

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

УДК 621.793

Р.В. Педань¹, О.В. Дубіковський^{1,2}, А.В. Боднарук^{1,3}, І.О. Круглов¹,
Ю.В. Яворський¹, І.А. Владимірський^{1*}¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна² Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна³ Інститут фізики НАН України, Київ, Україна*Відповідальний автор: vladymyrskiy@kpm.kpi.ua**СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ
НАНОРОЗМІРНИХ ПЛІВКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ОСНОВІ Pt/Co,
ОСАДЖЕНИХ НА ГНУЧКІ ПОЛІМЕРНІ ПІДКЛАДИНКИ**

Проблематика. Феромагнітні наноплівки на основі Pt/Co викликають інтерес завдяки потенційному застосуванню в спінтроніці та наноелектроніці. Вони поєднують унікальні магнітні властивості, високу корозійну стійкість і сумісність з сучасними технологіями інженерії магнітних засобів збереження інформації та реєстрації електромагнітного випромінювання. Pt/Co плівки досліджують та застосовують як матеріали для сенсорів, тунельних переходів, магнітних дисків, ТГц-генераторів та скірімйонних носіїв. Вивчення формування їх властивостей є ключовим завданням для розвитку технологій наноелектроніки.

Мета дослідження. Встановити зміни фазового складу, перерозподілу хімічних елементів за товщиною та магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, осаджених на гнучкі полімерні підкладки полііміду і підданих наступній термічній обробці у високому вакуумі, при додаванні проміжних шарів Au та формуванні різної кількості міжшарових меж поділу.

Методика реалізації. Наноплівки Pt/Co/PI, Pt/Au/Co/PI та Pt/Co/Au/Pt/Co/PI осаджували на гнучкі поліімідні підкладки методом магнетронного розпорощення за кімнатної температури. Після осадження їх відпалювали у вакуумі за 550 °C протягом 30 хв. Для дослідження структурно-фазових змін використовували методи РФА та мас-спектрометрії, а дослідження магнітних властивостей проводили за допомогою методу вібраційної магнітометрії у зовнішньому магнітному полі.

Результати дослідження. Встановлено, що відпал нанорозмірних композицій за температури 550 °C упродовж 30 хв. спричиняє формування дуже малих кристалів, що найбільш імовірно пов'язано з релаксацією напружень, що виникли у плівкових композиціях у процесі осадження. З результатів мас-спектроскопії встановлено, що в результаті відпалу спостерігається рівномірний розподіл інтенсивності виходу вторинних іонів металів, що входять до складу плівкових композицій, та комплексного іона Co/Pt, що вказує на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок відпалу. З результатів дослідження магнітних властивостей встановлено, що відпал дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, а його коерцитивна сила демонструє виражену залежність від вихідної структури композиції.

Висновки. Встановлено, що термічна обробка нанорозмірних композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм) та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм) на підкладках полііміду за температури 550 °C упродовж 30 хв. дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, при цьому його коерцитивна сила виявляє виражену залежність від структури вихідної композиції – наявності додаткового шару Au та кількості міжшарових меж поділу.

Ключові слова: нанорозмірна плівкова композиція; гнучка полімерна підкладка; РФА, мас-спектрометрія; намагніченість; коерцитивна сила.

Пропозиція для цитування цієї статті: Р.В. Педань, О.В. Дубіковський, А.В. Боднарук, І.О. Круглов, Ю.В. Яворський, І.А. Владимірський, “Структурно-фазові перетворення та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, осаджених на гнучкі полімерні підкладки”, Наукові вісті КПІ, № 3, с. 42–49, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

Offer a citation for this article: Pedan R.V., Dubikovskiy O.V., Bodnaruk A.V., Kruhlov I.O., Yavorskiy Yu.V., Vladymyrskiy I.A., “Structural-phase transformations and magnetic properties of nanoscale Pt/Co-based thin film compositions deposited on flexible polymer substrates”, KPI Science News, no. 3, pp. 42–49, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337638>

Вступ

Феромагнітні нанорозмірні плівкові матеріали на основі Pt/Co викликають постійний інтерес дослідників з огляду на можливість їх практичного використання як функціональні шари пристроїв спінтроники та наноелектроніки, що обумовлено їхнім унікальним комплексом магнітних властивостей, вираженою корозійною стійкістю та суміжністю з сучасними технологічними процесами [1, 2]. Зокрема, плівкові сплави системи Co–Pt розглядаються як матеріали для магніторезистивних сенсорів, пристроїв, що працюють на основі ефектів магнітних тунельних переходів та переносу спин-орбітального моменту, жорстких магнітних дисків, генераторів електромагнітного випромінювання терагерцового діапазону та носіїв інформації на основі скірімів [3–19].

Основним методами отримання нанорозмірних феромагнітних плівок на основі Pt/Co є осадження сплаву відповідного хімічного складу на нагріті підкладки [20–24] або осадження сплаву за кімнатної температури з проведенням наступної термічної обробки [25–28]. Альтернативним підходом є послідовне нанесення окремих шарів Co і Pt з подальшим термічним впливом, який ініціює дифузійно-індуковане формування інтерметалідних фаз [6, 13, 29]. У таких нанорозмірних структурах термічно індукована дифузійна взаємодія між шарами Co та Pt може забезпечити формування низки феромагнітних фаз, зокрема, магнітно-м'яких AI -CoPt, LI_2 -Co₃Pt та LI_2 -CoPt₃ з гранецентрованою кубічною ґраткою та магнітно-твердої LI_0 -CoPt з гранецентрованою тетрагональною структурою. Особливістю останнього підходу є можливість формування феромагнітних плівкових матеріалів за відносно невисоких температур обробки шляхом розвитку дифузійних процесів за домінуючим зернограничним механізмом [13]. Більше того, формування наперед заданої структури завдяки дифузії границями зерен у нанорозмірних плівках має додаткові переваги, оскільки подібні матеріали характеризуються високою протяжністю цих границь [30].

Також відомо, що введення до складу нанорозмірних плівкових композицій додаткових проміжних шарів благородних металів, наприклад Au, а також збільшення кількості міжшарових меж розділу може обумовлювати виникнення додаткових механічних напружень, які слугують екстра рушійною силою розвитку дифузійних процесів і, як наслідок, сприяють ди-

фузійно-контрольованому формуванню заданого структурно-фазового стану [31–33].

Застосування фізико-матеріалознавчих підходів, які дозволяють досягти зниження температур формування феромагнітних фаз у плівкових композиціях на основі Pt/Co, є необхідним для застосування цих матеріалів у технологіях «гнучкої» електроніки [34, 35]. Однак створення пристроїв спінтроники на основі плівок Pt/Co, осаджених на гнучкі підкладки, потребує ґрунтовного дослідження закономірностей розвитку дифузійних процесів і перебігу контрольованих ними структурно-фазових перетворень саме за відносно невисоких температур відпапу, що обумовлено низькою термічною стабільністю полімерних підкладок.

У цій роботі подано результати дослідження термічно-індукованої зміни фазового складу, перерозподілу хімічних елементів за товщиною та магнітних властивостей плівкових композицій на основі Pt/Co з додатковими шарами Au і різною кількістю меж поділу, осаджених на гнучкі полімерні підкладки полііміду.

Методика дослідження

Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI осаджено на гнучкі полімерні підкладки полііміду (PI) за кімнатної температури з використанням методу магнетронного розпорошення. Осадження здійснювалося шляхом послідовного розпорошення окремих мішеней Pt, Co і Au високої чистоти (99,9 %). Процес осадження відбувався з використанням живлення магнетрону у режимі змінного струму для розпорошення мішені Co, а Au та Pt – у режимі постійного струму зі швидкостями осадження 2 Å/с для Co, 1,5 Å/с для Pt та 4 Å/с для Au. Тиск у вакуумній камері перед осадженням становив 5×10^{-8} мБар, тиск інертного газу Ar, що подався у камеру для утворення плазмового розряду під час осадження, становив 8×10^{-4} мБар. Після осадження досліджувані плівкові композиції піддано термічному відпапу у вакуумі за тиску 10^{-6} мБар за температурою 550 °C упродовж 30 хв.

Структурно-фазовий аналіз плівкових зразків після осадження та термічної обробки проведено з використанням методу рентгенівської дифракції за допомогою дифрактометру Rigaku Ultima IV у геометрії Бреґґа-Брентано θ – 2θ із застосуванням джерела Cu-K α -випромінювання. Дифрак-

ційні спектри зареєстровано для кутів дифракції 2θ ($20^\circ - 60^\circ$) з кроком $0,02^\circ$ та часом витримки у точці зйомки – 2 с за робочої напруги джерела випромінювання 30 кВ та струму 20 мА.

Для дослідження закономірностей термічно-індукованого перерозподілу хімічних елементів за товщиною пліткових композицій використано метод мас-спектрометрії вторинних іонів за допомогою приладу Ion ToF IV, обладнаного часопролітним мас-аналізатором. Розпорошення пліткових композицій відбувалося пучком первинних іонів Cs^+ з енергією 2 кеВ.

Магнітні характеристики пліткових об'єктів досліджено за кімнатної температури методом вібраційної магнітометрії у зовнішньому магнітному полі напруженістю до 1 кЕ, яке прикладалося паралельно та перпендикулярно відносно поверхні зразка.

Аналіз отриманих результатів

На рис. 1 та рис. 2 подано дифрактограми пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вихідному стані після осадження та після термічної обробки у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв., відповідно.

Дифрактограми пліткових зразків у вихідному стані характеризуються наявністю дифракційних максимумів з кутовим положенням $2\theta = \sim 39,5^\circ$, що відповідають відбиттю від кристалічної площини 111 шару Pt. Також на дифрактограмах наявний набір дифракційних макси-

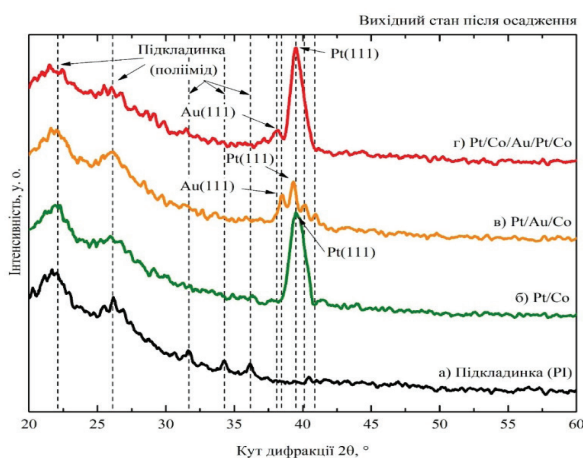


Рис. 1. Дифрактограми підкладки поліміду (а) та пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (б), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (в), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (г) у вихідному стані після осадження

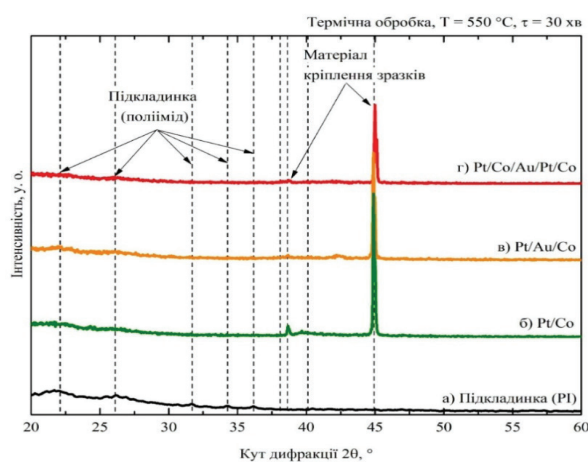


Рис. 2. Дифрактограми підкладки поліміду (а) та пліткових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (б), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (в), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (г) після відпалу у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв

мумів, що є характерними для поліміду, який використано як підкладку. Дифракційний максимум Au(111) з кутовим положенням $2\theta = \sim 38,2^\circ$ наявний на дифрактограмах пліткових композицій, до складу яких входить проміжний шар Au. Відсутність дифракційних максимумів від Co пояснюється високим коефіцієнтом поглинання цим металом рентгенівського випромінювання $\text{Cu-K}\alpha$, що використане для рентгеноструктурних досліджень.

Внаслідок термічної обробки у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв. спостерігається зниження інтенсивності дифракційних максимумів, характерних для матеріалу підкладки. Хоча формування феромагнітних фаз системи Co-Pt внаслідок термічної обробки за аналогічних фізико-технологічних параметрів доведено попередніми дослідженнями пліткових композицій Pt/Co на підкладках SiO_2/Si [13, 33], на дифрактограмах термічно оброблених пліткових композицій всіх досліджених типів не виявлено виражених дифракційних максимумів як від вихідних шарів Pt, Au чи Co, так і від інтерметалідних фаз, що можуть утворюватися у процесі термічно-індукованої взаємодії матеріалів цих шарів. Відсутність дифракційних максимумів як від сформованих фаз Co-Pt, так і від матеріалу проміжного шару Au може бути спричинена формуванням у процесі термічного впливу кристалітів, розмір яких забезпечує таку інтенсивність відбитого кристалографічними площинами рентгенівського випромінювання, яка перебуває за межею чутливості використаного у досліджен-

ні обладнання. Причина ймовірного формування кристалітів малого розміру може бути пов'язана з релаксацією напружень, що виникли у плівкових композиціях у процесі осадження. Варто зауважити, що дифракційні максимуми з кутовими положеннями $2\theta \sim 38,7^\circ$ та $\sim 44,9^\circ$ сформовано в результаті взаємодії рентгенівського випромінювання з кюветою тримача зразків, використання якої є необхідним для забезпечення їх плоскої форми після відпалу.

Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій, отримані методом мас-спектрометрії вторинних іонів (рис. 3), підтверджують наявність шаруватої структури плівкових композицій у вихідному стані після осадження (рис. 3, а, в, д). Цей результат добре узгоджується з дослідженням плівкових зразків методом рентгеноструктурного аналізу, результати якого вказують на наявність на відповідних спектрах дифракційних максимумів від окремих металів, які входять до складу досліджуваних плівкових композицій. Підвищення інтенсивності емісії комплексного іона CoPt в області межі поділу між шарами Co та Pt на профілі розподілу хімічних елементів плівкової композиції $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (рис. 3, а)

пов'язане з шорсткістю поверхні поділу між відповідними шарами та не свідчить про перебіг процесів масопереносу під час магнетронного осадження плівкової композиції.

Характерним для профілів розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій, підданих термічному впливу, є рівномірний розподіл інтенсивності виходу вторинних іонів металів, що входять до складу плівкових композицій, та комплексного іона CoPt , що вказує на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок відпалу. Втім, на профілі розподілу елементів плівкової композиції $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (рис. 3, б) спостерігається зниження інтенсивності сигналу від вторинного іону Co в області, що відповідає початковому положенню шару Pt .

Магнітні властивості досліджуваних плівкових композицій у вихідному стані після осадження мають анізотропний характер (рис. 4). Вісь легкого намагнічування спрямована паралельно до площини всіх досліджених плівкових композицій (рис. 4, а, б, в). Варто зауважити, що така поведінка магнітних властивостей є типовою для магнітних нанорозмірних плівок та обумовлена анізотропією форми. Феромагнітна пове-

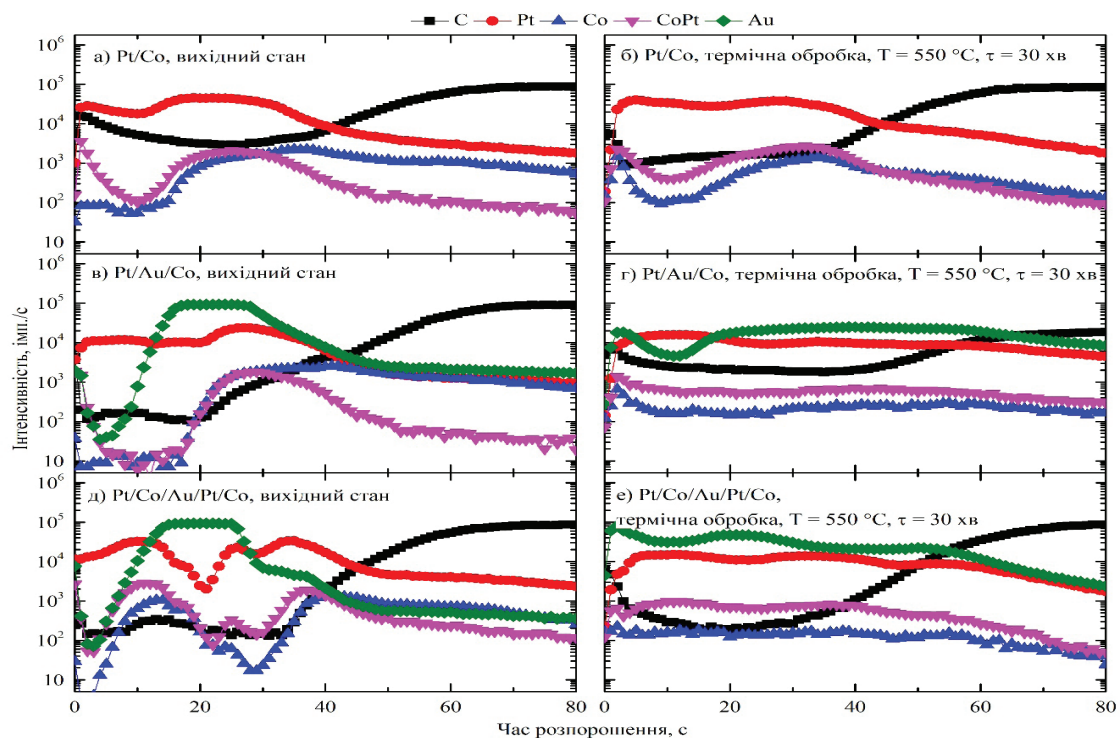


Рис. 3. Профілі розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (а, б), $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Au}(4 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})/\text{PI}$ (в, г), $\text{Pt}(5 \text{ нм})/\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{Au}(4 \text{ нм})/\text{Pt}(5 \text{ нм})/\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{PI}$ (д, е) у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури 550°C упродовж 30 хв

дінка плівкових об'єктів дослідження у вихідному стані після осадження зумовлена наявністю у їхньому складі окремого шару Co.

Структурно-фазовий стан плівкових композицій обумовлює їхні магнітні властивості, зокрема величину коерцитивної сили. Найбільше її значення у вихідному стані до термічної обробки – 205 Е – отримано для композиції Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (рис. 5). Різний рівень напружень, що виникають на межах поділу між шарами плівкових композицій, впливає на дефектність структури, а також на розмір кристалітів і, як наслідок, – на протяжність мережі границь зерен, що впливають на характер обмінної міжзеренної взаємодії феромагнітного матеріалу та може призводити до збільшення коерцитивної сили. Аналіз параметрів ґратки матеріалів шарів досліджуваних плівкових композицій (табл. 1) [36] засвідчив, що невідповідність параметрів кристалічної будови, та, як наслідок, викликані нею механічні напруження у шарі Co є більшими для випадку, коли шар Co має межу розділу з проміжним шаром Au, порівняно з випадком, коли на шар Co осаджено шар Pt у двошаровій плівковій композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI. Розподіл феромагнітного Co у складі плівкової композиції

Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вигляді двох шарів завтовшки 5 нм навпаки призводить до зменшення значення коерцитивної сили до 65 Е (рис. 5), хоча кількість феромагнітного матеріалу залишається незмінною.

Внаслідок термічної обробки спостерігається суттєва зміна коерцитивної сили досліджуваних плівкових матеріалів (рис. 4, 5). Хоча дослідження методом рентгеноструктурного аналізу не дозволило отримати однозначної інформації щодо фазового складу композицій, підданих термічному впливу, зафіксоване збільшення коерцитивної сили переконливо свідчить про перебіг процесів термічно-індукованої взаємодії між шарами та формування феромагнітної фази CoPt. Це твердження задовільно корелює з результатами пошарового хімічного аналізу, які вка-

Таблиця 1. Параметри кристалічної ґратки шарів Co, Pt та Au [36]

Матеріал	Параметр кристалічної ґратки, Å	
	<i>a, b</i>	<i>c</i>
Co	2,507	4,069
Pt	3,924	3,924
Au	4,078	4,078

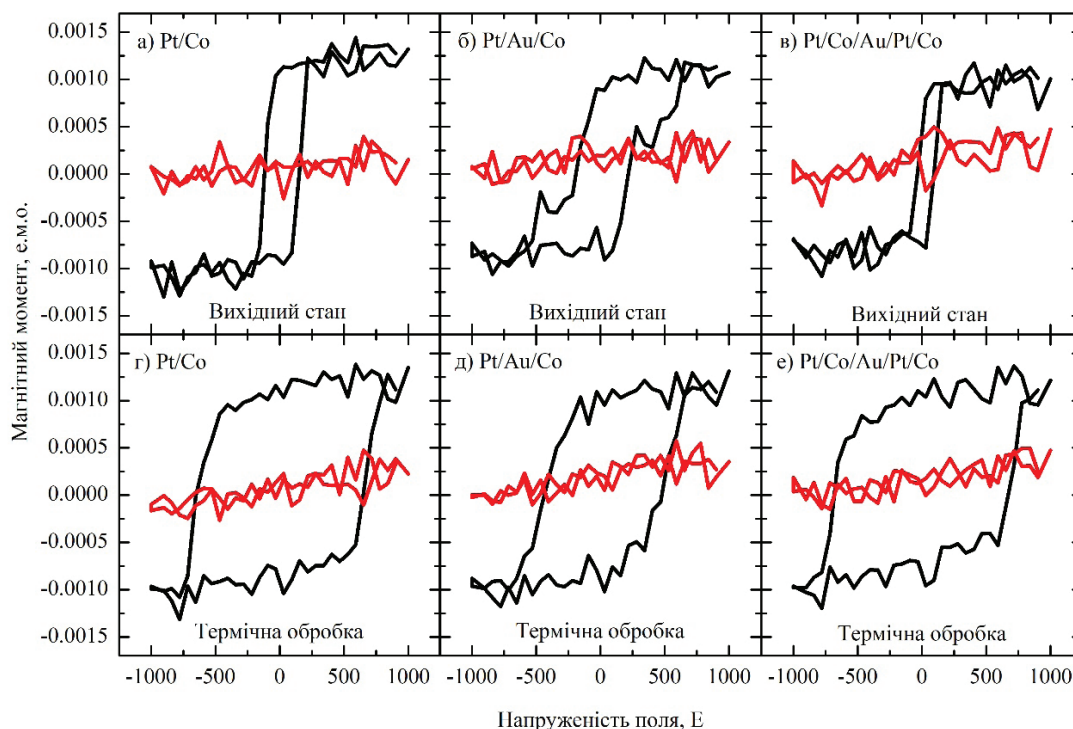


Рис. 4. Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI (а, г), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (б, д), Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI (в, е) у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури 550 °C упродовж 30 хв

зують на гомогенізацію складу плівкових композицій внаслідок термічної обробки. Характер магнітної анізотропії лишається незмінним – вісь легкого намагнічування знаходиться паралельною площині плівкових зразків (рис. 4, з, д, е). Хоча введення проміжного шару парамагнітного Au та подальша його локалізація у межах зерен, сформованих внаслідок термічної обробки фаз на основі Co-Pt, повинна сприяти пригніченню обмінної взаємодії між зернами та збільшенню коерцитивної сили [33], серед термічно оброблених плівкових композицій найменшим значенням цього параметра (461 Е) характеризується композиція Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI (рис. 5). Значення коерцитивної сили двошарової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI є проміжним та складає 648 Е, що ймовірно пов'язано з нерівномірним розподілом Co, виявленим пошаровим хімічним аналізом методом мас-спектрометрії вторинних іонів. Такий розподіл феромагнітного матеріалу призводить до формування значної магнітної неоднорідності, яка спричиняє зростання коерцитивної сили, та ймовірно пов'язана з співіснуванням у складі плівки кристалітів Co та сформованої феромагнітної фази CoPt.

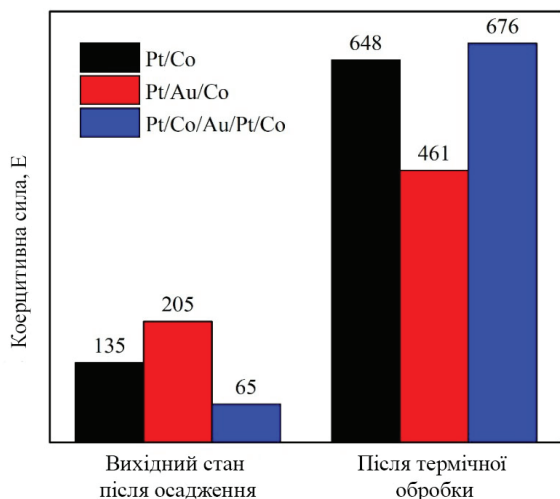


Рис. 5. Коерцитивна сила плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм)/PI, Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI у вихідному стані після осадження та після відпалу у вакуумі за температури 550 °C упродовж 30 хв

References

- [1] A. Hafarov *et al.*, “L10 ordered thin films for spintronic and permanent magnet applications”, *Modern Magnetic and Spintronic Materials. NATO Sci. Peace Secur. B: Phys. Biophys.*, 2020, pp. 73–94. doi.org/10.1007/978-94-024-2034-0_4
- [2] A.E. Hafarov *et al.*, “Nanoscale Materials for State-of-the-Art Magnetic Memory Technologies”, *Uspehi Fiziki Metallov*, 2021, vol. 22, no. 2. pp. 175–203. URL: <https://doi.org/10.15407/ufm.22.02.175>

Хоча у вихідному стані плівкова композиція Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI характеризується найменшою порівняно з іншими дослідженими композиціями коерцитивною силою, внаслідок термічної обробки її значення зростає до 676 Е (рис. 5). Імовірною причиною такого зростання є те, що по чергове нанесення шарів Pt та Co і збільшення кількості меж поділу за збереження сталою загальною товщиною плівкової композиції сприяє гомогенізації складу плівкової композиції та формуванню феромагнітної фази CoPt. Розподіл Au, виявлений методом мас-спектрометрії вторинних іонів, у плівковій композиції Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм)/PI відрізняється від того, що зафіксовано для композиції Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм)/PI, що вказує на можливий вплив і цього чинника на значення коерцитивної сили.

Висновки

Досліджено закономірності перебігу термічно-індукованих структурно-фазових перетворень та їх вплив на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co з додатковим шаром Au і різною кількістю міжшарових меж поділу, осаджених на гнучкі підкладки полііміду. Встановлено, що термічна обробка нанорозмірних композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), Pt(10 нм)/Au(4 нм)/Co(10 нм) та Pt(5 нм)/Co(5 нм)/Au(4 нм)/Pt(5 нм)/Co(5 нм) на підкладках полііміду за температури 550 °C упродовж 30 хв. дозволяє досягти магнітно-твердого стану плівкового матеріалу, при цьому його коерцитивна сила виявляє виражену залежність від структури вихідної композиції – наявності додаткового шару Au та кількості міжшарових меж поділу. Ці результати представляють практичний інтерес для формування новітніх матеріалів, перспективних для практичного використання в сучасних високих технологіях «гнучкої» наноелектроніки.

Подяка

Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи за фінансової підтримки МОН України (Державний реєстраційний номер: 0123U101257).

- [3] D. Araki *et al.*, “Ultrathin CoPt alloy films with fcc (111) orientation and perpendicular magnetic anisotropy fabricated by electrodeposition”, *Electrochemistry Communications*, 2025, pp. 107938. URL: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2025.107938>
- [4] G.D. Yüzüak, “Modifying the magnetic characteristics of ferrimagnetic TbFeCo by adjusting the thickness of the L11-ordered CoPt”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1020, pp. 179366. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179366>
- [5] R. Walia *et al.*, “Swift heavy ions induced transformations in the structural and magnetic properties of Co/Pt multilayer thin films for magnetic storage”, *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, pp. 113376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113376>
- [6] R. Toyama *et al.*, “Large anomalous Nernst conductivity of L10-ordered CoPt in CoPt composition-spread thin films”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, vol. 57, no. 40. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad460e>
- [7] T. Thi Be Lan *et al.*, “Huge Giant-Magnetoresistance of Co/Ru/L11-CoPt Multi-layer Pseudo-Spin Valve”, *Journal of Alloys and Compounds*, 25 March 2023, vol. 938, pp. 168441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168441>
- [8] S. Qiu *et al.*, “Magneto-transport properties of perpendicular magnetization CoPt/VO2 bilayer films grown on glass substrate”, *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 436, pp. 128312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128312>
- [9] T. Fan *et al.*, “Ultrahigh efficient spin orbit torque magnetization switching in fully sputtered topological insulator and ferromagnet multilayers”, *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06779-3>
- [10] Y.N. Dong *et al.*, “Room temperature manipulation of exchange bias in magnetic heterojunctions”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, vol. 559, pp. 169546. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169546>
- [11] A. Mahendra *et al.*, “Tailoring of magnetic anisotropy by ion irradiation for magnetic tunnel junction sensors”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 910, pp. 164902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164902>
- [12] S. Gupta *et al.*, “Approaching barrier-free contacts to monolayer MoS2 employing [Co/Pt] multilayer electrodes”, *NPG Asia Materials*, 2021, vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41427-021-00284-1>
- [13] R. Pedan *et al.*, “Homogenization and short-range chemical ordering of Co-Pt alloys driven by the grain boundary migration mechanism”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, vol. 55, no. 40, pp. 405004. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8204>
- [14] G. Basina *et al.*, “Low-Platinum-Content Exchange-Coupled CoPt Nanoalloys with Enhanced Magnetic Properties”, *Nanomaterials*, 2024, vol. 14, no. 6, 13 p. URL: <https://doi.org/10.3390/nano14060482>
- [15] Z.W. Li *et al.*, “Microstructure and Magnetic Properties of Exchange-Coupled Co72Pt28/Pt/Co81Ir19 Composite Media for Perpendicular Magnetic Recording”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2019, vol. 32, no. 7, pp. 2229–2233. URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4953-8>
- [16] W. Li *et al.*, “Primitive exchange coupling in CoPt/MnN layered structures: Exchange coupling established during deposition”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 538, pp. 168331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168331>
- [17] T. Thi Be Lan *et al.*, “Huge Giant-Magnetoresistance of Co/Ru/L11-CoPt Multi-layer Pseudo-Spin Valve”, *Journal of Alloys and Compounds*, 25 March 2023, vol. 938 P. 168441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168441>
- [18] Y. Liu *et al.*, “Efficient Orbitronic Terahertz Emission Based on CoPt Alloy”, *Advanced Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202404174>
- [19] L. Yang *et al.*, “Field-Free Memristive Spin–Orbit Torque Switching in Al CoPt Single Layer for Image Edge Detection”, *Advanced Electronic Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/aelm.202300885>
- [20] J. Szhyvys *et al.*, “CoPt/TiN films nanopatterned by RF plasma etching towards dot-patterned magnetic media”, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 435, pp. 31–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.062>
- [21] J. Ewing *et al.*, “High-current-density electrodeposition using pulsed and constant currents to produce thick CoPt magnetic films on silicon substrates”, *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 5, P. 056711. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5007272>
- [22] H. An *et al.*, “Highly (001) oriented L10-CoPt/TiN multilayer films on glass substrates with perpendicular magnetic anisotropy”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2015, vol. 33, no. 2, P. 021512. URL: <https://doi.org/10.1116/1.4905847>
- [23] A.-C. Sun *et al.*, “Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substrates: Formation of the L11 phase”, *Scripta Materialia*, 2009, vol. 61, no. 7, pp. 713–716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.06.011>
- [24] A.-C. Sun, “Huang C.-F. Microstructure study of CoPt thin film with phase change from Al → L11 → Al → L10”, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 17, P. 17C110. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4799526>
- [25] Y.J. Zhang *et al.*, “Effects of annealing temperature, atomic composition, film thickness on structure and magnetic properties of CoPt composite films”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 2, pp. 326–331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.020>
- [26] T. Young Lee *et al.*, “High post-annealing stability in [Pt/Co] multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 21, P. 216102. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4809130>
- [27] S.T. Lim *et al.*, “Effect of different seed layers with varying Co and Pt thicknesses on the magnetic properties of Co/Pt multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 17, P. 17A731. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4916295>

- [28] A. Markou *et al.*, “Formation of L10 with (001) texture in magnetically annealed Co/Pt multilayers”, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 110, no. 8, P. 083903. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3651380>
- [29] R. Toyama *et al.*, “Formation of L10-ordered CoPt during interdiffusion of electron-beam-deposited Pt/Co bilayer thin films on Si/SiO₂ substrates by rapid thermal annealing”, *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, no. 6, P. 066101. URL: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab934a>
- [30] D.L. Beke *et al.*, “Interdiffusion along grain boundaries – Diffusion induced grain boundary migration, low temperature homogenization and reactions in nanostructured thin films”, *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 98, P. 625–674. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.07.001>
- [31] I.A. Vladymyrskyi *et al.*, “Low-temperature formation of the FePt phase in the presence of an intermediate Au layer in Pt / Au / Fe thin films”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 49, no. 3, P. 035003. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/3/035003>
- [32] G.L. Katona *et al.*, “Diffusion and solid state reactions in Fe/Ag/Pt and FePt/Ag thin-film systems”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 17, P. 175001. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/17/175001>
- [33] R. Pedan *et al.*, “Low-temperature diffusion in thin-film Pt-(Au-)-Co heterostructures: a structural and magnetic characterization”, *Nanotechnology*, 2024, URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad22a8>
- [34] P. Makushko *et al.*, “Flexible Magnetoreceptor with Tunable Intrinsic Logic for On-Skin Touchless Human-Machine Interfaces”, *Advanced Functional Materials*, 2021, vol. 31, no. 25, P. 2101089. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202101089>
- [35] X. Bao *et al.*, “Flexible Exchange-Biased Films with Superior Strain Stability”, *Advanced Functional Materials*, 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202409844>
- [36] W.B. Pearson and G.V. Raynor, “Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys: International Series of Monographs on Metal Physics and Physical Metallurgy”, vol. 4, *Elsevier Science & Technology Books*, 2013.

Pedan R.V., Dubikovskiy O.V., Bodnaruk A.V., Kruhlov I.O., Yavorskyi Yu.V., Vladymyrskyi I.A.

STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS AND MAGNETIC PROPERTIES OF Pt/Co-BASED NANOSCALE THIN FILM COMPOSITIONS DEPOSITED ON FLEXIBLE POLYMER SUBSTRATES

Background. Ferromagnetic Pt/Co -based nanofilms remain a focal point of interest owing to their potential applications in spintronics and nanoelectronics. These films combine distinctive magnetic properties, exceptional corrosion resistance, and compatibility with modern technologies utilized in magnetic information storage devices and electromagnetic radiation detection. Pt/Co films are studied and applied as materials for sensors, tunnel junctions, magnetic disks, THz generators, and skyrmion carriers. Investigating the formation of their properties is a key task for advancing nanoelectronic technologies.

Objective. The paper aims to assess the alterations in phase composition, depth distribution of chemical elements, and magnetic properties of Pt/Co-based nanofilm compositions deposited on flexible polyimide substrates and subsequently subjected to heat treatment in a high-vacuum environment, while incorporating Au interlayers and forming varying numbers of interfacial boundaries.

Methodology. Pt/Co/PI, Pt/Au/Co/PI, and Pt/Co/Au/Pt/Co/PI nanofilms were deposited on flexible polyimide substrates using magnetron sputtering at ambient temperature. After deposition, the samples were annealed in vacuum at 550 °C for 30 minutes. Structural and phase changes were studied using X-ray diffraction (XRD) and mass spectrometry, while magnetic properties were examined using vibrating sample magnetometry (VSM) in an external magnetic field.

Results. It has been established that annealing nanoscale compositions at a temperature of 550 °C for 30 minutes leads to the formation of very small crystallites, most likely associated with the relaxation of stresses that arise in the film compositions during deposition. Mass spectrometry results indicate that annealing results in a uniform distribution of the intensity of secondary ion emission from the constituent metals of the film compositions, as well as from the complex Co/Pt ion, which points to the homogenization of the film compositions' structure as a consequence of annealing. Magnetic property studies have shown that annealing enables the formation of a magnetically hard state in the film material, while its coercivity demonstrates a pronounced dependence on the initial structure of the composition.

Conclusions. It has been established that thermal treatment of nanoscale compositions Pt(10 nm)/Co(10 nm), Pt(10 nm)/Au(4 nm)/Co(10 nm), and Pt(5 nm)/Co(5 nm)/Au(4 nm)/Pt(5 nm)/Co(5 nm) deposited on polyimide substrates at 550 °C for 30 minutes allows achieving a magnetically hard state in the film material. At the same time, its coercivity shows a strong dependence on the structure of the initial composition specifically, the presence of an additional Au layer and the number of interlayer interfaces.

Keywords: nanoscale film composition; flexible polymer substrate; XRD, mass spectrometry; magnetization; coercivity.

Рекомендована Радою
навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання імені Є.О. Патона КНУ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
21 червня 2025 року

Прийнята до публікації
04 серпня 2025 року