованому режимі. Вивчення особливостей термо- та тензорезистивних властивостей пліткових матеріалів на основі металів неможливе при відсутності результатів досліджень їх кристалічної структури і фазового складу. На рисунку 2.4 представлені приклади розмірних залежностей для питомого опору і ТКО одношарових плівок Ag та Au, які будуть використані при моделюванні.

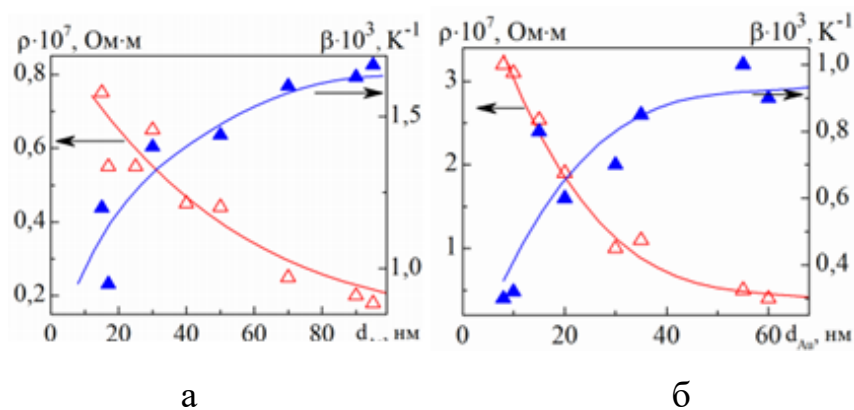


Рис. 2.4. Розмірні залежності величини питомого опору ρ та температурного коефіцієнта опору β для плівок Ag (а) та Au (б). Адаптовано із роботи [12]

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ З РІЗНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ

На основі аналізу алгоритму апробації феноменологічних моделей були проведені розрахунки ТКО і КТ. Відповідно від отриманих даних були побудовані тривимірні графіки залежностей ТКО і КТ від товщин плівок. Для систем із необмеженою розчинністю побудовані тривимірні графіки залежностей ТКО і КТ від концентрації плівок.

3.1. Термічний коефіцієнт опору двошарових плівкових систем

Розрахунки ТКО проводилися за алгоритмами формул згідно феноменологічних моделей для різних архітектур плівкових систем:

- Двокомпонентних систем із необмеженою розчинністю – т.р. Cu(Co); т.р. Fe(Cr), Ni/Co/П.
- Двокомпонентних систем із обмеженою розчинністю – т.р. Ag(Co); т.р. Au(Co); Au/Fe/П; Ag/Cr/П.
- Двошарових систем із збереженням індивідуальності шарів – Cr/Co/П та Mo/Co/П.

В таблицях які наведені нижче представлено дані стосовно ТКО при різних товщинах d , а саме першої β_1, d (10) і останньої β_7, d (40), у дужках вказана товщина в нм.

3.1.1. Двошарові плівкові системи із необмеженою розчинністю

У таблиці 3.1 і на рисунку 3.1 представлені числові та графічні результати моделювання ТКО для плівкових систем із необмеженою розчинністю. У цьому випадку були використані літературні дані [1, 9, 12].

Таблиця 3.1

Результати розрахунку ТКО (β_c) двошарових плівкових систем

т.р. Cu(Co); т.р. Fe(Cr)

т.р. Cu(Co)	$\beta_{c_1}, d(10)$	0,18	0,28	0,37	0,46	0,56	0,65	0,74
	$\beta_{c_7}, d(40)$	0,05	0,07	0,1	0,12	0,15	0,17	0,19
т.р. Fe(Cr)	$\beta_{c_1}, d(10)$	0,53	0,79	1	1,32	1,59	1,85	2,12
	$\beta_{c_7}, d(40)$	0,22	0,33	0,45	0,56	0,67	0,78	0,9
Ni/Co/П	$\beta_{c_1}, d(10)$	0,84	1,26	1,68	2,1	2,52	2,94	3,37
	$\beta_{c_7}, d(40)$	0,3	0,45	0,6	0,75	0,89	1,04	1,19
d, нм		10	15	20	25	30	35	40

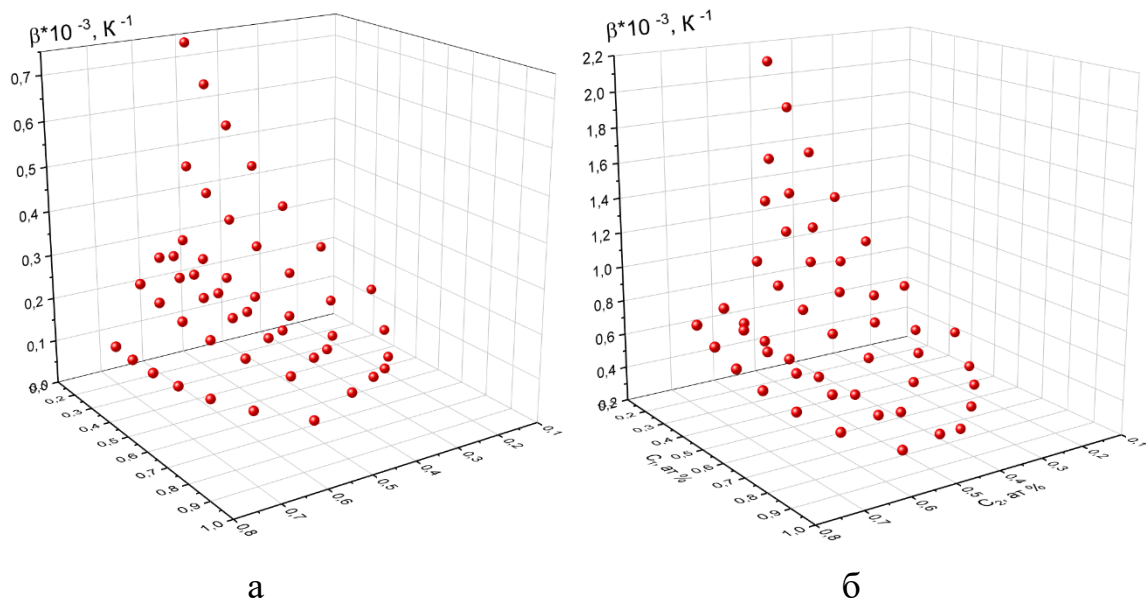


Рис. 3.1. Тривимірні графіки залежності ТКО від концентрації плівок в системи т.р. Cu(Co) (а); т.р. Fe(Cr) (б).

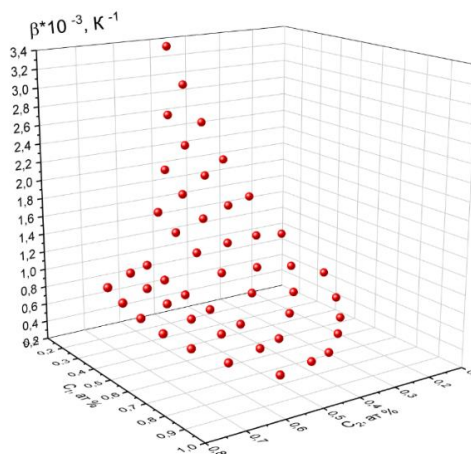


Рис. 3.2. Тривимірний графік залежності ТКО від товщин плівок в систем Ni/Co/П.

3.1.2. Двошарові плівкові системи із обмеженою розчинністю

У таблиці 3.2 і рисунку 3.2 представлені результати моделювання розмірних залежностей для ТКО плівкових систем із обмеженою розчинністю компонент. Для цього були використані результати робіт [1, 2].

Таблиця 3.2

Результати розрахунків ТКО двошарових плівкових систем т.р. Ag(Co); т.р. Au(Co); Au/Fe/П; Ag/Cr/П.

т.р. Ag(Co)	$\beta_1, d (10)$	4,47	6,7	8,94	11,17	13,4	15,64	17,88
	$\beta_7, d (40)$	1,27	1,9	2,53	3,17	3,8	4,43	5,07
т.р. Au(Co)	$\beta_1, d (10)$	1,87	2,8	3,75	4,68	5,62	6,56	7,5
	$\beta_7, d (40)$	0,83	1,24	1,66	2,07	2,49	2,9	3,32
Au/Fe/П	$\beta_1, d (10)$	3,86	5,79	7,72	9,65	11,58	13,51	15,44
	$\beta_7, d (40)$	1	1,52	2,02	2,53	3,03	3,54	4,04
Ag/Cr/П	$\beta_1, d (10)$	4,88	7,32	9,76	12,2	14,64	17,08	19,52
	$\beta_7, d (40)$	1,38	2,07	2,77	3,46	4,15	4,84	5,53
d, нм		10	15	20	25	30	35	40

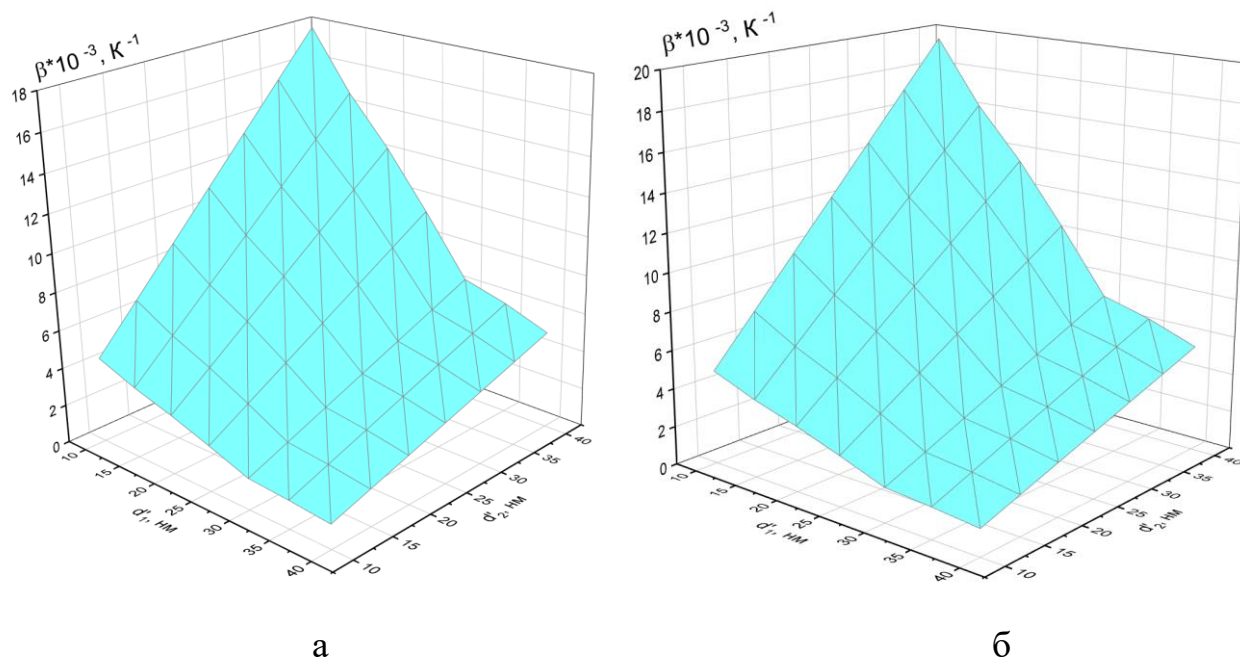


Рис. 3.3. Тривимірні графіки залежності ТКО від товщин плівок в систем т.р. Ag(Co) (а) Ag/Cr/П (б) одночасне заростання товщин.

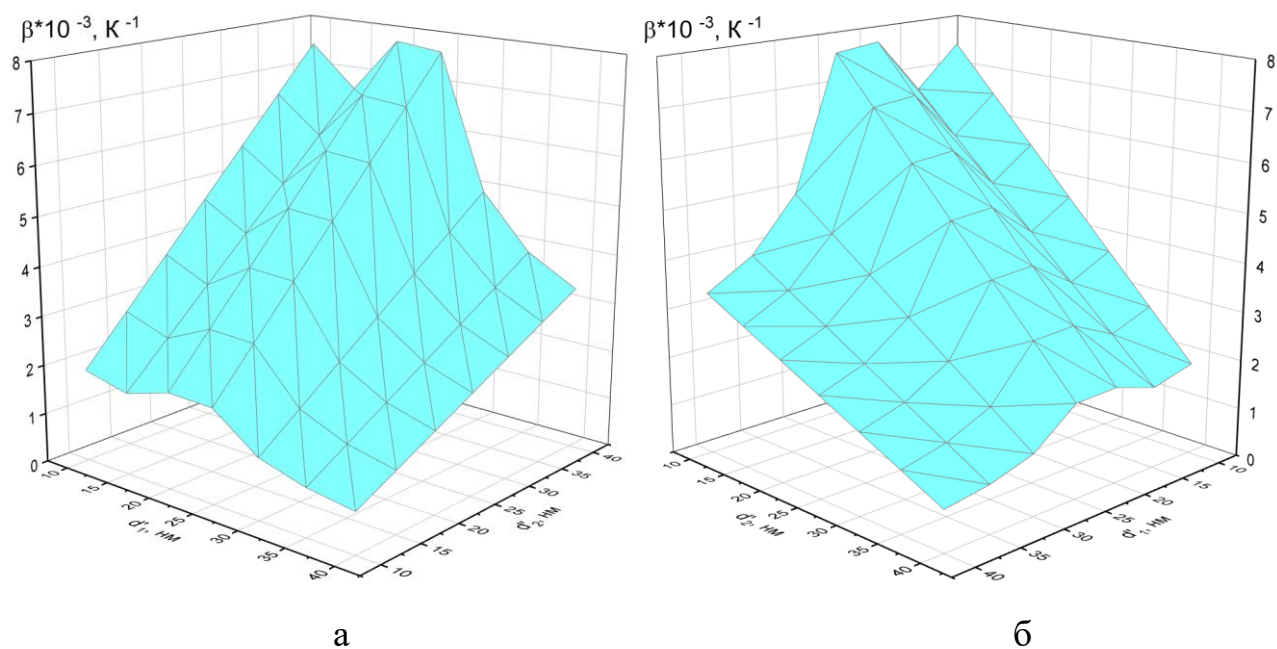


Рис. 3.4. Тривимірні графіки залежності ТКО від товщин плівок в систем т.р. Au(Co) одночасне заростання товщин (а) d_1' зростає, d_2' зменшується (б).

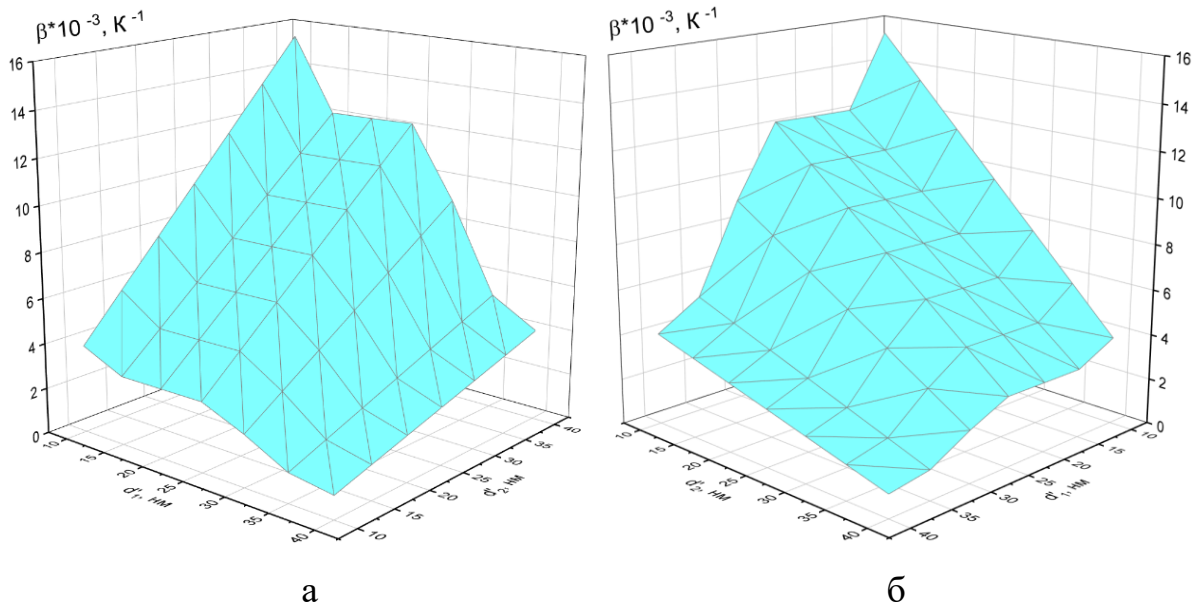


Рис. 3.5. Тривимірні графіки залежності ТКО від товщин плівок в систем Au/Fe/П одночасне заростання товщин (а) d_1' зростає, d_2' зменшується (б).

Оскільки з точки зору фазоутворення і електрофізичних властивостей плівкова система на основі Au і Fe повністю аналогічна системі на основі Au і Co (і в тому і другому випадку при надлишковій концентрації феромагнітної компоненти в них стабілізується плівковий гранульований стан), то було здійснено додатково моделювання ТКО для т.р. Au (Fe), що представлено на рисунку 3.5.

Слід відмітити, що розрахунок та моделювання залежності ТКО від товщин для систем із обмеженою розчинністю, було взято два випадки, (а) одночасне заростання обох товщин в більшості випадків графіки систем схожі між собою, але є окремі аномальні ділянки в таких системах як: Au/Fe/П; т.р. Au(Co). У випадку (б) коли товщина d_1' зростає, товщина d_2' зменшується, графік віддзеркалюється від першого випадка (а) і мінімальне значення ТКО фіксується при максимальних товщинах, що є не коректним з точки зору фізичних процесів в плівкових матеріалах. Дані проблеми можуть бути пов'язані з недоліками феноменологічних моделей або деякими факторами при одержанні систем.

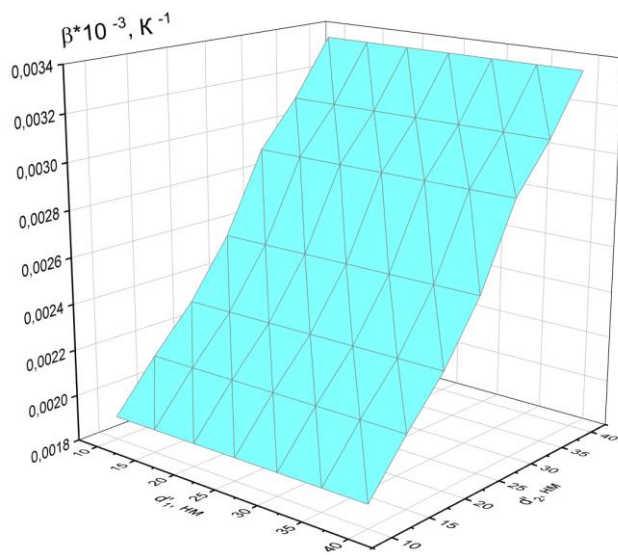
3.1.3. Двошарові плівкові системи із збереженням індивідуальності шарів

Слід зазначити особливість даних систем, а саме при розрахунку β при різних товщинах значення зміни КТ мінімальні. Оскільки в системах присутні тугоплавкий метал (Mo). Тому після округлення чисел значення $\beta_1 - \beta_7$ майже не змінні.

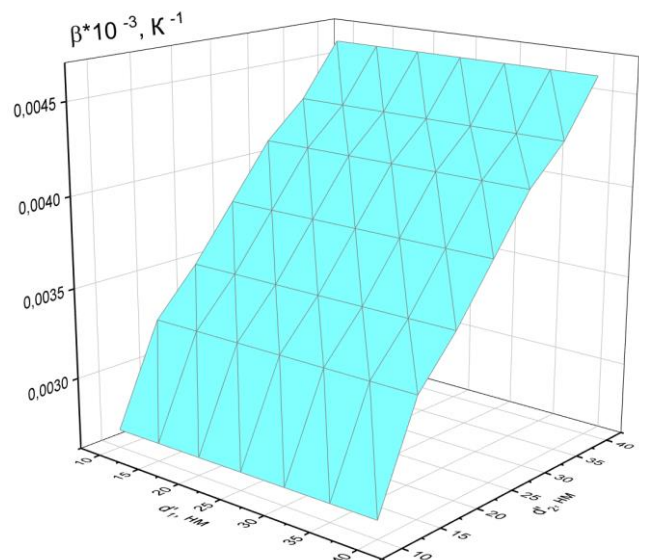
Таблиця 3.3

Результати розрахунків ТКО двошарових плівкових систем Cr/Co/П; Mo/Co/П

Cr/Co/П	$\beta_1 - \beta_7$	0,0019	0,00211	0,0023	0,00255	0,0029	0,0031	0,0033
Mo/Co/П	$\beta_1 - \beta_7$	0,0027	0,00325	0,0035	0,0038	0,0041	0,0043	0,0046
d, нм		10	15	20	25	30	35	40



а



б

Рис. 3.6. Тривимірні графіки залежності ТКО від товщин плівок в систем Cr/Co/П (а); Mo/Co/П (б)

3.1. Коефіцієнт тензочутливості двошарових плівкових систем

Розрахунки КТ проводилися за алгоритмами формул згідно феноменологічних моделей для різних архітектурних систем:

- Двошарових систем із необмеженою розчинністю т.р. Fe(Cr) та Ni/Co/П.
- Двошарових систем із обмеженою розчинністю т.р. Ag(Co); Ag/Cr/П; Ag/Fe/П.
- Двошарових систем із збереженням індивідуальності шарів Cr/Co/П; Mo/Co/П.

В таблицях, які наведені нижче, представлено дані стосовно ТКО при різних товщинах d , а саме першої $\gamma_{11}^{\rho}, d (10)$ і останньої $\gamma_{17}^{\rho}, d (40)$.

3.1.1. Двошарові плівкові системи із необмеженою розчинністю

У таблиці 3.4 і на рисунку 3.4 наведені результати моделювання тензорезистивних властивостей для плівкової системи на основі атомів Fe і Cr, які мають необмежену розчинність у плівковому стані [1], хоча в масивних зразках має місце обмежена розчинність атомів.

Таблиця 3.4

Результати розрахунку КТ двохкомпонентної плівкової системи т.р. Fe(Cr); Ni/Co/П

т.р. Fe(Cr)	$\gamma_{11}^{\rho}, d (10)$	8,73	8,99	9,26	9,52	9,79	10	10,32
	$\gamma_{17}^{\rho}, d (40)$	7,42	7,53	7,64	7,76	7,87	7,98	8,09
Ni/Co/П	$\gamma_{11}^{\rho}, d (10)$	8,34	8,76	9,18	9,6	10,02	10,44	10,86
	$\gamma_{17}^{\rho}, d (40)$	5,96	6,11	6,26	6,41	6,56	6,71	6,86
d, нм		10	15	20	25	30	35	40

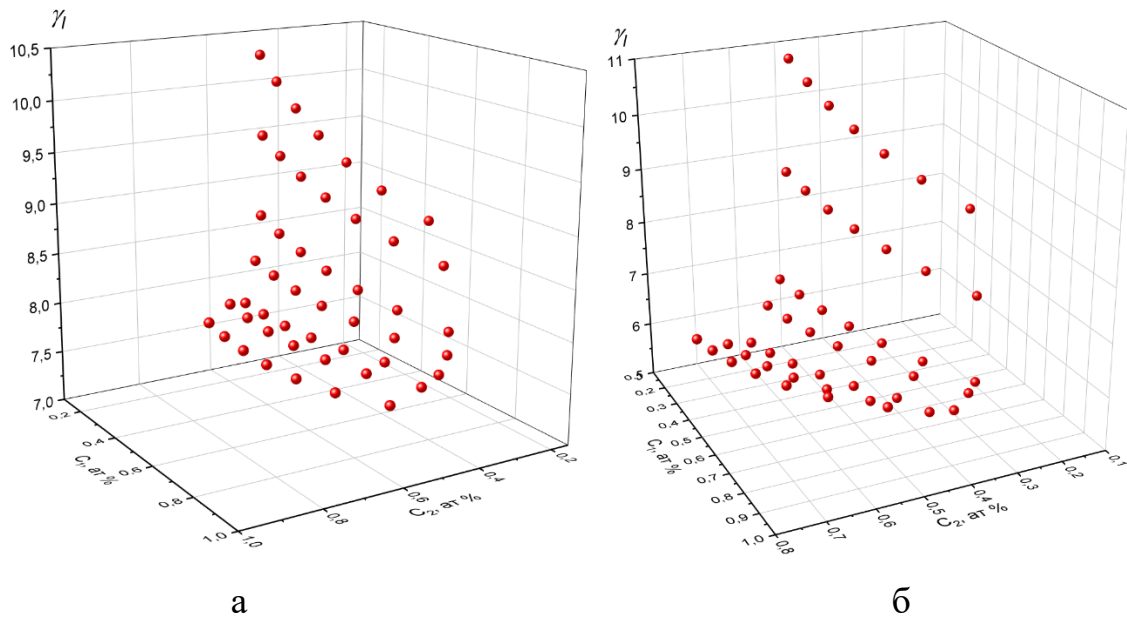


Рис. 3.7. Тривимірні графіки залежності КТ від концентрації плівок в системі т.р. Fe(Cr) (а); Ni/Co/П (б)

3.1.2. Двошарові плівкові системи із обмеженою розчинністю

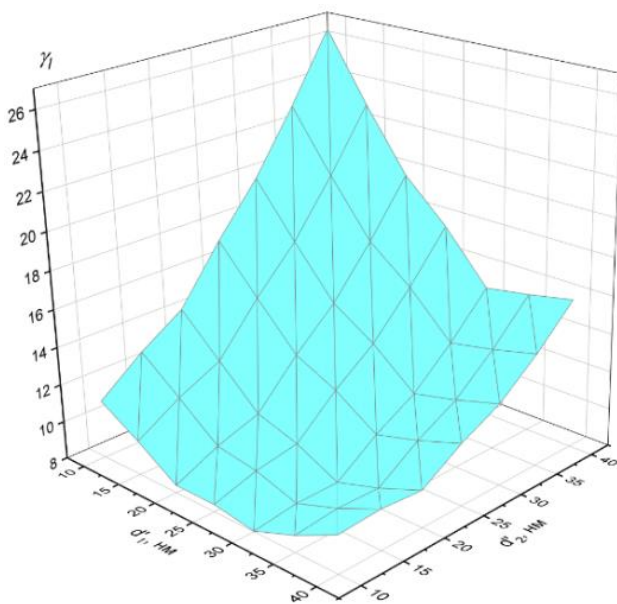
Не дивлячись на те, що можна запропонувати велику кількість плівкових систем із обмеженою розчинністю атомів, не всі вони представляють однаковий науковий чи практичний інтерес. З такої точки зору великий інтерес представляють системи Ag і Co та Ag і Fe, оскільки в них реалізується гранульований стан, що спричиняє спін-залежне розсіювання електронів (СЗРЕ) провідності. Зрозуміло, що феноменологічні моделі, які використовуються у даній роботі, не можуть претендувати на врахування вказаного механізму розсіювання електронів. Однак, якісно внесок СЗРЕ у загальну величину КТ можна оцінити, якщо порівняти експериментальні і змодельовані у цій роботі результати.

Стосовно плівкової системи на основі Ag і Cr, то вона до цих пір залишається маловивченою і, скоріше за все, в ній формуються лише обмежені т.р. без будь-яких елементів гранульованого стану, оскільки елемент Cr може знаходитись в парамагнітному або антиферомагнітному стані.

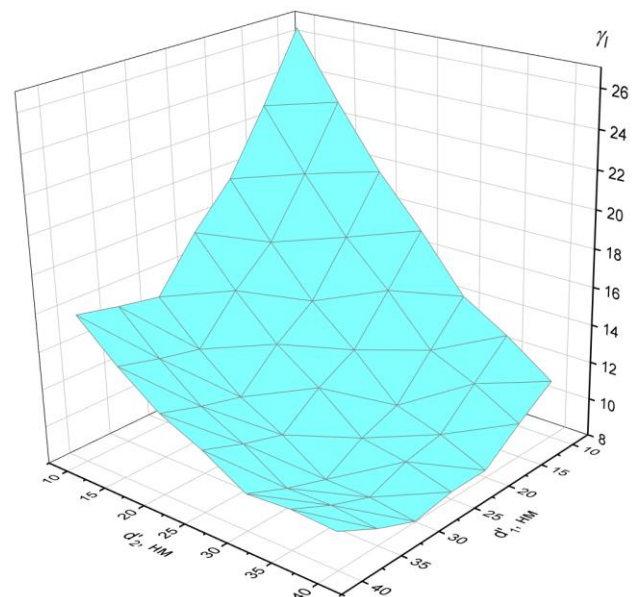
Таблиця 3.5

**Результати розрахунку КТ двошарової плівкової системи т.р. Ag(Co);
Ag/Cr/П; Ag/Fe/П**

Ag(Co)	$\gamma_{11}^p, d(10)$	11	12,8	14,23	17,17	19,8	23	26,57
	$\gamma_{17}^p, d(40)$	9,96	10	9,93	11,26	12,29	13,93	15,86
Ag/Cr/П	$\gamma_{11}^p, d(10)$	15,88	18	19,9	22,7	25,42	28,6	31,92
	$\gamma_{17}^p, d(40)$	13,78	14,15	14,3	15,35	16,32	17,76	19,33
Ag/Fe/П	$\gamma_{11}^p, d(10)$	17,38	19,28	20,67	23,43	26,11	29,28	32,54
	$\gamma_{17}^p, d(40)$	14,75	14,93	14,6	15,66	16,61	18,07	19,62
d, нм		10	15	20	25	30	35	40



а



б

Рис. 3.8. Тривимірний графік залежності КТ від товщин плівок в систем т.р. Ag(Co) одночасне заростання товщин (а) d_1 зростає, d_2 зменшується (б)

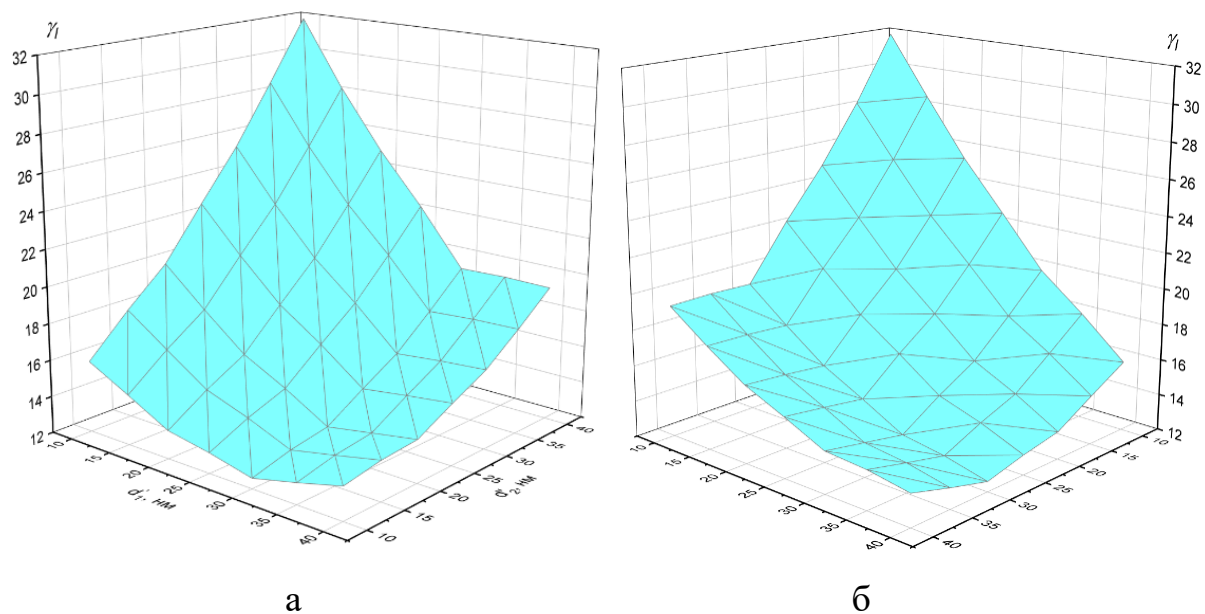


Рис. 3.9. Тривимірні діаграми для КТ плівкових систем Ag/Cr/П одночасне заростання товщин (а) d_1' зростає, d_2' зменшується (б)

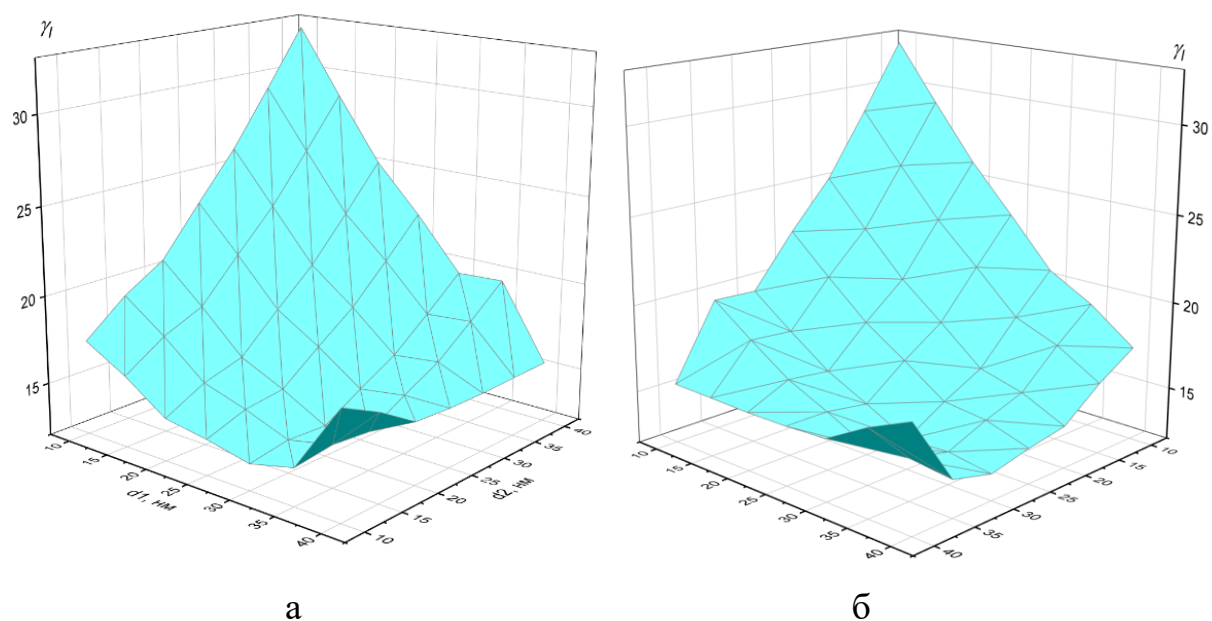


Рис. 3.10. Тривимірні діаграми для КТ плівкових систем Ag/Fe/П одночасне заростання товщин (а) d_1' зростає, d_2' зменшується (б)

3.1.3. Двошарові плівкові системи із збереженням індивідуальності шарів

Слід зазначити особливість даних систем, а саме при розрахунку γ_i^p при різних товщинах значення зміни КТ мінімальні. Оскільки в системах присутні тугоплавкий метал (Mo). Тому після округлення чисел значення $\gamma_{11}^p - \gamma_{17}^p$ майже не змінні.

Таблиця 3.6

Результати розрахунків КТ двошарових плівкових систем Cr/Co/П і Mo/Co/П

Cr/Co/П	$\gamma_{11}^p - \gamma_{17}^p$	5,2	4,98	4,65	4,9	4,98	5,13	5,5
Mo/Co/П	$\gamma_{11}^p - \gamma_{17}^p$	6,5	5,3	4,9	5,1	5,1	5,29	5,67
d, нм		10	15	20	25	30	35	40

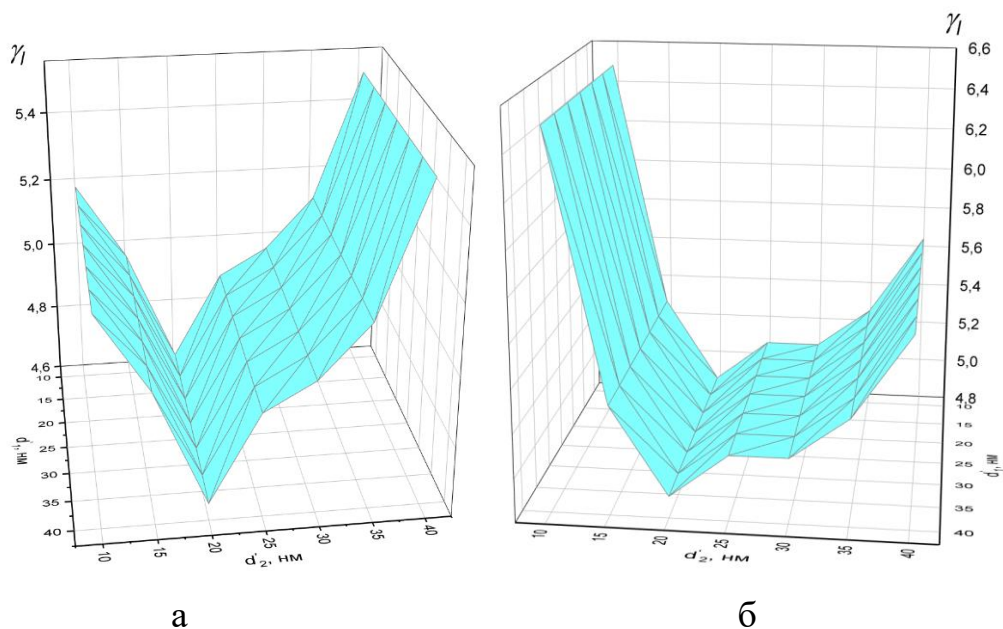


Рис. 3.11. Тривимірні графіки залежності(КТ) для плівок Cr/Co/П (а) та Mo/Co/П (б)

Слід зазначити, що розрахунок та моделювання залежності ТКО від товщин для систем із обмеженою розчинністю, було взято два випадки, (а) одночасне заростання обох товщин в більшості випадків графіки систем схожі між собою, але є окремі аномальні ділянки в такій системі як: Ag/Fe/П. У випадку (б) коли товщина d_1' зростає, товщина d_2' зменшується, Результати наступні при варіанті (б) значення КТ при зростанні товщин КТ загалом зменшується, що є не коректним з точки зору фізичних процесів в плівкових матеріалах.

Аналіз отриманих тривимірних діаграм для ТКО вказує на те, що його величина має такий же порядок як при експериментальних вимірюваннях.

Поряд з цим розмірні залежності тільки частково узгоджуються із загальнотеоретичними уявленнями. Мова іде про те, що ТКО збільшується при фіксованій товщині d_1' і збільшенні d_2' , але нефізичний результат має місце при $d_1' = \text{const}$ при збільшенні d_1' . У випадку КТ, то його зміна відбувається у відповідності із теоретичними уявленнями, але числове значення КТ до 5-ти разів завищений. Крім того ні в одному випадку не було отримано своєрідне граничне значення $\gamma_1 = 1,7$ одиниць. Причина цього може бути пов'язана із недоліками методичного підходу при моделюванні.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Аналіз літературних даних вказує на те, що експериментальне дослідження електрофізичних властивостей досить складний і наукоємкий процес; це означає, що моделювання цих властивостей може дозволити зменшити об'єм експериментальних досліджень і, до великої міри, має економічну доцільність.

2. Накопичені експериментальні і теоретичні результати у своїй сукупності дозволяють провести моделювання ТКО і КТ для плівкових систем різної архітектури:

- т.р. із необмеженою розчинністю компонент (т.р. Cu(Co); т.р. Fe(Cr), Ni/Co/П);
- двошарові системи із обмеженою розчинністю компонент (т.р. Ag(Co); т.р. Au(Co); Au/Fe/П; Ag/Cr/П);
- двошарові системи типу «біпластина» (Cr/Co/П та Mo/Co/П).

3. Результати моделювання ТКО на основі феноменологічних моделей кількісно узгоджуються із експериментальними даними, але незадовільно враховується розмірний ефект ТКО. Величини ТКО (β) одношарових плівок максимальні значення становлять: Cu ($\beta = 2,3 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Co ($\beta = 1,8 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Cr ($\beta = 1,55 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Ni ($\beta = 2,4 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Ag ($\beta = 1,7 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Au ($\beta = 0,9 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Fe ($\beta = 1,8 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$), Mo ($\beta = 2,8 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$).

4. При моделюванні розмірних залежностей електрофізичних властивостей двошарових систем встановлено, що максимальні розрахункові значення ТКО мають величини:

- для систем із обмеженою розчинністю компонент т.р. Ag(Co) $\beta = 5,07 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, т.р. Au(Co) $\beta = 3,32 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, Au/Fe/П $\beta = 4,04 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, Ag/Cr/П $\beta = 5,53 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$;

- для двошарових систем із необмеженою розчинністю: т.р. Cu(Co) $\beta = 0,74 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, т.р. Fe(Cr) $\beta = 2,12 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, Ni(Co) $\beta = 3,37 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$;
- для двошарових плівкових систем типу «біпластина»: Cr/Co/П $\beta = 1,2 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$, Mo/Co/П $\beta = 0,46 \cdot 10^{-3}, K^{-1}$.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних дають завищені в декілька разів величини ТКО.

5. Установлено, що при моделюванні розмірних залежностей КТ їх характер відповідає загальноприйнятим уявленням, але абсолютна величина КТ дещо завищена у порівнянні із експериментальними результатами. Визначені максимальні значення коефіцієнтів тензочутливості для одношарових плівок: Co ($\gamma_l = 2$), Cr ($\gamma_l = 3,7$), Ni ($\gamma_l = 6$), Ag ($\gamma_l = 3,4$), Fe ($\gamma_l = 4,5$), Mo ($\gamma_l = 5$);

6. У результаті моделювання розмірних залежностей КТ для двошарових систем показано, що максимальні розрахункові значення КТ такі:

- для систем із обмеженою розчинністю компонент: т.р. Ag(Co) ($\gamma_l = 15,86$), Ag/Cr/П ($\gamma_l = 19,33$), Ag/Fe/П ($\gamma_l = 19,62$);
- для двошарових систем із необмеженою розчинністю максимальні розрахункові значення КТ: т.р. Fe(Cr) ($\gamma_l = 10,32$) та Ni/Co/П ($\gamma_l = 10,86$);
- двошарові плівкові системи типу «біпластина» мають максимальні значення КТ: Cr/Co/П ($\gamma_l = 5,5$), Mo/Co/П ($\gamma_l = 6,5$).

7. У процесі моделювання встановлено, що сама побудова трьох вимірних залежностей залежить від вихідних розрахункових даних для одношарових плівок, що вносить певну похибку в розрахункові результати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія / Л.В.Однодворець, С.І. Проценко, А.М. Черноус; за заг. ред. проф. І.Ю. Проценка. – Суми: СумДУ, 2011. – 202 с.
2. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем (огляд) / С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д.В. Великодний, І.М. Пазуха, Л.В. Однодворець, І.Ю. Проценко, О.В. Синашенко // Успехи физ. мет. – 2007. – Т.8, №4. – С. 247 – 278.
3. Protsenko I.Y., Odnodvoretz L.V., Tyschenko K., Cheshko I.V., Shumakova N.I., Bondariev V. Strain effect in film materials Ni_xFe_{1-x}/S // Vacuum. – 2019. – V. 165. – P. 113-117.
4. Structural-Phase State and Electrical Conductivity of Film Structures Based on FCC Phase of Fe-Co and Cu Alloy / D.I. Saltykov, Yu.O. Shkurdoda, I.Yu. Protsenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2018. – V. 10. - № 3.
5. Dugdale J.S. The Electrical Properties of Metals and Alloys // Dover Publication. – 2016. – P.11 – 19.
6. Oliva A.I., Lugo J.M., Gurubel-Gonzalez R.A., Centeno R.J., Corona J.E., Avilés F. Temperature coefficient of resistance and thermal expansion coefficient of 10-nm thin gold films // Thin Solid Films. – 2017. – V. 623. – P. 84-89.
7. Physical Properties of Film Alloys Based on Ferromagnetic and Noble Metals. II. Film Materials Based on Co and Ag or Au // I.V. Cheshko, L.V. Odnodvoretz, I.Yu. Protsenko, et al. // J. Nano- Electron. Phys. – 2016. – V.8№4(1) – P.04028-1 – 04028-7.
8. Electrophysical properties of granular film alloys / Koltunowicz T.N., Bondariev V., Odnodvoretz L.V., Protsenko S.I., Shumakova M., Tkach O.P. // J. Vacuum – 2019. – V. 164. – P. 165-169.
9. Формування метастабільних твердих розчинів у плівкових системах на основі Co і Cu, Ag та Au / І.Ю. Проценко, І.В. Чешко // Металлофиз. новейшие технол. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 962–967.

10. Фізичні властивості плівкових матеріалів мікро- і наноелектроніки : навч. посіб. : у 2-х ч. Ч.2 / І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко, І. В. Чешко ; За заг. ред. І.Ю. Проценка. – Суми : СумДУ, 2014. – 213 с.

11. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т.1 / Под ред. Н.П. Лякишева. – Москва: Машиностроение, 1996. – 1025 с.

12. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / Пилипенко Олександр Валерійович.– Суми, 2019.– 9–14 с.

13. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки: лабораторні і практичні заняття [навч. посібник] / І.Ю. Проценко, Л.В. Однорець. – Суми: СумДУ, 2011. – 232 с.

14. Тищенко К.В. Програмне забезпечення для розшифрування картин дифракції за спектром інтенсивності // Матеріали II наукового семінару «Сучасні проблеми наноелектроніки», Суми: СумДПУ. – 2011. – С. 60 – 62.

15. Комплекс для автоматического исследования тензорезистивных свойств тонкопленочных структур / К.В. Тищенко, Д.В. Великодний, С.И. Проценко // Сборник трудов девятой международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». – Москва: РУДН. – 2010. – С. 304 – 306.

16. Васюхно М.В., Проценко І.Ю. Розрахунок загальної концентрації атомів у плівкових системах складної архітектури / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка ФEE-2020». – Суми: СумДУ. – С.67 – 68.

17. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівок сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ / О. В. Пилипенко, І. М. Пазуха, А. С. Овруцький, Л. В. Однорець // Ж. нано- електрон. фіз. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 03022-1–03022-45.

18. Odnodvoretz L.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M., Shumakova M.O., Tkach O.P. Physical properties of film alloys based on ferromagnetic and noble metals

(Review). I. Film materials based on Fe and Ag or Au // J. Nano- Electron. Phys. – 2016. – V.8. –№ 4(1). – P.03034.

19. Pylypenko O.V., Odnodvoretz L.V., Shumakova M.O., Protsenko I.Yu. The concentration anomaly of strain coefficient binary film system based on Au and Fe atoms // PAST. – 2016. – V48, №1. – P.131-135.

20. Hrychanovs'ka O.A., Rylova A.K., Hrychanovs'ka T.M., Shumakova N.I. Electrophysical properties of granular film alloys // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – V.11, №6. – P. 06007-1 – 06007-4.