

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

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВОК НА
ОСНОВІ ПЕРМАЛОЮ ТА СРІБЛА**

Магістрант гр. ЕПм-82

М.С. Макоедов

Науковий керівник:

канд. фіз.-мат. наук, доцент

І.М. Пазуха

Суми – 2019

РЕФЕРАТ

Мета роботи полягала у дослідженні електрофізичних властивостей (питомий опір та термічний коефіцієнт опору) нанорозмірних плівкових структур на основі феромагнітного сплаву пермалою та немагнітного матеріалу Ag, одержаних методом одночасної електронно-променевої конденсації компонент у вакуумі залежно від загальної товщини системи при фіксованій концентрації.

При виконанні роботи для формування зразків у вакуумній камері ВУП-5М був використаний метод електронно-променевого випарування. Температурні залежності питомого опору отримувались при використанні метода резистометрії. Для контролю товщини плівок в процесі напилення застосовувався метод кварцового резонатора. Для обробки інформації було застосовано програмний продукт Origin Pro 8.5.1.

Експериментальні результати дослідження залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ нанорозмірних плівкових зразків на основі пермалою та срібла показали, що збільшення товщини плівки з 20 до 60 нм призводить до зменшення питомого опору з $8,04 \cdot 10^{-7}$ до $1,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. та відповідного зростання величини ТКО з $1,41 \cdot 10^{-3}$ до $2,74 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Робота викладена на 30 сторінках, у тому числі включає 15 рисунків, 1 таблицю, список цитованої літератури із 18 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ОДНОЧАСНА КОНДЕНСАЦІЯ, ПИТОМИЙ ОПІР, ТЕРМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ, РОЗМІРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ.

ЗМІСТ

С.

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ	6
1.1 Особливості електрофізичних властивостей одношарових плівок пермалою та срібла.....	6
1.2 Вплив концентрації компонент на величину питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла	10
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ЗРАЗКІВ І ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
2.1. Методика одержання нанорозмірних плівкових систем на основі пермалою та срібла.....	16
2.2. Методика дослідження електрофізичних властивостей	19
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	21
3.1. Температурні залежності питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла.....	21
3.2 Розмірна залежність питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла.....	28
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

Нанорозмірні плівкові системи на основі феромагнітних сплавів знайшли практичне застосування при виготовленні багатошарових магнітних структур (мультишари, багатошарові структури загального типу, різні модифікації спіні клапанів, тунельні переходи тощо) [1–3]. Комбінуючи феромагнітні сплави (FeNi, FeCo та інші) та наприклад благородні метали (Ag, Au, Cu) можна реалізувати різні види магніторезистивних ефектів (анізотропний, тунельний, гігантський). У зв'язку з проявом даних ефектів нанорозмірні плівкові системи знаходяться у полі зору дослідників, а саме вивчаються особливості їх магнітних, магніторезистивних властивостей при зміні товщини магнітних і немагнітних шарів та порядку їх чергування, заміни пошарової конденсації на одночасну, при зміні діапазону магнітних полів та температур [4-6]. При цьому базовими параметрами, що впливають на магнітні, механічні, електронні, магніто-оптичні та інші властивості залишаються такі параметри як питомий опір та термічний коефіцієнт опору. Саме ТКО і характеризує ступінь чутливості нанорозмірних магнітних систем до зміни температури. У випадку систем сформованих методом одночасної конденсації компонент на величину питомого опору і ТКО будуть впливати як концентраційні так і розмірні ефекти. Вплив концентраційного ефекту у випадку нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла був досліджений у роботі [7], в той час як розмірний ефект був досліджений лише епізодично [8].

У зв'язку з цим мета даної роботи полягає у дослідженні електрофізичних властивостей (питомий опір та термічний коефіцієнт опору) нанорозмірних плівкових структур на основі феромагнітного сплаву пермалою $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ та немагнітного матеріалу Ag, одержаних методом одночасної електронно-променевої конденсації компонент у вакуумі залежно від загальної товщини системи при фіксованій концентрації.

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ

1.1 Особливості електрофізичних властивостей одношарових плівок пермалою та срібла

Для одношарових плівок Fe, $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$, Ag та Au згідно [9, 10, 11], на першому циклі нагрівання видно, що при зростанні температури відбувається характерне зменшення питомого опору, що можна пояснити як заліковування дефектів кристалічної будови. Наступним кроком при охолодженні та майбутніх циклах термообробки залежності $\rho(T)$ мають типовий для металів характер (при збільшенні температури відбувається зростання величини питомого опору). Від товщини плівкових зразків залежить не тільки величина ρ але й форма температурної залежності питомого опору. Отже для відносно тонких зразків, товщиною 20 нм [11], спостерігається стрімке зменшення величини ρ при першому циклі нагрівання (активізація процесу заліковування дефектів) у температурному інтервалі (450 – 500) К, в той час як для відносно товстих зразків ($d = 60-90$ нм) – в інтервалі $T = (500-600)$ К. Основною відмінністю є те, що у величині питомого опору, яка для феромагнітних матеріалів за кімнатної температури порядку ($10^{-6} - 10^{-7}$) Ом·м, в той час як для благородних металів $\rho \sim 10^{-8}$ Ом·м. Таким чином, змінюючи концентрацію магнітної і немагнітної компоненти під час формування функціональних матеріалів методом одночасної конденсації, можна змінювати величину питомого опору в широких межах. Взагалі, в літературі відома невелика кількість робіт, присвячених вивченню температурної залежності електричного опору функціональних матеріалів на основі феромагнітних матеріалів Fe або $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}$ та благородних металів Ag та Au. Прикладом таких досліджень можуть бути роботи [12 – 13].

Для більш коректного аналізу впливу інших компонент на терморезистивні властивості досліджувальних систем на основі феромагнітних і благородних металів у роботі був проведений аналіз температурних

особливостей та залежностей питомого опору і ТКО для одношарових плівок Fe, Ru та Ag.

Для того щоб визначити оптимальні граничні температури відпалювання плівкових зразків різної товщини плівок (Ru, Ag), в яких проходить повна термостабілізація електрофізичних властивостей, а фазовий склад дорівнює фазовому складу масивних зразків (Ru, Ag), термообробка проводилася з різними граничними температурами. Типові температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору для плівок пермалою, представлені на рисунку 1.1 та мають наступні особливості.

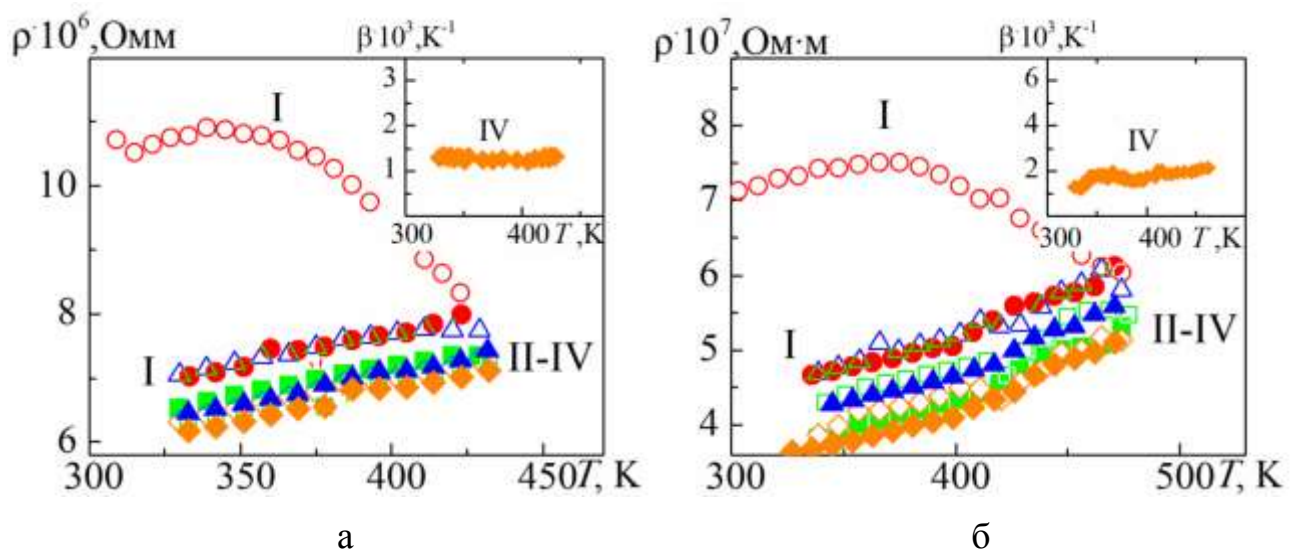


Рисунок 1.1 – Температурні залежності питомого опору та ТКО (на вставках) для плівок сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$, товщиною 13 (а) та 22 нм (б). Римськими цифрами позначені номери циклів «нагрівання↔охолодження» [11]

Для сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$, а також і для його інших складових компонент у чистому вигляді (див., наприклад, роботи [8, 14]), зі зростанням температури на першому циклі нагрівання відбувається не значне зменшення питомого опору, що можна пояснити як заліковування дефектів кристалічної будови. Також на залежностях $\rho(T)$ можна визначити дві ділянки з різною тенденцією до зміни опору. На першій ділянці спостерігається невелике зростання величини ρ з

ростом температури, а на другій ділянці можна спостерігати різкий спад при зростанні температури, що завершується малим зростанням опору. Слід зазначити, що при незначному збільшенні товщини зразків відбувається збільшення температурного діапазону першої ділянки та зміна форми залежності першого циклу нагрівання на другій ділянці від стрімкої до більш пологої. Одна з можливих причин може бути те, що при збільшенні товщини зразків відбувається поступове збільшення температурного діапазону, де можна спостерігати процес заліковування дефектів. Також можна відмітити, що криві охолодження першого та інших наступних циклів ідуть паралельно одна одній, а у нашому випадку для зразка $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{П}$ співпадають. Дана поведінка характерна і для складових компонент сплаву [1, 7]. Величина питомого опору при $d = (10-45)$ нм має порядок $\rho \sim (10^{-6} - 10^{-7})$ Ом·м, що є характерним для плівок пермалою [15]. На рисунку 1.2 представлені температурні залежності ТКО для II-IV циклів охолодження на прикладі зразка $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(22)/\text{П}$.

Для одношарової плівки Ag (згідно з роботою [11]), проявляється немонотонний характер залежності $\rho(T)$ в першому циклі нагрівання, що

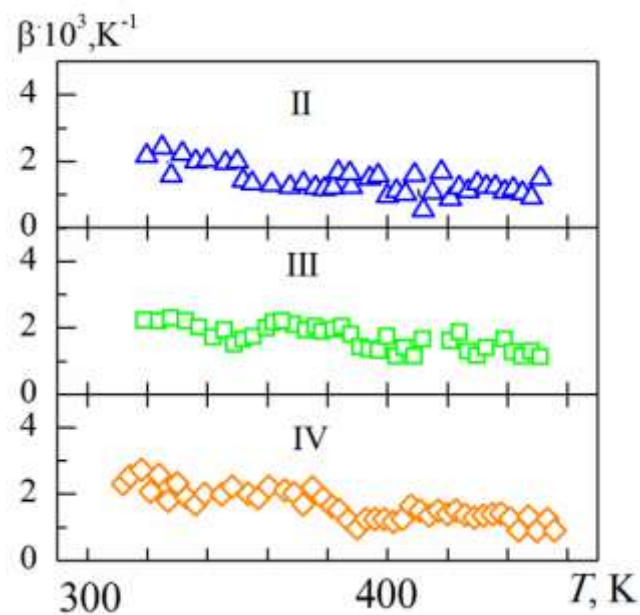


Рисунок 1.2 – Температурні залежності ТКО плівки $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (22нм) / П для II-IV циклів обробки [11]

пов'язаний з процесами заліковування дефектів. Типові температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору представлені на рисунку 1.3.

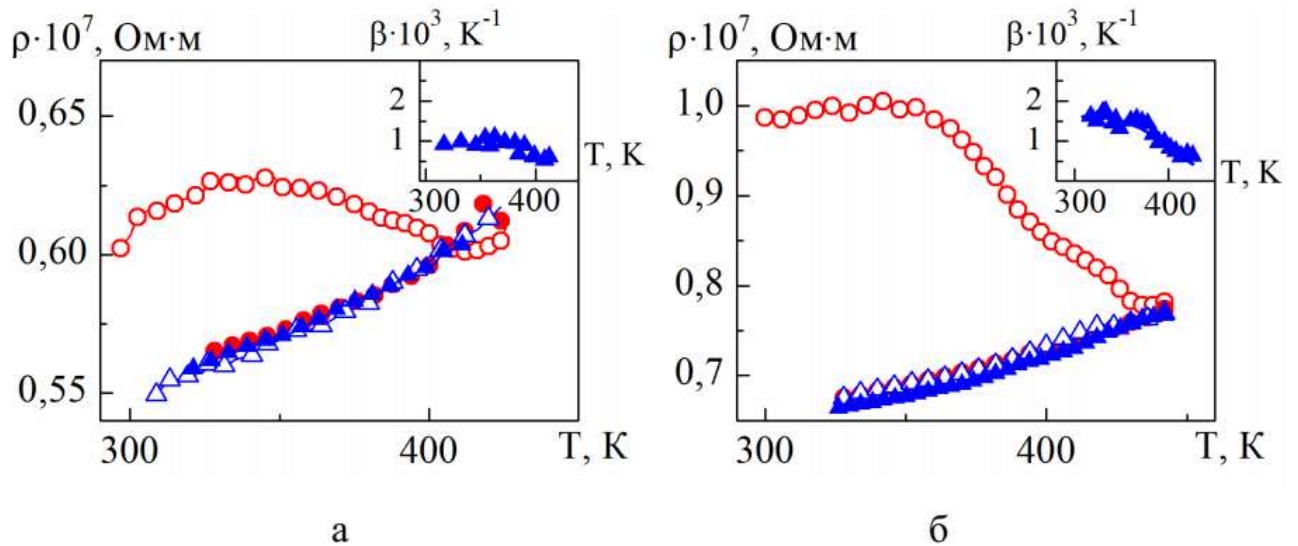


Рисунок 1.3 – Температурні залежності величини питомого опору та ТКО (на вставках) для плівок Ag/П товщиною 17 (а) і 30 нм (б) [11]

Слід зазначити, що при збільшенні товщини зразка великої зміни форми графіка не спостерігається. Це можна обумовити тим, що дослідження проводилися для вузького інтервалу d , а температура при якій в першому циклі відпалювання можемо спостерігати мінімум питомого опору на температурній залежності питомого опору (температура заліковування дефектів (T_d)) пролягає в межах від 410 до 450 К, що узгоджується з даними роботи [8]. На цю величину сильно впливають такі процеси як заліковування дефектів, рекристалізації та швидкість конденсації. Лінійний характер графіка $\rho(T)$ при охолодженні на другому циклі нагрівання свідчить про кінець термостабілізаційних процесах у зразках. Процес термостабілізації призводить до зниження величини питомого опору на відміну від свіжосконденсованими у 1,1 – 1,4 рази. Узагальнені розмірні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору для плівок Ag представлені на рисунку 1.4. В даних

випадках величина ρ зменшується при збільшенні d , виходячи на асимптотичне значення, в той же час величина β , що є обернено пропорційною ρ , зростає зі збільшенням товщини, також поступово виходячи на насичення. Отриманий характер залежностей $\rho(d)$ та $\beta(d)$ для плівок Ag узгоджується з даними, наведеними у роботах, присвячених вивченню терморезистивних властивостей в однокомпонентних плівках металів.

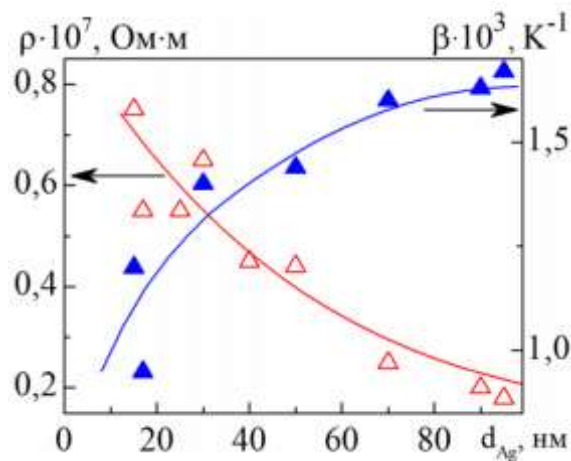


Рисунок 1.4 – Розмірні залежності величини питомого опору ρ та температурного коефіцієнта опору β для плівок Ag [11]

1.2 Вплив концентрації компонент на величину питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла

У роботі [7] було проведено дослідження електрофізичних властивостей плівкових систем на основі пермалою та срібла, одержаних методом одночасної конденсації компонентів. Були розглянуті приклади температурних залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ з концентрацією $c_{Ag} = 26, 48$ та 77 ат. %. Їх характер був зумовлений процесами, що відбуваються в об'ємі плівкових зразків: необоротне зменшення величини питомого опору на першому циклі нагрівання, яке пов'язане з процесами рекристалізації та заліковування дефектів, що приводять до збільшення швидкості руху електронів вздовж зразка, а також

знижують ймовірність розсіяння електронів в межах зерен та домішках. В подальшому процесі охолодження спричиняється поява температурної залежності питомого опору (величина ρ зменшується лінійно при охолодженні до кімнатної температури).

Розглянемо результати досліджень електрофізичних властивостей плівкових зразків (Pу + Ag)/П залежно від концентрації немагнетного компонента. Приклад температурних залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ для систем при концентрації $c_{Ag} = 26, 48$ і 77 ат.% представлено на рисунку 1.5.

Температуру заліковування дефектів (T_d) позначають як температуру за якою на першому циклі відпалювання спостерігаємо мінімум питомого опору на залежності $\rho(T)$. На величину цієї температури впливає багато процесів, такі як: процес заліковування дефектів, швидкість конденсації яка значно впливає на величину, а також рекристалізація. Лінійну залежність від температури також можна спостерігати протягом другого циклу охолодження. Це свідчить про те що завершується термостабілізаційний процес у системі (Pу+Ag)/П. Температурна залежність ТКО розрахована по другому циклу охолодження дорівнює $\beta \sim 1/T$, маючи на увазі, що при збільшенні температури відбувається часткове зменшення величини β . При цьому концентраційна зміна c_{Ag} від 26 до 77 ат. % не вносить змін у загальний характер залежностей $\rho(T)$. Узагальнена концентраційна залежність величини питомого опору та термічного коефіцієнта опору представлено на рисунку 1.6. із якого можна сказати, що додавання до складу системи (Pу+Ag)/П атомів срібла у діапазоні концентрації ($c_{Ag} = 48$ ат.%) у порівнянні з даними для одношарових плівок пермалою товщиною у 55 нм $\rho(Pу) = 2,0 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

Також слід зазначити, що питомий опір невідпалених зразків, незалежно від концентрації компонентів, має величину порядку 10^{-7} Ом·м, що пов'язано з високою дефектністю зразків, одержаних методом одночасної конденсації компонентів. Величина β у всіх зразків має порядок 10^{-3} K^{-1} .

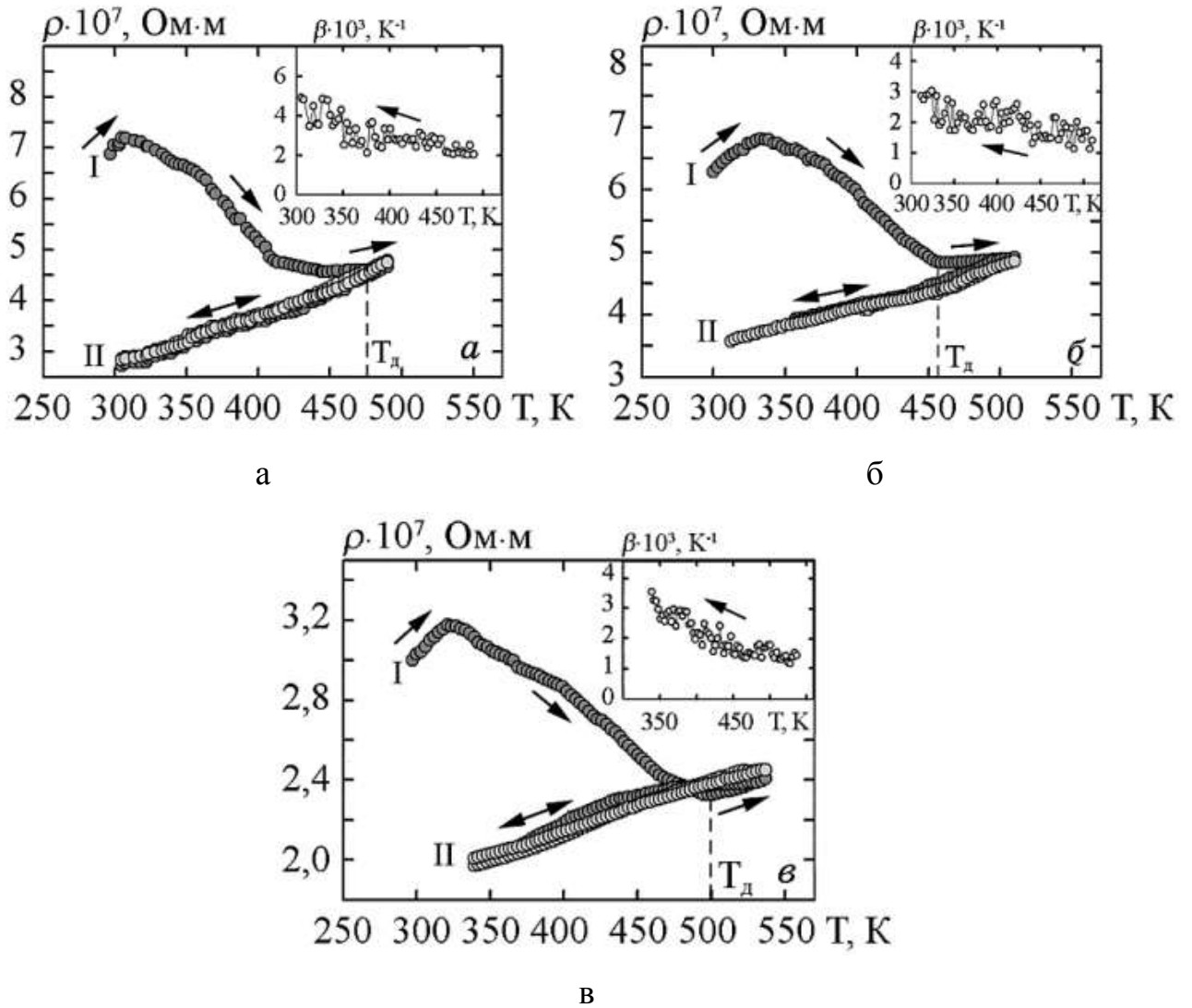


Рисунок 1.5 – Температурні залежності питомого опору та ТКО для плівкових зразків $(Ru + Ag)/Pi$ загальною товщиною у 55 нм при $c_{Ag} = 26$ (а), 48 (б), 77 ат. % (в) для двох циклів «нагрівання↔охолодження».

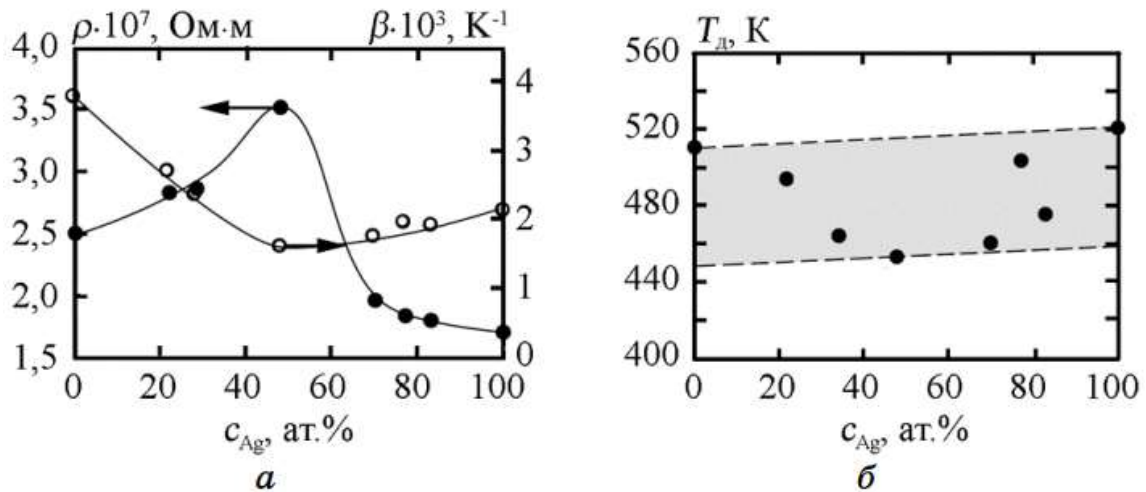


Рисунок 1.6 – Концентраційні залежності питомого опору ρ і термічного коефіцієнта опору β (а) та температури заліковування дефектів T_d (б) для плівок (Py + Ag)/П [7]

Було виявлено, що при додаванні до складу системи (Py+Ag)/П атомів Ag у діапазоні концентрації $c_{\text{Ag}}=26-48$ ат.% призвело до зростання величини питомого опору ($\rho(\text{Py+Ag})=2,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м при $c_{\text{Ag}} = 48$ ат.%) у порівнянні з даними для одношарових плівок пермалою товщиною у 55 нм $\rho(\text{Py}) = 2,0 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Далі при зростанні концентрації атомів немагнітного матеріалу фіксувалося різке падіння ρ до питомого опору одношарової плівки Ag(55)/П, яка становить $1,7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Це можна обумовити тим, що кристаліти магнетного матеріалу дуже мало стримують ріст кристалітів немагнетного матеріалу Ag у процесі конденсації при термообробці.

Було виявлено, що при додаванні до складу системи (Py+Ag)/П атомів Ag у діапазоні концентрації $c_{\text{Ag}}=26-48$ ат.% призвело до зростання величини питомого опору ($\rho(\text{Py+Ag})=2,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м при $c_{\text{Ag}} = 48$ ат.%) у порівнянні з даними для одношарових плівок пермалою товщиною у 55 нм $\rho(\text{Py}) = 2,0 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Далі при зростанні концентрації атомів немагнітного матеріалу фіксувалося різке падіння ρ до питомого опору одношарової плівки Ag(55)/П, яка становить $1,7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Це можна обумовити тим, що кристаліти

магнетного матеріалу дуже мало стримують ріст кристалітів немагнетного матеріалу Ag у процесі конденсації при термообробці.

Отже для компонентів тонкоплівкових систем на основі Ru та Ag, залежно від концентрації змінюється середня концентрація та тип структурних дефектів (меж зерен, вакансій, дефектів пакування). При зростанні вмісту атомів Ag відбувається збільшення середнього розміру кристалітів і збільшення концентрації зерен з дефектами пакування. У результаті c_{Ag} від 20 до 50 ат.% був виявлений перехід від структури з переважальними дефектами типу вакансійних комплексів до структури, для якої характерні дефекти пакування.

У випадку функціональних матеріалів на основі Ru та Ag які були отримані методом одночасної конденсації, дослідження електрофізичних властивостей (питомий опір та ТКО) у роботі [11] були проведені тільки для систем з концентрацією срібла 63 ат.%. Температурні залежності питомого опору і ТКО (на вставках) для плівкових систем (Ru+Ag)/П показані на рисунку 1.7. Також були визначені наступні особливості: по-перше,

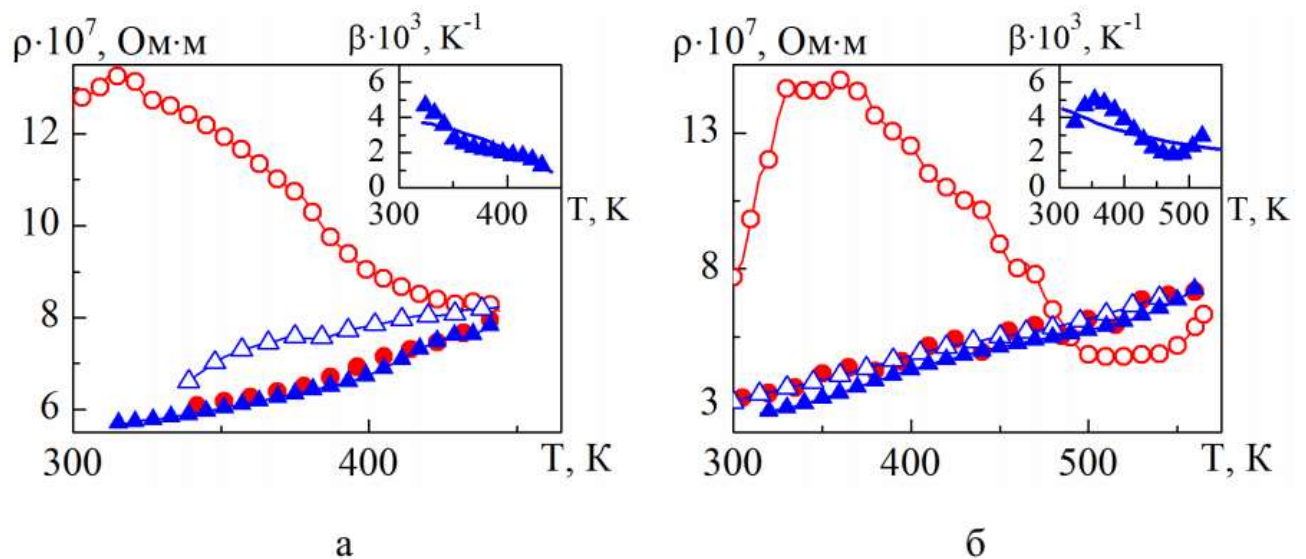


Рисунок 1.7 – Температурні залежності питомого опору і ТКО (на вставках) для плівкових систем (Ru+Ag)/П при $c_{Ag} = 63$ ат.% загальною товщиною 14 (а) та 30 нм (б) [11]

спостерігається характерне зменшення питомого опору при підвищенні температури в першому циклі нагрівання. Також виконуються процеси залічування дефектів та збільшення середнього розміру зерна при відпалюванні які збільшують рухливість електронів крізь плівку та знижують ймовірність розсіювання електронів на границях зерен або домішок. Що призводить до того, що після термообробки спостерігається зменшення величини питомого опору зразків.

По-друге, в першому циклі нагрівання виділяються дві зони. Перша з них характеризується зростанням питомої провідності при підвищенні температури, а друга швидким зменшенням питомого опору з підвищенням температури. Також треба відмітити, що при зростанні температурного діапазону другої зони відбувається навіть з маленького збільшення товщини зразка. Причиною такої зміни служить процес заліковування дефектів в якому зміна температурного діапазону є поступовою.

По-третє, поведінка температурної залежності опору при охолодженні типова для металевих зразків її можна спостерігати у всіх досліджуваних плівках. Значення ТКО та питомого опору в даному випадку мають порядок $\rho \sim 10^{-7}$ Ом·м та $\beta \sim 10^{-3} \text{K}^{-1}$, які є характерними для компонентів досліджених зразків. Також проаналізувавши результати експериментів (дивись приклад [11]), було визначено, що величина питомого опору зразків з більшою товщиною після термообробки є нижчою, ніж для зразків з меншою товщиною. Наприклад, значення питомого опору наступні: $\rho = 5,7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м для системи з $d = 15$ нм і $3,1 \cdot 10^{-7}$ Ом·м для плівок з $d = 30$ нм. Величина ТКО, яка визначалася шляхом диференціювання dp/dT , зменшується при збільшенні товщини зразків d . Наприклад, при товщині 15 нм $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, а для плівкового зразка з $d = 30$ нм $\beta = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Така поведінка питомого опору та температурного коефіцієнту опору обумовлені розмірним ефектом в електрофізичних властивостях тонких плівок Ru та Ag.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ЗРАЗКІВ І ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика одержання нанорозмірних плівкових систем на основі пермалою та срібла

За проведеним літературним оглядом була визначена мета магістерської роботи, яка полягала у комплексному вивченні електрофізичних властивостей (термічний коефіцієнт опору (ТКО, ρ)) нанорозмірних плівкових системах на основі пермалою та срібла.

Тонкоплівкові зразки на основі пермалою отримувалися методом одночасного електронно-променевого випаровування з двох незалежних джерел за кімнатної температури у вакуумній камері приладу ВУП-5М при (тиску газів залишкової атмосфери у 10^{-4} Па). Зовнішній вигляд установки представлено на рисунку 2.1. Схематичне зображення розташування випарників, підкладок для нанесення зразків та системи контролю товщини показано на рисунку 2.2.



Рис. 2.1 – Зовнішній вигляд установки ВУП-5М

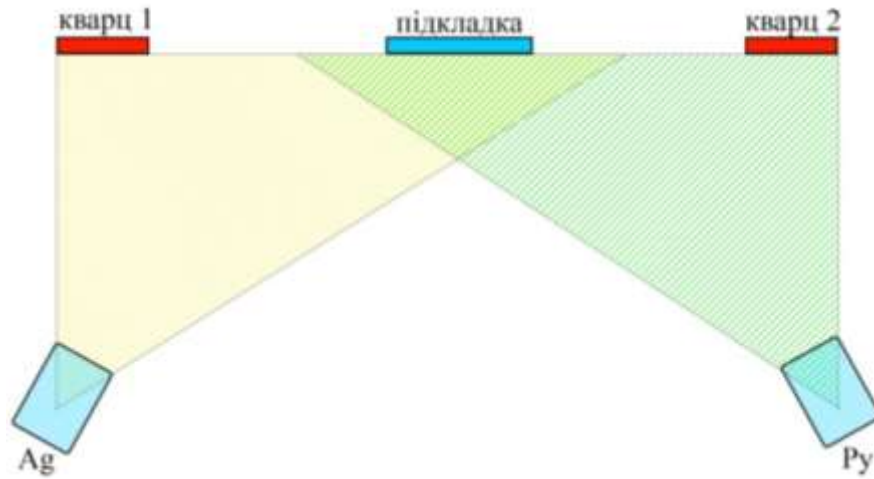


Рис.2.2 – Геометрія системи випарники-підкладки-вимірювачі товщини для отримання плівкових сплавів з різною концентрацією компонент

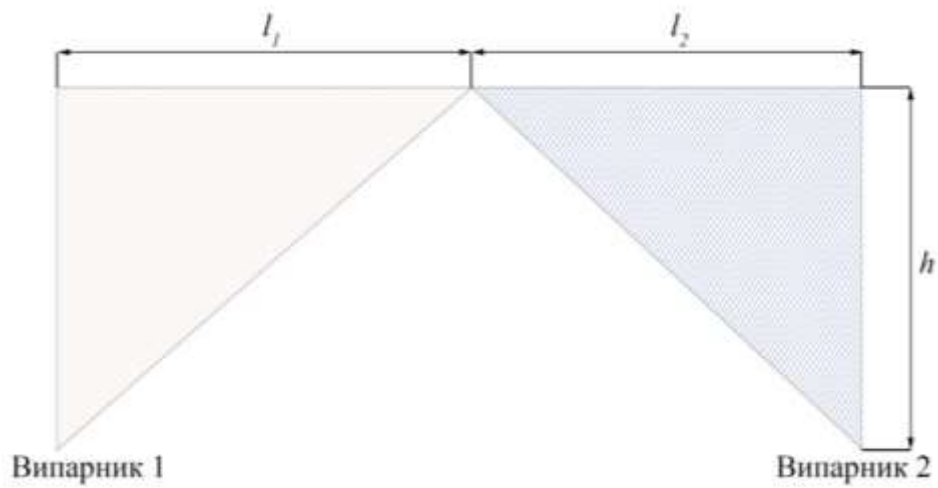


Рисунок 2.3 – Схематичне розташування випарників та кварцових пластин

На рисунку 2.3. представлено розташування випарників та кварцових пластин. Розрахунок ефективної товщини окремих компонент в заданій точці підкладки здійснювався за допомогою співвідношення для точкового випарника[16]:

$$d_1 = d_{01} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_1}{h} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}}, d_2 = d_{02} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_2}{h} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2.1)$$

де d_0 – товщина плівки в точці над випарником.

На основі розрахункових даних за співвідношенням (2.1), беручи до уваги те, що конденсація проводилася безперервно зі сталою швидкістю, також розраховувалася концентрація компонент для кожного з отриманих зразків за співвідношенням:

$$c_{Fe} = \frac{D_{Fe} d_{Fe} \mu_{Fe}^{-1}}{D_{Fe} d_{Fe} \mu_{Fe}^{-1} + D_{Ag} d_{Ag} \mu_{Ag}^{-1}}, \quad (2.2)$$

де D – густина матеріалу, d – ефективна товщина плівкового зразка, μ – молярна маса елементів.

Для контролю товщини плівок в процесі напилення застосовувався метод кварцового резонатора. Для вимірювання у високовакуумній установці монтувався пристрій – коливальний електричний контур, що складається з генератора (робоча частота 10 МГц), самого кварцу, вимірника частоти (застосовувався електронно-лічильний частотометр Ф5035). Для забезпечення потрібної термостабілізації використовували кристал зі спеціальною кристалографічною орієнтацією, що має низький температурний коефіцієнт розширення при температурах близьких до кімнатних. Крім того сам кристал вмонтовано в металевий корпус, що забезпечує достатній тепловідвід.

При формуванні зразків методом одночасного випарування однією з головних характеристик є дотримання заданої стехіометрії по всій товщині плівкової системи. У цьому випадку особливо важливим є контроль швидкості

конденсації на протязі всього часу осадження, яка у даній роботі становила $\omega = 0,1$ нм/с для обох компонент системи. Вирішити дану проблему можна за рахунок реалізації програми контролю швидкості конденсації одночасно з двох джерел з використанням двох кварцових пластин [16].

За описаною методикою була отримана серія зразків (Pу+Ag)/П при концентрації $c_{Ag} = 60$ ат.% загальною товщиною $d = 20, 40$ та 60 нм. Це дало можливість провести дослідження впливу розмірного ефекту на величину питомого опору та термічного коефіцієнту опору.

2.2. Методика дослідження електрофізичних властивостей

З метою вивчення електрофізичних властивостей, отримані зразки проходили термообробку протягом двох циклів «нагрівання↔охолодження». На рисунку 2.3. показано розміщення системи нагрівач-зразок-електричні контакти у камері вакуумної установки ВУП-5М.

Перший цикл проводився в інтервалі температур $T = 300\text{--}500$ К. Температура 500 К, згідно роботи [11] відповідає температурі заліковування дефектів $T_{з.д}$. Другий цикл проводився в інтервалі температур $T = 300\text{--}700$ К.

Плівкові зразки відпалювались зі швидкістю нагріву-охолодження 5 К/хв. Контроль температури забезпечувався цифровим вольтметром VT-70В за допомогою хромель-алюмелевої термопари. Точність вимірювання складала ± 5 К. У процесі нагрівання фіксувалася зміна величини опору і на основі отриманих даних будувалися температурні залежності опору $R(T)$. Оскільки для плівкових матеріалів необхідно враховувати розмірний фактор то були проведені розрахунки величини питомого опору за співвідношенням:

$$\rho = R \frac{ad}{l}, \quad (2.3)$$

де R – питомий опір, a , l , d – ширина, довжина та товщина плівкового зразка відповідно.

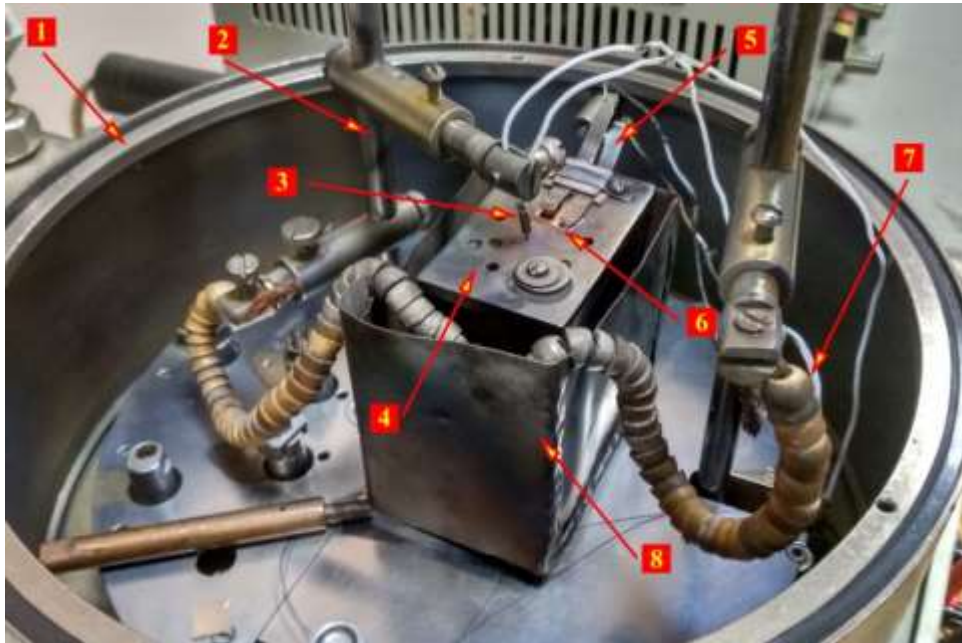


Рисунок 2.3 – Вакуумна камера приладу ВУП – 5М:

1 – вакуумна камера; 2 – електроди; 3 – термопара; 4 – мідний столик;
5 – притискні контакти; 6 – зразок; 7 – керамічна ізоляція; 8 – екрани

На основі розрахункових даних величини питомого опору будувалися відповідні температурні залежності $\rho(T)$. Для обробки інформації було застосовано програмний продукт Origin Pro 8.5.1. На основі експериментальних даних проводилися розрахунки термічного коефіцієнту опору для всіх досліджуваних зразків та будувалися залежності $\beta(T)$.

Величина ТКО розраховувалася за наступним співвідношенням:

$$\beta = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.4)$$

Для розрахунків величини ТКО та побудови температурних залежностей термічного коефіцієнту опору були використані дані експериментальні дані для другого циклу охолодження.

На останньому етапі роботи будувалися розмірні залежності питомого опору та ТКО $\rho(d)$ та $\beta(d)$.

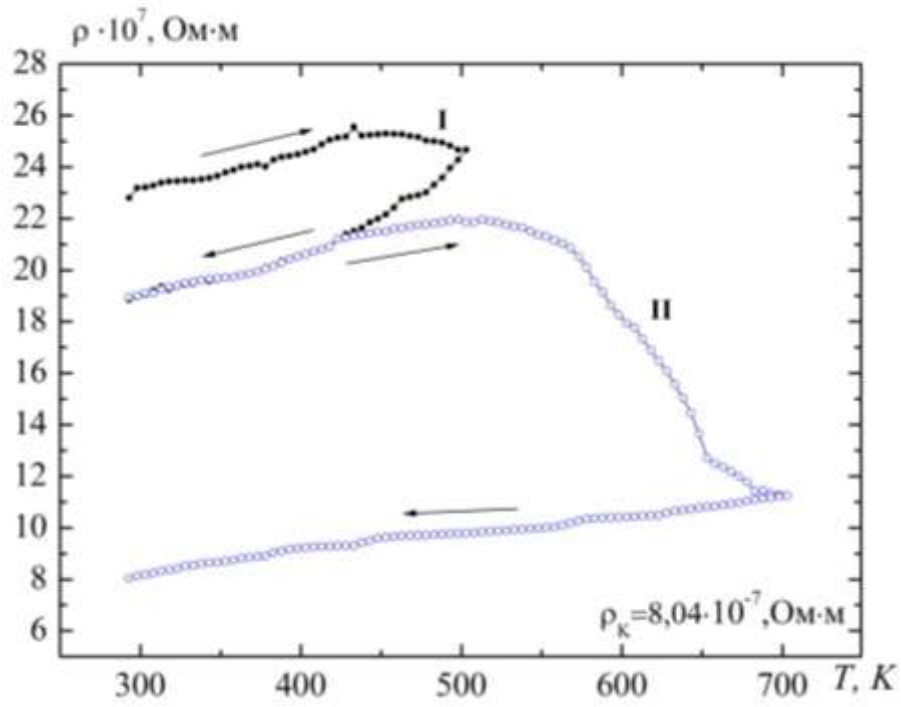
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Температурні залежності питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла

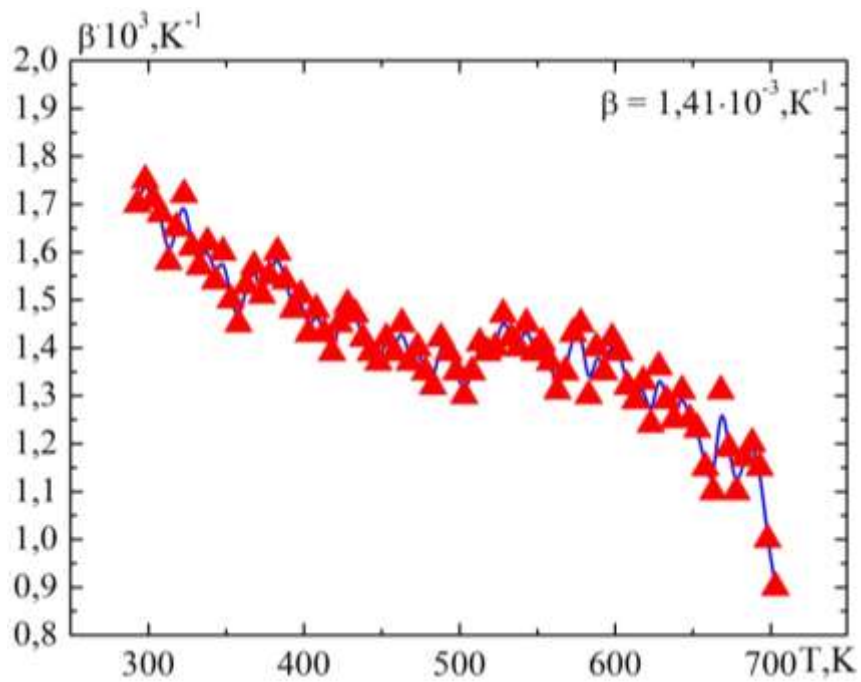
За методикою описаною у другому розділі роботи була отримана серія зразків (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60$ ат.% загальною товщиною $d = 20, 40$ та 60 нм. Всі зразки проходили 2 цикли термообробки «нагрівання↔охолодження»: 1 цикл в інтервалі температур від 300 до 500 К., другий цикл – від 300 до 700 К. Результати даних вимірювань представлені на рисунках 3.1–3.3.

Розглянемо більш детально отримані результати. На рисунку 3.1 представлені температурні залежності питомого опору та ТКО для плівкової системи (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60$ ат.% загальною товщиною 20 нм. Дані графіки відповідають першому та другому циклу термообробки $T_{\text{в1}} = 300$ – 500 К. та $T_{\text{в2}} = 300$ – 700 К. На першому циклі нагрівання можна виділити три ділянки. Перша з них відповідає температурному діапазону 300 – 450 К і характеризується немонотонним зростанням опору в наслідок зміни концентрації носіїв заряду та зростання інтенсивності їх розсіювання. Друга ділянка відповідає температурному діапазону 450 – 490 К. і характеризується достатньо різким зменшенням величини опору, що пов'язана з процесами заліковування дефектів кристалічної будови. На третій ділянці відбувається незначне поступове зростання опору, що свідчить про закінчення термостабілізаційних процесів.

На першому циклі охолодження спостерігається типова металічна температурна залежність тобто при зменшенні температури відбувається поступове зменшення опору. На основі експериментальних даних величини опору проводилися розрахунки величини питомого опору за співвідношенням (2.3) представлене у другому розділі роботи.

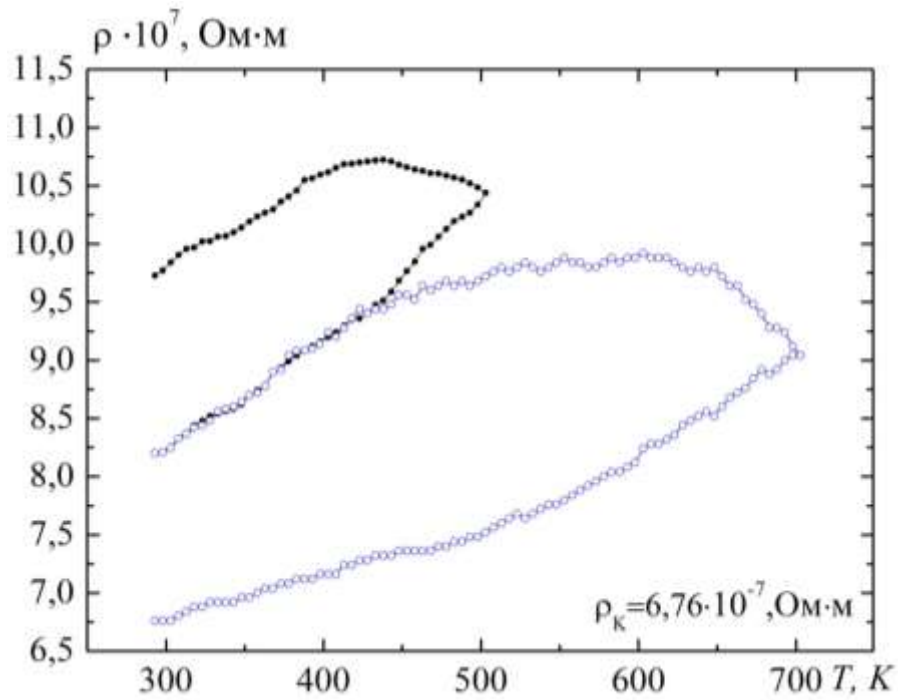


а

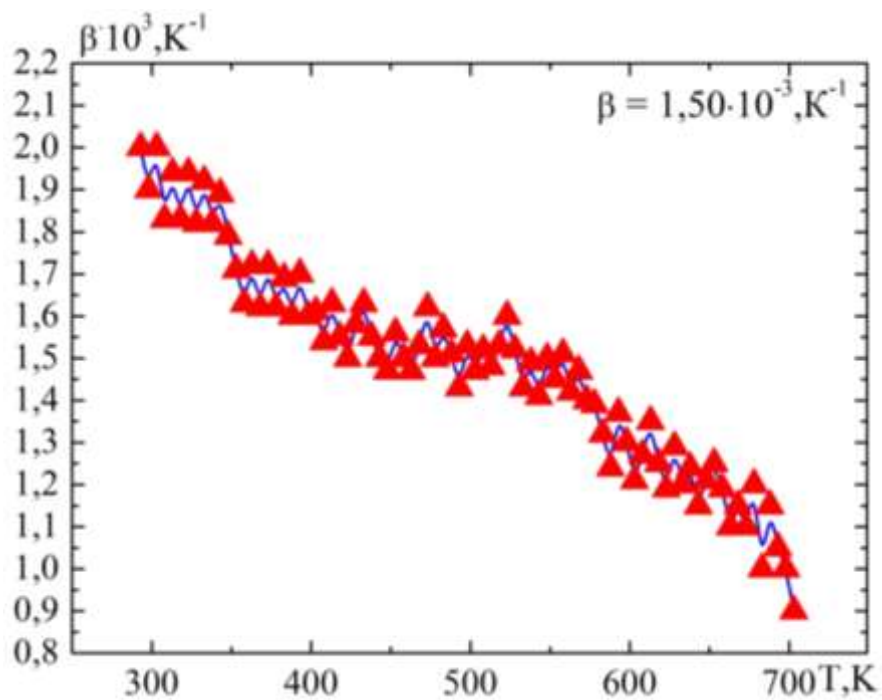


б

Рисунок 3.1 – Температурні залежності питомого опору (а) та термічного коефіцієнту опору для плівкової системи (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 20 нм (б)

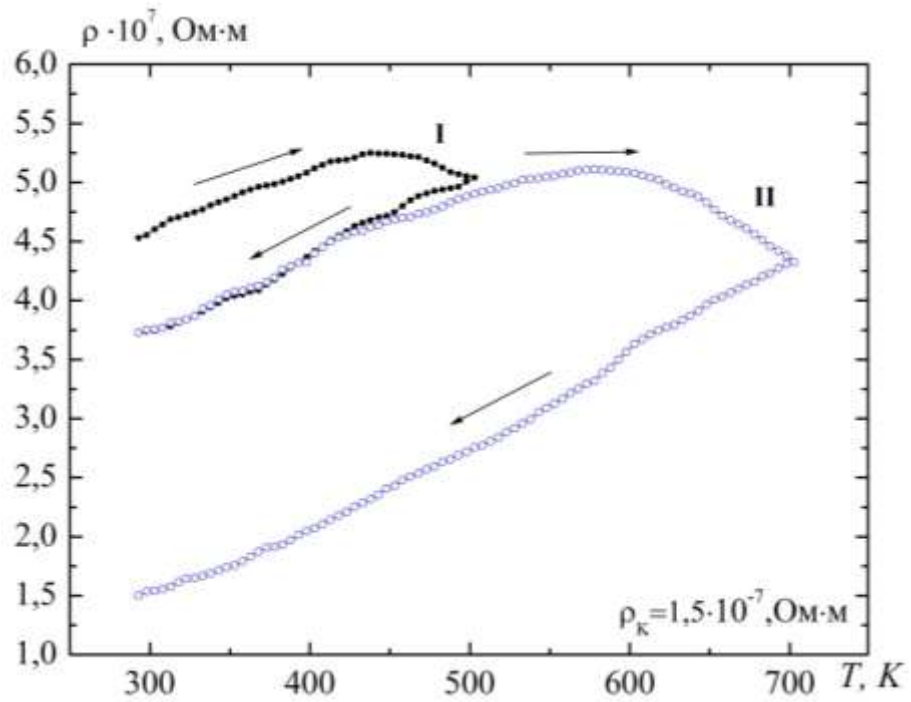


а

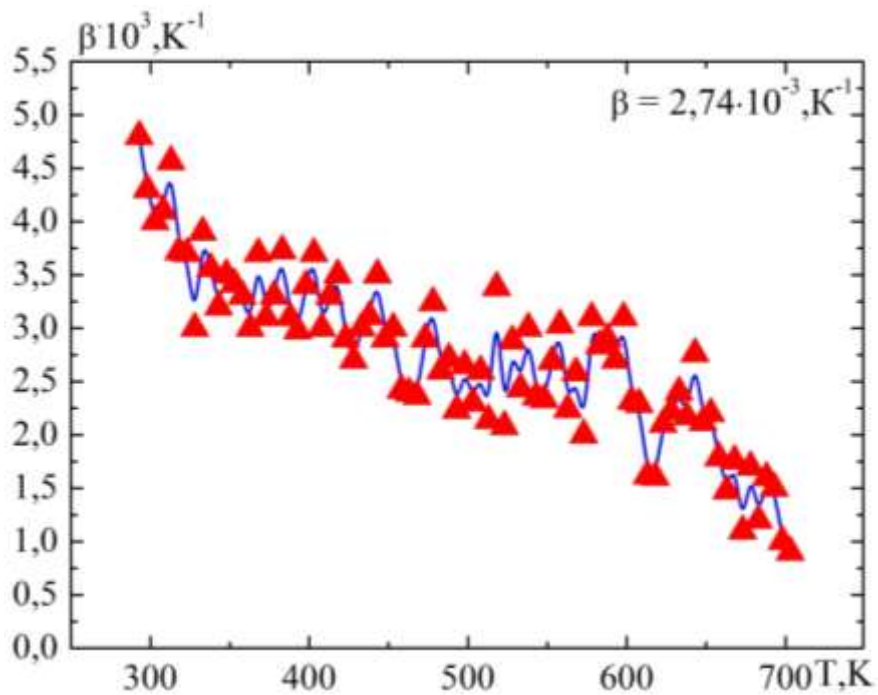


Б

Рисунок 3.2 – Температурні залежності питомого опору (а) та термічного коефіцієнту опору для плівкової системи (Ru+Ag)/ Pt при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 40 нм (б)



а



б

Рисунок 3.3 – Температурні залежності питомого опору (а) та термічного коефіцієнту опору для плівкової системи (Ru+Ag)/ Pt при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 60 нм (б)

На другому циклі нагрівання можна виділити дві характерні ділянки, перша з яких характеризується лінійною залежністю питомого опору від температури, друга – різким його падінням, що свідчить про те що у системах при $T \cong 600 \text{ K}$ знов активізуються процеси заліковування дефектів, що пов'язано з інтенсивним ростом кристалітів, що належать сріблу. Аналогічна поведінка спостерігається і при зростанні загальної товщини зразків.

Експериментальна залежність ТКО від температури розраховувалася на основі експериментальних даних для опору для другого циклу охолодження за співвідношенням (2.4), представленого у другому розділі роботи. На рисунку 3.1 б представлена температурна залежність термічного коефіцієнту опору для плівкової системи (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 20 нм. Характерною особливістю даної залежності є зростання величини β при підвищенні температури. Такий характер залежності є фізично обґрунтованою, оскільки термічний коефіцієнт опору згідно співвідношення (2.4) це величин, яка є обернено пропорційною до величини опору, тобто $\beta \sim 1/R$. Аналогічний характер температурної залежності ТКО спостерігається і при збільшенні загальної товщини системи.

Середня величина розрахованого ТКО для системи (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 20 нм дорівнює $\beta = 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, що також відповідає даним роботи [17], згідно якої у системі на основі пермалою та срібла при $c(\text{Ag}) = 63 \text{ ат.}\%$ загальною товщиною 15 нм величина β дорівнює $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

3.2 Розмірні залежності питомого опору та ТКО нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла

Розраховані на основі експериментальних температурних залежностей опору для плівкових систем (Pу+Ag)/ П при $c(\text{Ag}) = 60 \text{ ат.}\%$ різної загальною товщини величини питомого опору та термічного коефіцієнту опору

Таблиця 3.1 – Залежність питомого опору та термічного коефіцієнту опору від загальної товщини системи (Pу+Ag)/П

Система	Товщина, нм	$\rho \cdot 10^7$, Ом·м	$\beta \cdot 10^3$, K ⁻¹
(Pу+Ag)/П, c _{Ag} = 60 ат.%	20	8,04	1,41
	40	6,76	1,50
	60	1,50	2,74

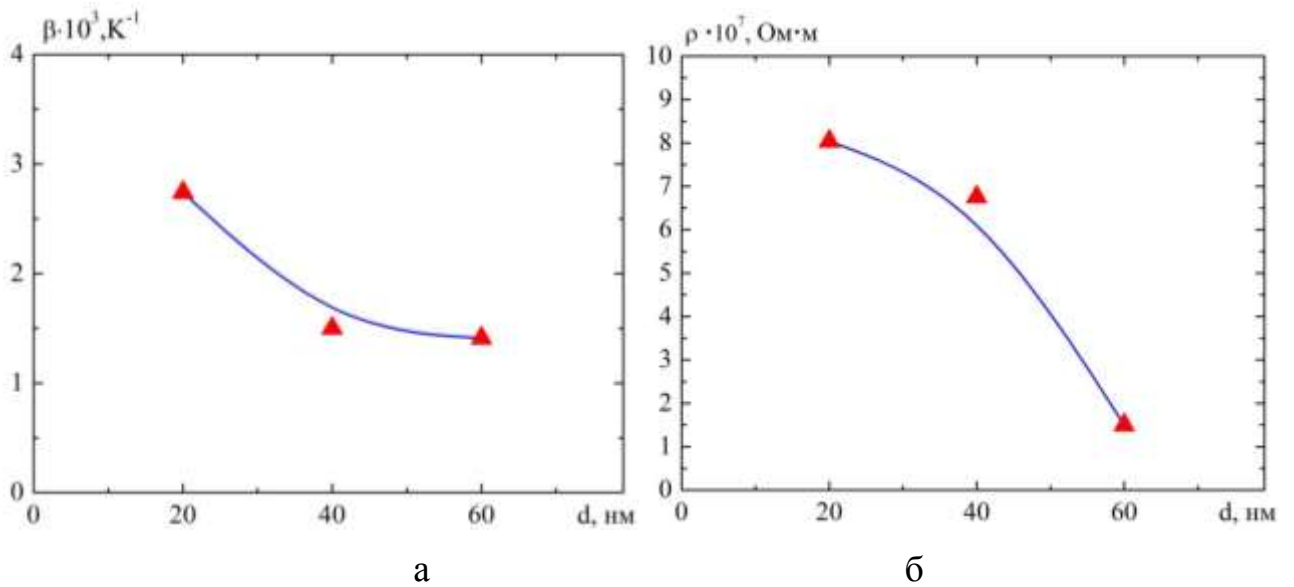


Рисунок 3.4 – Розмірні залежності питомого опору (а) та термічного коефіцієнту опору (б) для системи (Pу+Ag)/П при c(Ag) = 60 ат.%

представлені у таблиці 3.1.

На основі даних, представлених у таблиці 3.1 будувалися розмірні залежності питомого опору $\rho(d)$ та термічного коефіцієнту опору $\beta(d)$. Аналізуючи отримані дані, необхідно зауважити, що питомий опір для всіх нанорозмірних плівкових систем (Pу+Ag)/П при $c(\text{Ag}) = 60$ ат.%. становить величину $\rho \sim 10^{-7}$ Ом·м, а для термічного коефіцієнту опору характерна величина $\beta \sim 10^{-3}$ К⁻¹. Такі величини ρ та β узгоджуються з літературними даними [17].

На рисунку 3.4 представлені розмірні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору для нанорозмірної системі (Pу+Ag)/П при $c(\text{Ag}) = 60$ ат.%. Як видно з рисунку при збільшенні товщини зразків спостерігається зменшення величини питомого опору (рисунок 3.4а) та відповідне зростання величини термічного коефіцієнта опору (рисунок 3.4б). Даний характер розмірних залежностей $\rho(d)$ та $\beta(d)$ узгоджується з поняттям розмірного ефекту, який спостерігається у тонких металевих плівках у випадку коли товщина зразку стає спів розмірною з середньою довжиною вільного пробігу носіїв заряду [18].

ВИСНОВКИ

1. Виходячи з аналізу літературних даних стосовно температурної залежності питомого опору і ТКО для одношарових плівок пермалою та срібла слід зазначити, що характер залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ є типовим для металів в інтервалі $d = 10-100$ нм, а величина ρ і β мають порядок 10^{-7} Ом·м та 10^{-3} К⁻¹ відповідно.

2. Для нанорозмірних систем на основі пермалою Ni₈₀Fe₂₀ та Ag показала, що: характери температурних залежностей питомого опору і ТКО є типовими для складових компонентів системи. На концентраційній залежності питомого опору спостерігається максимум при $c_{Ag} = 48$ ат.%, якому відповідає величина $\rho = 3,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, що пов'язане зі змінами типу та середньої концентрації структурних дефектів. На залежності β (c_{Ag}) спостерігається мінімум при $c_{Ag} = 48$ ат.%, якому відповідає величина $\beta = 1,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

3. У роботі методом одночасної електронно-променевої конденсації була отримана серія нанорозмірних тонкоплівкових зразків на основі пермалою та срібла (Pу+Ag)/ П при $c(Ag) = 60$ ат.% загальною товщиною $d = 20, 40, 60$ нм. Всі зразки проходили 2 цикли термообробки «нагрівання↔охолодження»: 1 цикл в інтервалі температур від 300 до 500 К., другий цикл – від 300 до 700 К.

4. Проведений аналіз експериментальних результатів дослідження залежностей $\rho(T)$ та $\beta(T)$ нанорозмірних плівкових систем на основі пермалою та срібла показав, що збільшення товщини плівки призводить до:

- зменшення величини питомого опору з $8,04 \cdot 10^{-7}$ до $1,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м;
- збільшення величини ТКО з $1,41 \cdot 10^{-3}$ до $2,74 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

5. Побудовані розмірні залежності питомого опору $\rho(d)$ і ТКО $\beta(d)$ узгоджується з поняттям розмірного ефекту, який спостерігається у тонких металевих плівках у випадку коли товщина зразку стає спів розмірною з середньою довжиною вільного пробігу носіїв заряду

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jiang Y., Yao S., Zhang W. [Ni₈₀Fe₂₀/Cu/Co/Cu] spin-valve multilayers electrodeposited on NiFe buffer layers // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – P. 3210–3216.
2. Zhao K., Xing Y., Han J., Feng J., Shi W., Zhang B., and Zeng Z., Magnetic transport property of NiFe/WSe₂/NiFe spin valve structure // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2017. – Vol. 432. – P. 10–13.
3. Singh B. B., Chaudhary S., Pandya D.K., Tunneling behavior in ion-assist ion-beam sputtered CoFe/MgO/NiFe magnetic tunnel junctions // *J. Mater. Res. Bull.* – 2012. – Vol. 47, No. 11. – P. 3786–3790.
4. Luo C., Sun L., Zhang Y., Huang H. B., Yang M., Zhai Y., Du J., Zhai H. R. Investigations of magnetic properties of Tb-doped Ni₇₈Fe₂₂ thin films // *J. phys. status solidi c*. – 2012. – Vol. 9, No. 1.– P. 81.
5. Lytvynenko Ia. M., Pazukha I. M., Bibyk V. V. Structural, Magnetic and Magnetoresistive Properties of Ternary Film Ni-Fe-Co Alloy // *J. Nano- Electron Phys.* – 2018. – Vol. 6, No. 2. P. 02014-1 – 02014-6.
6. Mandal G., Srinivas V., Rao V.V. Origin of large positive magnetoresistance in permalloy(Ni_{0.8}Fe_{0.2})–graphite granular composites // *J. Alloy. Comp.* – 2009. – Vol 484, No. 1–2 – P. 851 – 855.
7. Шуляренко Д.О., Пазуха І.М., Пилипенко О.В., Однодворець Л.В. Структурно-фазовий стан та електрофізичні властивості плівкових систем на основі пермалою і срібла // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 633–644.
8. Однодворець Л.В. Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки : автореф. дис. доктора ф.-м. наук : 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. Сумський державний університет. – Суми, 2015. – 41 с.
9. Однодворець Л.В., Проценко С.І., Черноус А.М. Електрофізичні та

- магніторезистивні властивості плівкових матеріалів в умовах фазоутворення: монографія / за заг. ред. проф. І.Ю.Проценка. – Суми: СумДУ, 2011. – 203 с.
10. Nahrwold G., Scholtyssek J.M., Motl-Ziegler S., Albrecht O., Merkt U., Meier G. Structural, magnetic, and transport properties of Permalloy for spintronic experiments // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 108. – P.013907–013914.
 11. Пилипенко О. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au. – Суми: Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. СумДУ, 2019. – 179 с.
 12. Hite D.A., Russek S. E., Pappas D. P. In situ conductance characterization of Fe/Ag multilayer contacts on GaAs // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 94. – P.621–625.
 13. Csontos M., Balogh J., Kaptás D. Magnetic and transport properties of Fe-Ag granular multilayers // *Phys. Rev. B.* – 2006. – Vol. 73. – P.184412 – 184421.
 14. Hrychanovska T.M., Protsenko I.Yu., Chornous A.M., Shpetnyi I.O. Temperature and size effects in electrophysical properties of two-layer thin film based on Ni and V // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2006. – Vol. 28, No.2. – P.267 – 279.
 15. Chen Yuan-Tsung., Tseng Jiun-Yi., Lin S.H., Sheu T.S. Effect of grain size on optical and electrical properties of Ni₈₀Fe₂₀ thin films // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2014. – Vol. 360. – P.87 – 91.
 16. Лобода В.Б., Пирогова С.М., Проценка С.І. Структура та електрофізичні властивості плівок сплаву Ni-Cu в температурному інтервалі 300-700 К. – Суми: Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2001. – № 3(24)-4(25). – С. 74-83.
 17. Pazukha I.M., Pylypenko O.V., Odnodvoretz L.V. A comprehensive investigation of electrophysical and magnetoresistive properties of thin films based on permalloy and silver // *Materials Research Express.* – 2018. – Vol. 5, №10. – P.106409–106416.
 18. Pazukha I.M., Protsenko I.Yu. Theoretical methods of investigation of thin film materials properties: study guide. – Sumy : Sumy State University, 2017 – 102 p.