

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

«На правах рукопису»
УДК 621.793:539.216.2:538.975

До захисту допущено:
Завідувач кафедри ФМТО
_____ Мирослав КАРПЕЦЬ
«__» _____ грудня 2024 р.

**Магістерська дисертація
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Вплив комплексної іонної та термічної обробки на структурно-фазові
перетворення та магнітні властивості нанорозмірних плівкових
композицій Pt/Co»**

Виконав:
здобувач ВО 2 курсу групи НМ-31мп Нудченко В.І.

Науковий керівник:
проф. каф. ФМТО, д.ф.-м.н., ст. досл. Владимирський І. А.

Консультант з наукової частини:
мол. наук. сп. Педань Р. В.

Консультант з розділу охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях:
зав. каф. ПГМ, д.т.н., професор Левченко О.В.

Консультант з розділу розробка стартап-проекту:
доцент, к.е.н. Нараєвський С.В.

Консультант з нормоконтролю:
ст. викл. каф. ФМТО Шаповалова Н.А.

Рецензент:
д.т.н., професор Мініцький А.В.

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.
Здобувач ВО _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мирослав КАРПЕЦЬ

«___» грудня 2024р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію здобувачу ВО
Нудченко Владиславу Ігоровичу

1. Тема дисертації «Вплив комплексної іонної та термічної обробки на структурно-фазові перетворення та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co», науковий керівник дисертації Владимирський Ігор Анатолійович д.ф-м.н., ст.досл., затверджені наказом по університету від 08.11.2024р. № 5021-с.
2. Термін подання здобувачем ВО дисертації: _____.
3. Об'єкт дослідження: структурно-фазові зміни та зміни магнітних властивостей у нанорозмірних плівкових композиціях на основі Pt/Co, індуковані комплексною попередньою іонною та наступною термічною обробкою.
4. Вихідні дані до завдання: зразки тонких плівок Co/Pt, результати експериментів за використаними методиками, науково-технічна література.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розрахувати та проаналізувати дані за методиками, що використовуються в роботі; зробити загальні висновки з приводу структурно-фазових перетворень і зміни магнітних властивостей у нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Co.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 91 сторінка, 36 рисунків, 15 таблиць, 1 презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.В, зав. каф. ПГМ, д.т.н., професор		
Розробка стартап - проекту	Нараєвський С.В, доцент, к.е.н.		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А, ст. викл. каф. ФМТО		

9. Дата видачі завдання 02.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд технічної та наукової літератури за темою дисертації	02.09.2024 р. – 22.09.2024 р.	виконано
2	Вибір та ознайомлення з методиками для досліджень за темою дисертації	23.09.2024 р. – 06.10.2024 р.	виконано
3	Розрахунок та аналіз даних результатів експериментів за використаними методиками	07.10.2024 р. – 27.10.2024 р.	виконано
4	Формування розділів «Охорона праці» та «Розробка стартап-проекту»	28.10.2024 р. – 21.11.2024 р.	виконано
5	Оформлення магістерської дисертації та презентації для її захисту	22.11.2024 р. – 11.12.2024 р.	виконано
6	Підготовка до захисту магістерської дисертації	02.12.2024 р. – 16.12.2024 р.	виконано
7	Попередній захист магістерської дисертації	10.12.2024 р.	виконано
8	Захист магістерської дисертації	17.12.2024	виконано

Здобувач ВО

Науковий керівник

Владислав НУДЧЕНКО

Ігор ВЛАДИМИРСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 91 сторінка, 36 рисунків, 15 таблиць, 55 літературних джерел.

ІОННА ОБРОБКА, МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ, СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ

Об'єкт досліджень: нанорозмірні плівкові композиції на основі Pt/Co, осаджені на підкладинки Si(001) з поверхневим шаром SiO₂ методом магнетронного розпорошення.

Предмет дослідження: структурно-фазові зміни у нанорозмірних плівкових композиціях на основі Pt/Co, індуковані комплексною попередньою іонною та наступною термічною обробкою.

Мета роботи: виявлення впливу комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки на перебіг дифузійних процесів, структурно-фазових перетворень та зміну магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co.

Методи дослідження: мас-спектрометрія вторинних іонів, рентгеноструктурний фазовий аналіз, вібраційна магнітометрія.

Результати досліджень та їх новизна: встановлено, що комплексна попередня іонна та наступна термічна обробка є ефективним методом впливу на структурно-фазовий стан і магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co.

Сфера застосування: матеріали для магнітних носіїв інформації надщільного запису, мікро- та наноелектроніка, матеріали функціональних шарів пристроїв спінтроніки.

ABSTRACT

Master dissertation: 91 pages, 36 figures, 15 tables, 55 references.

ION TREATMENT, MAGNETIC PROPERTIES, STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS, HEAT TREATMENT, THIN FILM COMPOSITIONS

Object of research: nanoscale film compositions based on Pt/Co deposited on Si(001) substrate with a surface layer of SiO₂ by magnetron sputtering.

Subject of research: structural and phase changes in nanoscale film compositions based on Pt/Co.

Purpose of the study: to investigate the effect of ion and thermal treatment on the diffusion processes, structural and phase transformations and changes in the magnetic properties of nanoscale film compositions based on Pt/Co.

Research methods: secondary-ion mass spectrometry, X-ray diffraction phase analysis, VSM magnetometry.

Research results and novelty: it has been established that the combined preliminary ion treatment and subsequent thermal processing is an effective method for influencing the structural-phase state and magnetic properties of nanoscale film compositions based on Pt/Co.

Field of application: materials for magnetic information storage media with ultra-high density recording, micro- and nanoelectronics, and materials for functional layers of spintronic devices.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Фазоутворення у двокомпонентній системі Co-Pt.....	11
1.2 Вплив іонної обробки на структурні перетворення і магнітні властивості тонких плівок Co-Pt.....	12
1.3 Висновки до розділу 1	23
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	24
2.1 Плівкові об'єкти досліджень.....	24
2.2 Методика магнетронного розпорошення тонких плівок.....	24
2.3 Іонна обробка тонких плівок.....	26
2.4 Термічна обробка тонких плівок у вакуумі	27
2.5 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних іонів.....	27
2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	29
2.7 Вібраційна магнітометрія	30
2.8 Висновки до розділу 2	32
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	33
3.1 Закономірності перерозподілу компонентів за товщиною плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) під впливом іонної та термічної обробки.....	33
3.2 Термічно- та іонно-індуковані структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм).....	38
3.2.1 Фазові зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після іонної обробки без наступної термічної обробки	38
3.2.2 Структурні зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після іонної обробки без наступної термічної обробки	40
3.2.3 Фазові зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки	43

3.2.4 Структурні зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки	45
3.3 Зміна магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) в результаті іонної та термічної обробки	48
3.4 Висновки до розділу 3	56
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
4.1 Аналіз параметрів приміщення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	57
4.2 Освітлення в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	58
4.2.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	58
4.2.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	59
4.3 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)	60
4.3.1 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М	61
4.3.2 Безпека при роботі з електричними приладами в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	63
4.3.3 Вплив шуму та вібрацій в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	64
4.3.4 Мікроклімат робочої зони в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	65
4.4 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	67
4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях	67
4.5.1 Пожежна безпека в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	68
4.5.2 Алгоритм дії у випадку повітряної тривоги під час роботи в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства	69
4.6 Висновки до розділу 4	70
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	72
5.1 Опис ідеї стартап-проєкту	72

	8
5.2 Аналіз техніко-економічних переваг ідеї.....	73
5.3 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	74
5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту.....	75
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту.....	81
5.6 Висновки до розділу 5	82
ВИСНОВКИ.....	83
CONCLUSIONS.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ат. % – атомні відсотки;

НПК – нанорозмірна плівкова композиція;

ВУП – вакуумний універсальний пост;

ВІМС – вторинна іонна мас-спектрометрія;

РСФА – рентгеноструктурний фазовий аналіз;

ОКР – область когерентного розсіювання;

НДР – науково-дослідна робота;

КПО – коефіцієнт природного освітлення;

ШНВФ – шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

MRAM – магніторезистивна пам'ять з довільним доступом
(magnetoresistive random-access memory);

НДДКР – науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи.

ВСТУП

Іонна обробка тонких плівок є однією з найперспективніших технологій, що використовуються для модифікації фізичних та хімічних властивостей матеріалів у сучасному матеріалознавстві. Зокрема, іонна обробка дозволяє контролювати такі параметри, як кристалічна структура, поверхнева морфологія, магнітні та електричні властивості тощо. Серед різних матеріалів, які піддаються іонній обробці, особливий інтерес викликають тонкі плівки на основі Co-Pt, які демонструють унікальні магнітні характеристики, зокрема високу коерцитивну силу та стабільність магнітного стану, що робить їх перспективними кандидатами для магнітних накопичувачів даних та магнітних систем запису з надвисокою щільністю, пристроїв спінтроніки та інших високих технологій, в яких подібні характеристики є затребуваними. Проте, для оптимізації властивостей плівкових матеріалів на основі Co-Pt необхідно ретельне вивчення впливу різних методів обробки, серед яких важливе місце займають іонна імплантація та термічний вплив. Іонна обробка дозволяє не лише змінювати поверхневу та об'ємну структуру плівок, але й впливати на дифузійні процеси, фазові перетворення та розподіл домішок. Відомо, що іонне опромінення може спричиняти аморфізацію, кристалізацію або зміни у кристалічній орієнтації плівок, що, у свою чергу, впливає на магнітні характеристики. Однак, незважаючи на великий інтерес до цього питання, залишається багато невирішених задач, пов'язаних з механізмами впливу іонної обробки на нанорозмірні структури та, зокрема, на властивості плівок Co-Pt, що підтверджує актуальність цієї роботи. Основною метою даного дослідження є встановлення кореляції між параметрами іонної та термічної обробки та закономірностями перебігу дифузійних процесів, структурно-фазових перетворень та магнітними властивостями тонких плівок Co-Pt.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Фазоутворення у двокомпонентній системі Co-Pt

Діаграма стану системи Co-Pt (рис. 1.1), яка відображає термодинамічну фазову рівновагу, типову для масивного стану, представлено на рис. 1.1.

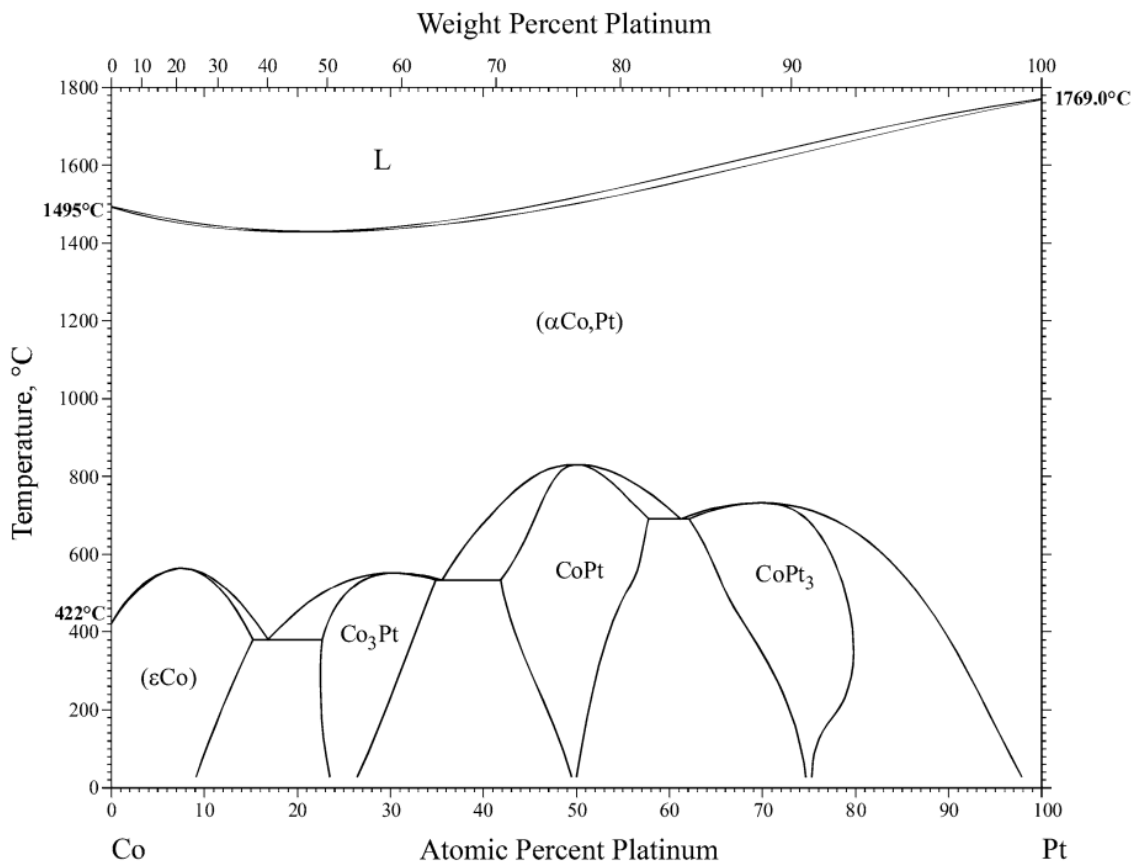


Рисунок 1.1 – Діаграма стану термодинамічної рівноваги системи Co-Pt [1]

За еквіатомної концентрації у системі Co-Pt присутня високотемпературна рідка фаза, що існує за температур вище ≈ 820 °C та впорядкована фаза Ll_0 -CoPt, що існує за температур ≈ 15 °C – 800 °C, яка має гранецентровану тетрагональну кристалічну ґратку з просторовою групою $P4/mmm$ та не являється стехіометричною сполукою, маючи область однорідності в концентраційному інтервалі 42 ат. % – 57,5 ат. % Pt [1]. Ця фаза є магнітно-твердою та характеризується вираженою одновісною анізотропією і високою коерцитивною

силою, а також значною залишковою намагніченістю. Велика магнітокристалічна анізотропія сплавів CoPt разом з їх хімічною та термічною стабільністю і корозійною стійкістю робить їх придатними для пристроїв спінтроніки і запису надвисокої щільності [2-4]. Окрім цієї фази на діаграмі стану спостерігаються й інші фази, а саме неупорядковані фази $A1$ -CoPt, $A3$ -CoPt, та упорядковані фази $L1_2$ -Co₃Pt і $L1_2$ -CoPt₃, які також мають перспективи широкого практичного використання [1, 3]. Серед них викликає інтерес фаза $A1$ -CoPt, яка існує в області повного розчинення за високих температур і має гранецентровану кубічну неупорядковану кристалічну структуру у всьому концентраційному діапазоні твердих розчинів і характеризується малою магнітною анізотропією [3]. Саме вона зазвичай спостерігається у стані після осадження тонких плівок і є вихідною для отримання фази $L1_0$ -CoPt шляхом термічного відпалу або інших методів ініціалізації дифузійних процесів [2-4]. Таким чином, в процесі відпалу, який забезпечує надання матеріалу енергії, необхідну для змін кристалічної структури, відбувається фазовий перехід $A1$ -CoPt $\rightarrow$ $L1_0$ -CoPt, а кінетика цих екзотермічних перетворень стає сприятливою за температури близько 250 °C [5]. Не зважаючи на те, що термічна обробка необхідної для перебігу фазових перетворень, не передбачається існування чіткої термодинамічної межі, яку необхідно подолати для утворення упорядкованої фази $L1_0$ -CoPt.

1.2 Вплив іонної обробки на структурні перетворення і магнітні властивості тонких плівок Co-Pt

Іонна обробка тонких плівок – це процес, що включає в себе бомбардування поверхні плівок іонами, зазвичай з метою зміни їхньої структури та властивостей. Вплив іонів з різними масами та енергіями активно використовувався протягом останніх десятиліть для ряду завдань, включаючи розробку різноманітних пристроїв, покращення матеріалів, синтез і модифікацію властивостей наноструктур і низькорозмірних матеріалів, зміни плинності

деформацій, ініціювання фазових перетворень та моделювання поведінки матеріалів в екстремальних радіаційних умовах [6, 7]. Вплив іонного пучка на матеріали визначається енергією іонів, дозою випромінювання та типом іонів [8]. Взаємодія іонів з матеріалом є ключовим фактором у процесі модифікації параметрів структури та властивостей. У випадку тонких плівок Co-Pt такі процеси можуть бути застосовані для модифікації їх магнітних, електричних або хімічних властивостей шляхом впливу на закономірності перебігу дифузійних процесів та викликаних такою обробкою структурних перетворень [9-19].

Так, у роботі [9] досліджувався вплив зміни структури плівкової композиції Pt(5 Å)/Co(13 Å)/Pt(23 Å), отриманої на монокристалічні підкладки Al_2O_3 методом магнетронного розпорошення зі швидкістю приблизно 0,02 нм/с, внаслідок обробки іонами He^+ з дозами до 3×10^{16} іонів/см² та енергією 30 кеВ. Авторами встановлено, що обробка має різний вплив на верхню і нижню межі розділу плівкової системи, що впливає на магнітні властивості. Так, на верхній границі розділу Pt/Co спостерігаються переважно короткі, в межах однієї міжатомної відстані, зміщення атомів за глибиною плівки, які призводять до збільшення шорсткості верхнього інтерфейсу, що зменшує магнітну анізотропію. В той самий час, атоми на нижній границі поділу проходять більше міжатомних відстаней і спостерігається більш виражений ефект дифузійного перемішування, що призводить до утворення фази CoPt (рис. 1.2).

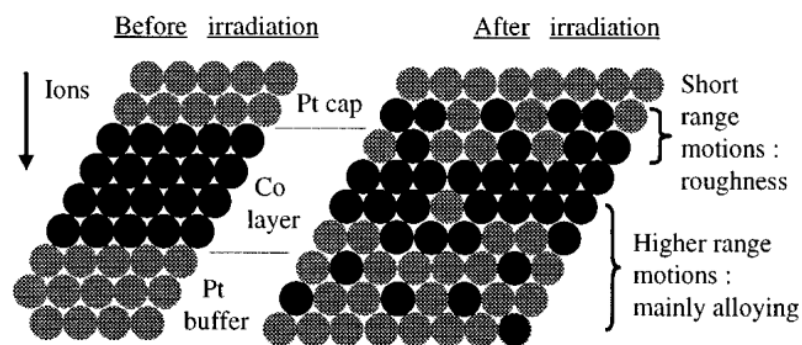


Рисунок 1.2 – Схема структури тонких плівок Pt(5 Å)/Co(13 Å)/Pt(23 Å) до та після іонної обробки [9]

Також автори стверджують, що за малих доз випромінювання (до 10^{16} іонів/см²) зменшення магнітної анізотропії може бути пов'язане переважно з зменшенням напружень у шарі Co та через початкове збільшення шорсткості верхньої межі поділу. При збільшенні дози обробки ці ефекти посилюються, що призводить до зменшення загального рівня магнітної анізотропії в плівках Pt/Co/Pt. Хоча автори не зазначають, як дифузійні процеси у нижній границі поділу впливають на зміну магнітної анізотропії, можна припустити, що формування фази CoPt внаслідок дифузійного перемішування також має свій внесок у магнітні властивості досліджуваної плівкової системи.

У роботі [11] досліджено перехід від площинної до перпендикулярної магнітної анізотропії у нанорозмірних структурах Pt(20 нм)/Co(3,3 нм)/Pt(5 нм), вирощених методом молекулярно-променевої епітаксії на підкладинці Al₂O₃ з буферним шаром Mo, оброблених іонами Ga⁺ з дозою до 1×10^{16} іонів/см² та енергією 30 кеВ. Дослідження засвідчили перебіг дифузійних процесів між атомами Pt і Co внаслідок іонної обробки та сегрегацію Co на поверхні плівки з його подальшим окисненням. Також виявлено, що спочатку Co розподілявся у вигляді відокремлених пластин усередині матриці Pt за дози іонів 1×10^{15} іонів/см², які в результаті збільшення дози до 1×10^{15} іонів/см² ділилися на кластери діаметром декілька ангстрем (рис. 1.3), що індукує зміну у досліджуваних зразках типу анізотропії від площинної до перпендикулярної.

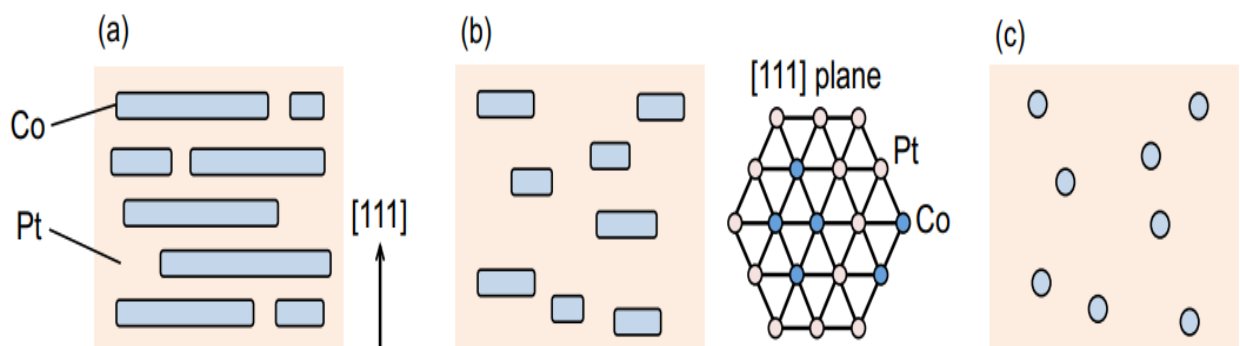


Рисунок 1.3 – Ілюстрація зміни структури тонких плівок Pt(20 нм)/Co(3,3 нм)/Pt(5 нм) в залежності від дози іонів [11]

Також відзначається, що зміна анізотропії за менших доз обробки відбувається через деформацію структури шару Co, що веде до посилення напруженого стану, а за більших доз – через описане вище явище утворення кластерів, і, відповідно, ефекту форми.

У роботі [12] досліджувалась залежність коерцитивної сили зразків Pt(20 Å)/[Pt(10 Å)/Co(3 Å)]₁₀/Pt(200 Å)/SiN/Si, що були оброблені іонами Ar⁺ та He⁺ з енергією 20 кеВ, іонами Ga⁺ з енергією 30 кеВ та іонами Ar⁺ і He⁺ з енергіями 2 МеВ і дозами 10¹¹ іонів/см² – 10¹⁷ іонів/см². Дослідження засвідчили тенденцію до зменшення коерцитивної сили зі збільшенням дози обробки водночас зі зменшенням перпендикулярної анізотропії для всіх зразків (рис. 1.4). Отримані результати автори пов'язують з дифузійним перемішуванням на границях розділу у досліджуваних зразках.

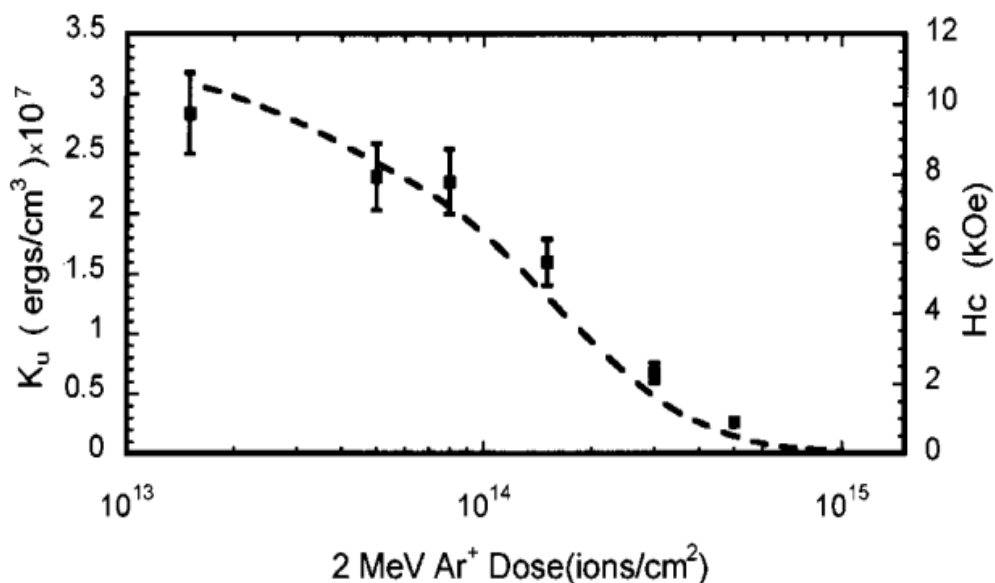


Рисунок 1.4 – Залежності перпендикулярної анізотропії та коерцитивної сили багат шарових зразках Co/Pt від дози іонів Ar⁺ з енергією 2 МеВ [12]

У роботі [14] досліджувались нанорозмірні системи Pt(4,5 нм)/Co(3,5 нм)/Pt(3,5 нм), отримані методом розпорошення на сапфірову підкладку з подальшою обробкою іонами Ga⁺ з дозами до 7 × 10¹⁴ іонів/см². Зокрема, вивчалася зміна магнітних та структурних властивостей внаслідок такої

обробки. Дослідження дозволили виявити, що за дози іонів $1,1 \times 10^{14}$ іонів/см² відбувається збільшення на 4,8 % внутрішньоплощинної сталої ґратки Co, у той час як позаплощинна змінюється лише на 2,4 %. Це призводить до значної деформації структури шару Co, що індукує виникнення перпендикулярної магнітної анізотропії. В результаті збільшення дози спостерігається зникнення перпендикулярної магнітної анізотропії, що автори пов'язують з розширенням позаплощинного періоду ґратки Co до 5,0 %, що створює майже ізотропну структуру шару. Варто відзначити, що результати дослідження методом рентгенівської абсорбційної спектроскопії вказують на перемішування атомів Co та Pt за товщиною плівки внаслідок іонної обробки.

В дослідженні [15] вивчається вплив обробки іонами He⁺ на дифузійне перемішування атомів та структуру багатошарової плівкової системи Ta(3 нм)/Co₂₀Fe₆₀B₂₀(1,9 нм)/Pt(3,5 нм)/MgO(1 нм). Плівкові зразки оброблено іонами He⁺ з фіксованою енергією 40 кеВ і дозами до 4×10^{16} іонів/см². Встановлено, що за доз обробки до 1×10^{16} іонів/см² магнітна анізотропія зменшується приблизно на 32 % водночас зі зменшенням намагніченості насичення приблизно на 4 %, що може бути пов'язано з ініціалізацією дифузійних процесів в системі. Зокрема, припускається, що іонна обробка сприяє перемішуванню Pt з магнітними компонентами системи (рис. 1.5), що призводить до виникнення додаткових асиметричних обмінних взаємодій в плівковій композиції.

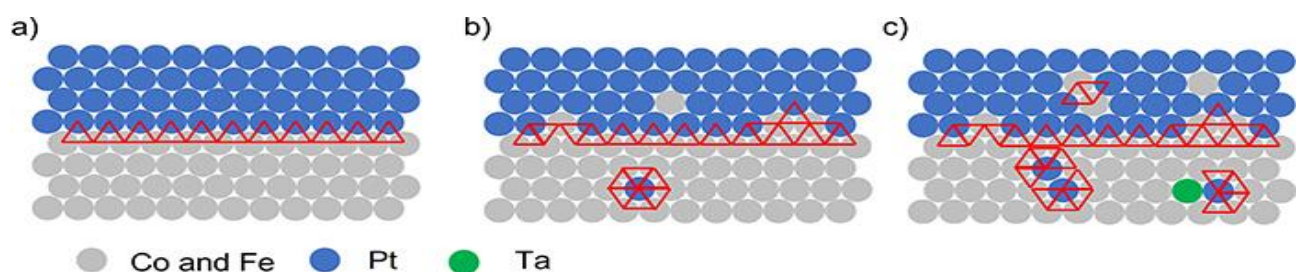


Рисунок 1.5 – Схема структури тонких плівок [15]

Дослідження [16] проведено з метою вивчення впливу бомбардування іонами різних енергій і доз на магнітні властивості шаруватої системи Ir/Co/Pt. Для цього тришарові системи Ir(30 нм)/Co(0,8 нм)/Pt(5 нм) нанесено на термічно-оxygenні підкладки Si, вкриті проміжним шаром Ti(4 нм)/Au(30 нм), з використанням методу магнетронного розпорошення в атмосфері Ar. Плівковий зразок являв собою матрицю квадратів зі стороною 300 мкм і періодом 600 мкм. Квадрати, підготовлені таким чином, піддано рівномірному впливу сфокусованим пучком іонів Ga⁺. Дослідження засвідчили, що магнітна анізотропія може змінюватися від перпендикулярної у вихідному стані до легкоплосинної після обробки з однаковою дозою і варіюванні енергії іонів (рис. 1.6).

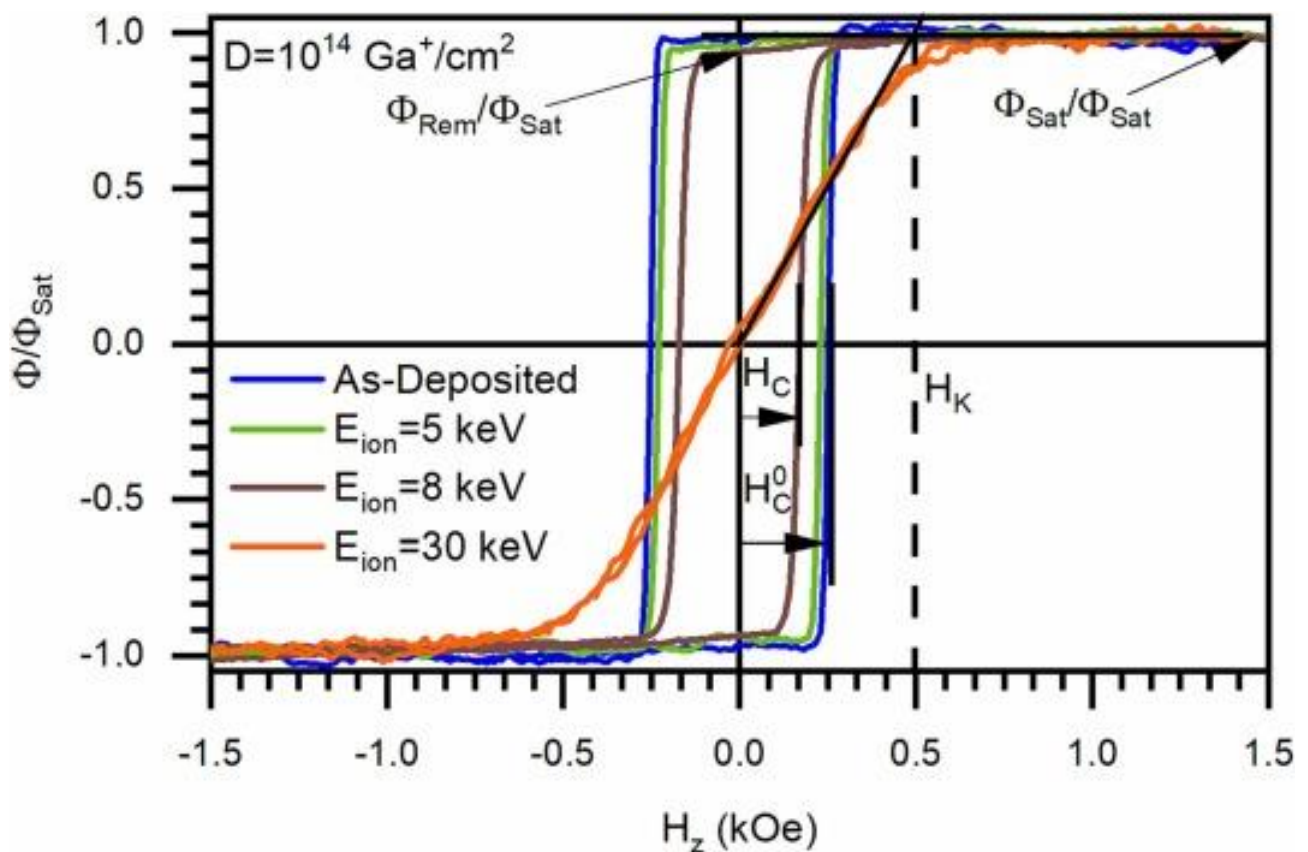


Рисунок 1.6 – Петлі гістерезису шаруватої системи Pt(30 нм)/Co(0,8 нм)/Ir(5 нм) для дози іонів 0 (синя лінія) та після бомбардування іонами Ga⁺ з дозою 10¹⁴ іонів/см² і енергіями 5 кеВ (зелена лінія), 8 кеВ (коричнева лінія) і 30 кеВ (помаранчева лінія) [16]

Однак для досягнення тих самих змін анізотропії за нижчих енергій Ga^+ потрібна вища доза. Крім того, виявлено, що перемішування компонентів системи під дією обробки іонами Ga^+ більш виражено відбувається на верхній межі поділу Co/Pt порівняно з нижньою Ir/Co . При чому, дана різниця у швидкості перемішування проявляється більш яскраво зі збільшенням дози іонів і зменшується зі збільшенням їхньої енергії.

У роботі [17] досліджено вплив обробки іонами He на магнітні властивості плівкової композиції $\text{Ta}(4,5 \text{ нм})/[\text{Pt}(4,5 \text{ нм})/\text{Co}(1,2 \text{ нм})/\text{Ta}(2,5 \text{ нм})]_{20}$. Доза випромінювання варіювалася від 2×10^{14} іонів/см² до 20×10^{14} іонів/см². Виявлено, що за збільшення дози до певного критичного значення спостерігається зменшення перпендикулярної магнітної анізотропії, перехід за критичне значення обумовлює, навпаки, збільшення даної анізотропії. Важливо відзначити, що під час досліджень автори дійшли висновку, що бомбардування іонами He^+ викликає зсув атомів в плівковому матеріалі на відстані, близькі до декількох міжатомних відстаней, що призводить до дифузійного розмиття вихідних меж розділу, що, в свою чергу, впливає на зміну магнітних властивостей. Крім того, виявлено, що намагніченість насичення залишається на постійному рівні 700 ± 70 кА/м після обробки іонами He^+ у всьому дослідженому інтервалі доз.

У роботі [19] вивчалась роль дефектів у посиленні перпендикулярної магнітної анізотропії в плівковій системі Pt/Co/Pt , індукованої обробкою іонами Ag^+ . Використовувались зразки $\text{Pt}(30 \text{ нм})/\text{Co}(0-5 \text{ нм})/\text{Pt}(5 \text{ нм})$, вирощені за допомогою молекулярно-променевої епітаксії. Іонну модифікацію зразків проводили іонами Ag^+ з дозою від 2×10^{13} іонів/см² до $1,9 \times 10^{16}$ іонів/см² і енергією 1,2 кеВ, 5 кеВ і 30 кеВ. Під час досліджень виявлено формування тетрагональної структури CoPt внаслідок іонного впливу.

В роботах [20, 21] представлено результати досліджень впливу комплексної іонної та термічної обробки на зміну структурних і магнітних властивостей плівкових систем на основі Co/Pt .

Так, у роботі [20] досліджено вплив попереднього іонного бомбардування та подальшої термічної обробки на структурні та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій Co(10 нм)/Pt(10 нм) та Pt(10 нм)/Co(10 нм), отриманих методом магнетронного розпорошення на підкладинки Si(001)/SiO₂. Під час досліджень порівнювали термічну обробку впродовж 30 хвилин у вакуумі за 550 °C та термічну обробку з такими самими параметрами, але з попереднім бомбардуванням зразків іонами Ar⁺ та N⁺ з енергією 110 кеВ і дозою 1×10^{15} іонів/см². Авторами встановлено, що обробка іонами Ar⁺ у стані після осадження без термічної обробки і незалежно від послідовності нанесення шарів досліджуваних систем приводить до дифузійного перемішування елементів, і, як наслідок, до початку формування фази *A1*-CoPt на межі поділу Pt/Co. Даного ефекту не спостерігається в результаті обробки іонами N⁺ (рис. 1.7), що може бути пов'язано з меншою атомною масою і радіусом іонів N⁺, порівняно з цими параметрами, характерних для іонів Ar⁺. В результаті термічної обробки систем після попереднього іонного впливу, термічно-індуковані дифузійні процеси сповільнюються порівняно зі зразками, підданими одностадійному відпалу. Автори доходять висновку, що наявність імплантованих іонів у системі призводить до перешкоджання атомної міграції Co і Pt під час відпалу, що, в свою чергу, відображається на магнітних властивостях тонкоплівкових систем через розміщення парамагнітної Pt між зернами феромагнітної фази *A1*-CoPt. Це, в свою чергу, обумовлює зменшення обмінного зв'язку між феромагнітними зернами та підвищення коерцитивної сили на 36-38 % порівняно зі зразками у стані після відпалу без іонної обробки. Проведені дослідження засвідчили, що початкова конфігурація нанорозмірних шарів не впливає на структурні зміни, але має істотний вплив на магнітні властивості. У плівковій системі з верхнім шаром Pt намагніченість насичення після всіх видів обробки і в стані після осадження є вищою, ніж для випадку коли Pt слугує нижнім шаром.

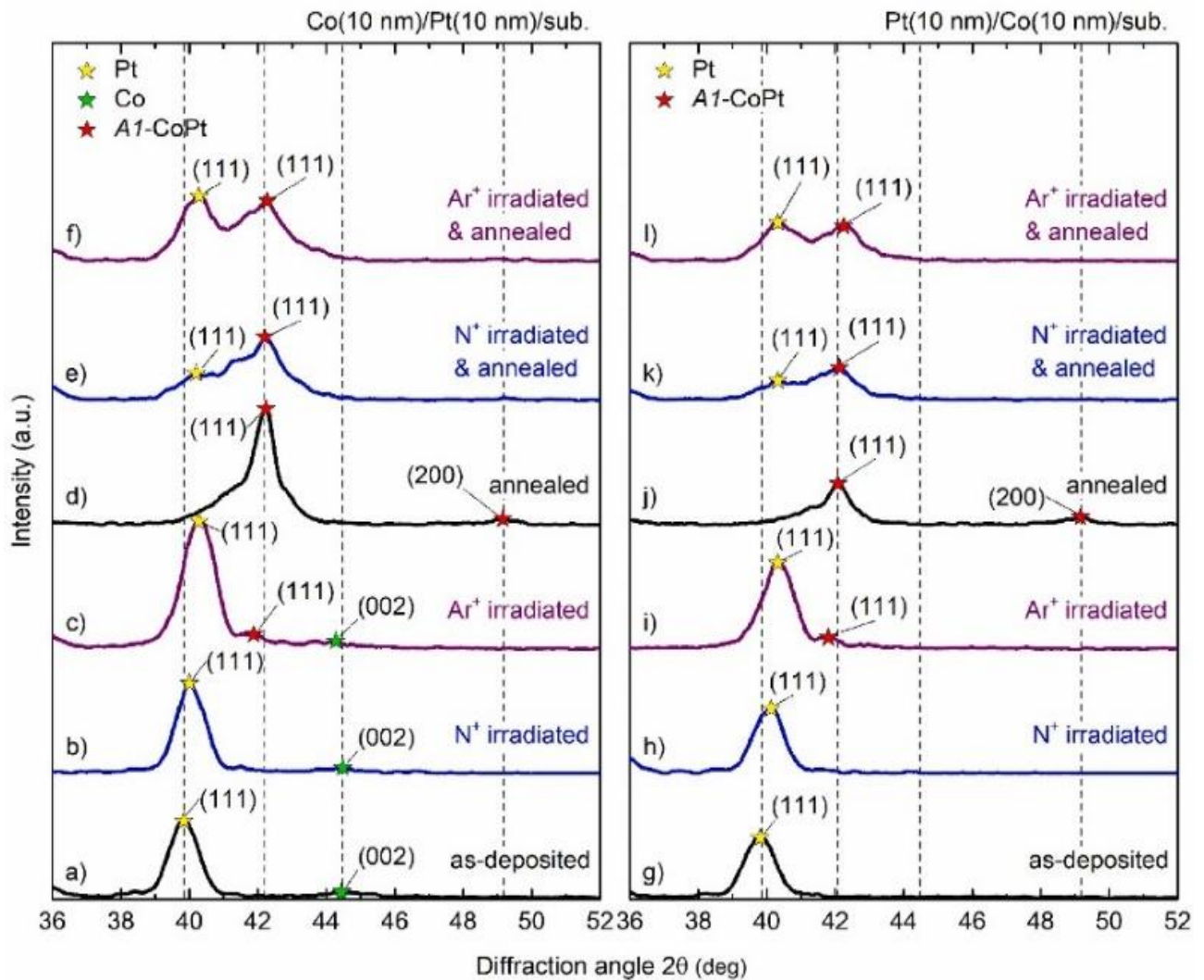
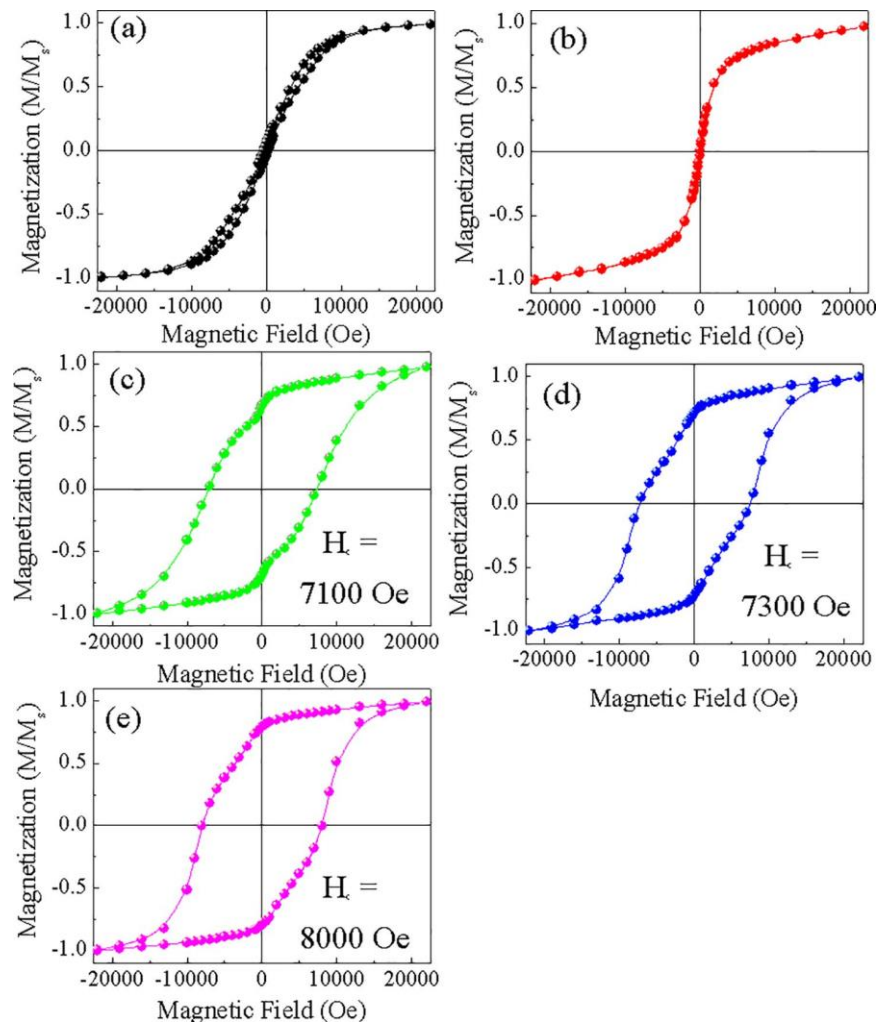


Рисунок 1.7 – Рентгенограми систем Co(10 нм)/Pt(10 нм) та Pt(10 нм)/Co(10 нм) після осадження, попередньої іонної обробки, відпалу та попередньої іонної обробки з подальшим відпалом [20]

У роботі [21] проведено термічний відпал та обробку іонами тришарових плівкових систем Pt/Co/Pt, отриманих методом магнетронного розпорошення. Після осадження плівки піддано бомбардуванню іонами O^{7+} з енергією 100 MeV за температури навколишнього середовища. Після іонної обробки плівки піддано наступному відпалу за температури 600 °C протягом 6 годин в атмосфері Ar + 5 % H_2 . Результати засвідчили, що термічна обробка призводить до розширення польових залежностей намагнічування іонно-оброблених плівок – поєднання термічної та іонної обробки приводить до підвищення коерцитивної сили (рис. 1.8).



а) після осадження, б) після іонної обробки, в) після попередньої іонної та наступної термічної обробки, г) після термічної обробки, д) після попередньої термічної та наступної іонної обробки

Рисунок 1.8 – Польові залежності намагнічування плівок [21]

При цьому відмічається, що в плівках, оброблених іонами, але не підданих термічному впливу, не відбувалося структурних або магнітних фазових переходів. Це свідчить про те, що надана іонами O^{7+} енергія виявилася недостатньою для інтенсифікації розвитку дифузійних процесів. Також автори встановили, що дифузія, зумовлена іонним впливом, сприяла рівномірному розподілу атомів за глибиною близько 50 нм для випадку плівок після комплексної обробки іонами і відпалу, що також поліпшило розподіл магнітного поля перемикавання. Після відпалу структурне впорядкування плівок посилювалося на приблизно 93 %.

Також значна кількість наукових статей присвячена розгляду зміни магнітних властивостей без акцентування уваги на взаємозв'язок зі змінами структури або дифузійними процесами [22-31].

Так, у роботі [22] досліджувався вплив обробки важкими іонами на функціональну поведінку новітніх нанорозмірних матеріалів, що характеризуються вираженим крутним моментом переносу спіну. Багатокомпонентні зразки з проміжними шарами CoPt нанесено на термічно-окиснену підкладку Si/SiO₂. Виявлено, що обробка з більшою дозою іонів впливає на магнетизм шару Co/Pt з високою стійкістю до випадкових магнітних полів і на феромагнітний обмінний зв'язок між опорним шаром і шаром Co/Pt, але магнітні властивості вільних шарів залишаються незмінними.

У роботі [25] досліджено магнітні властивості нанорозмірної плівкової системи Pt(47 Å)/[(Co(5 Å)/Pt(27 Å))₂/Co(5 Å)/Pt(22 Å)], осадженої на термічно-окиснену кремнієву підкладку, з подальшою обробкою сфокусованим іонним променем Ga⁺ з енергією 30 кеВ. Результати дослідження засвідчили, що під дією іонної обробки магнітна анізотропія матеріалу зменшується.

У роботі [26] вивчено вплив обробки іонами Ga⁺ з енергією 30 кеВ і дозами 10¹³ – 10¹⁶ іонів/см² на магнітні властивості, зокрема на магнітну анізотропію, тришарових нанорозмірних систем із проміжним шаром Co(0-5 нм) і варіацією верхнього та нижнього шарів Pt(5/20 нм) і Au(5/20 нм). Петлі магнітного гістерезису вимірювали за кімнатної температури за допомогою магнітооптичної установки. У всіх досліджених тришарових системах спостерігається однакове зменшення анізотропії за дози 10¹³ іонів/см², в той самий час зміна анізотропії після обробки з дозами 2 × 10¹⁴ іонів/см² і 3 × 10¹⁵ іонів/см² залежить від конфігурації шарів. Наявність Au зменшує об'ємний внесок у поле анізотропії та збільшує поверхневий, що може бути пов'язано з різною концентрацією сформованих вакансій порівняно з Pt і зменшенням їх міжвузельної рухливості для систем з Au.

У дослідженні [28] розглянуто вплив металів Pt та Au на магнітний шар Co у тришарових структурах Pt(Au)/Co/Pt(Au), підданих обробці іонами Ga⁺ з

енергією 30 кеВ за різної дози, зокрема, досліджено структуру, магнітні та магнітооптичні характеристики плівкового матеріалу. У всіх структурах спостерігалися нелінійні зміни магнітної анізотропії внаслідок впливу іонів Ga^+ . За низької дози обробки на рівні 10^{13} іонів/см² магнітна анізотропія зменшується, що можна пояснити частковим пригніченням анізотропії через процеси, що відбуваються на межах розділу між шарами. Таким чином іонна обробка істотно впливає на магнітну анізотропію, зокрема, індукуючи появу поперечної магнітної анізотропії для структур Pt/Co/Pt, Pt/Co/Au і Au/Co/Pt.

Автори роботи [30] провели дослідження впливу іонів Ga^+ з енергією 30 кеВ у діапазонах доз від $0 - 1 \times 10^{16}$ іонів/см² на зміну магнітних властивостей тришарових нанорозмірних систем Pt(5 нм)/Co(3 нм)/Au(5 нм). Отримані результати свідчать, що даний режим іонної обробки викликає виражену модифікацію магнітних і магнітооптичних властивостей, зокрема, індукує збільшення магнітної анізотропії, що призводить до переорієнтації спінів з паралельного площині плівки до перпендикулярного напрямку.

1.3 Висновки до розділу 1

1. Іонна обробка нанорозмірних тонких плівок на основі Co-Pt є ефективним методом модифікації їхньої структури та магнітних властивостей, що дозволяє контролювати функціональні властивості плівкового матеріалу.

2. Використання іонної обробки для формування заданого структурно-фазового складу, що обумовлює досягнення високих магнітних властивостей, вимагає дослідження впливу параметрів такої обробки, зокрема, – дози, типу та енергії іонів.

3. Поєднання термічної та іонної обробки є технічно-актуальним підходом до формування нанорозмірних плівкових матеріалів на основі Co-Pt, перспективних для практичного використання у сучасних високих технологіях пристроїв спінтроники та наноелектроніки.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Плівкові об'єкти досліджень

У даній роботі досліджено нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм). Зразки отримані методом магнетронного розпорошення на підкладинку з монокристалічного кремнію Si(001). З метою запобігання розвитку термічно-індукованих дифузійних процесів між металевим шарами та підкладинкою останню піддано термічному окисненню з формуванням шару SiO₂ товщиною приблизно 100 нм. Типовий вигляд зразка тонкоплівкової композиції Pt/Co відображено на рис. 2.1.

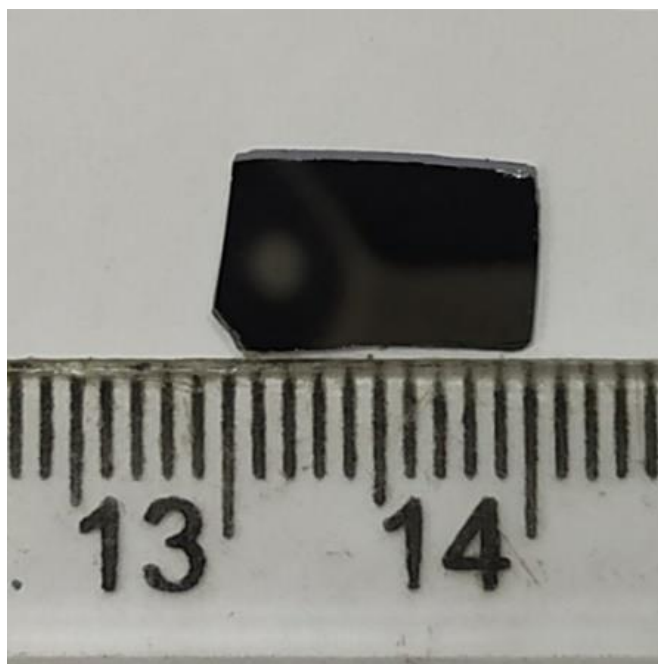


Рисунок 2.1 – Типовий вигляд зразка плівкової композиції Co-Pt (у порівнянні з міліметровою лінійкою)

2.2 Методика магнетронного розпорошення тонких плівок

Розпорошення – це процес нанесення тонких плівок, відомий як фізичне осадження з парової фази [32]. Під час цього процесу заряджені частинки плазми

або газу взаємодіють із поверхнею твердого тіла – мішені, відриваючи від неї атоми, які потім осідають на підкладинку, утворюючи внаслідок цього тонку плівку або покриття. Магнетронне розпорошення є одним із різновидів методів фізичного осадження з парової фази.

Відмінність цього методу від інших методів фізичного осадження, наприклад, реактивного та іонно-променевого розпорошення, полягає у магнетронному розряді, що виникає під впливом електричного та магнітного полів усередині вакуумної камери, а магнітне поле розміщене паралельно до поверхні катода та перпендикулярно до електричного поля. Схематичне зображення магнетронного розряду відображено на рис 2.2. Електричне і магнітне поля разом утворюють електронну пастку, що утримує електрони неподалік мішені. Це забезпечує концентровану іонізацію в ділянці поблизу мішені-катода, де густина плазми на кілька порядків вища порівняно зі звичайним тліючим розрядом постійного струму без магнітного поля [33].

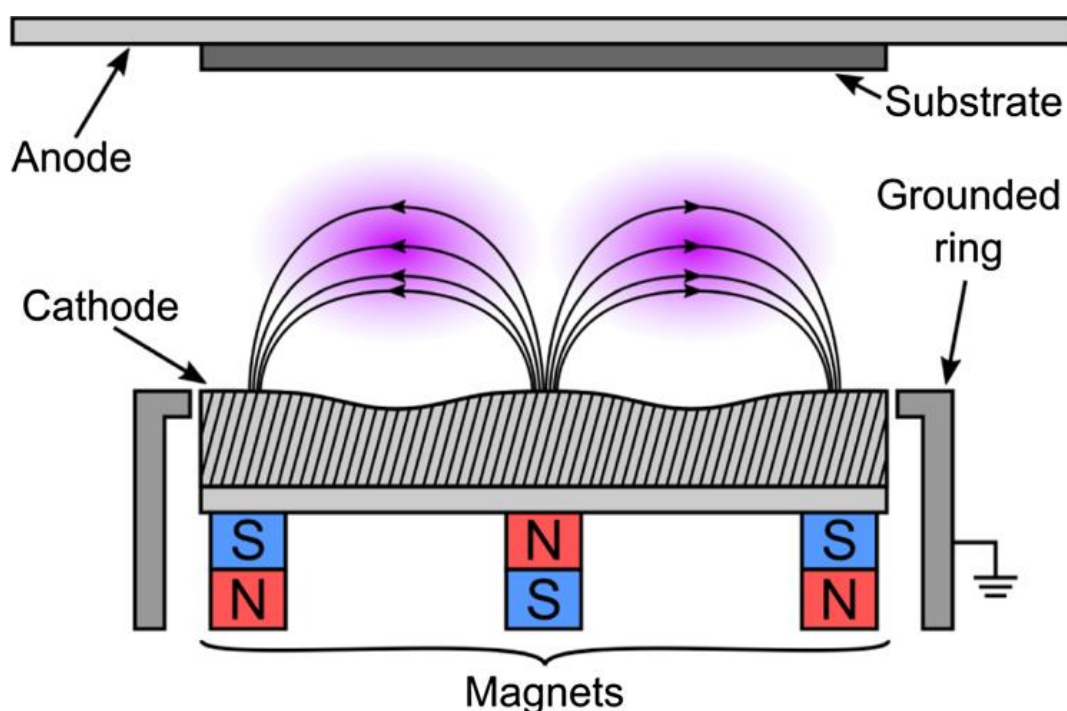


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення магнетронного розряду [33]

У процесі отримання тонких плівок методом магнетронного розпорошення відбувається створення середовища високого вакууму в камері пристрою задля

зменшення кількості домішок у кінцевому покритті. Потім у камеру додається робочий інертний газ з метою створення умов для ефективного іонізованого розпорошення матеріалу з катода. Найчастіше як робочий газ використовують аргон, що обумовлено його інертністю та порівняно низькою вартістю.

Магнетронне розпорошення має кілька переваг порівняно з іншими методами, такими як хімічне осадження з парової фази та інших способів фізичного осадження. Серед цих переваг – прискорена швидкість осадження за мінімального нагрівання підкладки. Цей метод дає змогу осаджувати широкий спектр матеріалів, як-от метали, композити, сплави, оксиди і нітриди тощо, в той час як розмір частинок контролюється зміною параметрів процесу. Інші переваги включають можливість розпорошення за великою площею та хорошу адгезію плівки до підкладки. Також ця технологія забезпечує високу чистоту і однорідність плівок. Однак у магнетронного розпорошення є і недоліки, серед яких нестабільність плазми і неможливість досягнення високих швидкостей розпорошення за низьких температур для магнітних матеріалів через обмеження, пов'язані з магнітним полем.

В процесі виконання даної роботи під час осадження нанорозмірних композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) товщина кожного з шарів контролювалась, виходячи з відомої швидкості розпорошення високочистих мішеней кожного з елементів, а саме: для Co швидкість осадження встановлено на рівні 2 Å/s , для Pt – $1,5 \text{ Å/s}$. Базовий тиск у камері становив 5×10^{-8} мБар, а робочий тиск газу Ar складав 8×10^{-4} мБар.

2.3 Іонна обробка тонких плівок

Іонну обробку зразків проведено іонами аргону (Ar^+) та азоту (N^+) за допомогою імплантера BALZERS MPB 202. Обробку проведено з використанням трьох доз випромінювання: 1×10^{14} іонів/ cm^2 , 5×10^{14} іонів/ cm^2 та 1×10^{15} іонів/ cm^2 . Енергія іонів була фіксованою для всіх доз випромінювання та становила 110 кеВ.

2.4 Термічна обробка тонких плівок у вакуумі

Термічна обробка НПК на основі Pt/Co відбувалась у вакуумній камері установки ВУП-5М (рис. 2.3). Зразки встановлено у зажим нагрівального столика з резистивним нагрівачем та піддано відпалу за температури 550 °С з тривалістю витримки 30 хвилин за постійного тиску 10^{-4} Па. Під час процесу термічної обробки контролювання температури відбувалося за допомогою термопари, що була підведена до нагрівального столика.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд установки ВУП-5М

2.5 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних іонів

Вторинна іонна мас-спектрометрія (ВІМС) – це метод пошарового хімічного аналізу твердих матеріалів [34]. В його основі лежить бомбардування поверхні зразка у високому вакуумі зарядженими частинками – первинними іонами. Частинки, що залишають поверхню в іонізованому стані, так звані

вторинні іони, прискорюються в мас-аналізаторі, де їх ідентифікують відповідно до їхнього відношення маси до заряду [35]. Отримана в результаті мас-спектральна картина містить інформацію щодо хімічного складу поверхні або досліджуваної ділянки. Особливості ВІМС включають високу роздільну здатність у просторі, за глибиною, а також високу хімічну чутливість до всіх елементів, ізотопів і молекул.

Методи ВІМС можна класифікувати як статичні та динамічні [36]. У статичній ВІМС струм первинного пучка встановлюється на рівні приблизно 10^{13} іонів/см², що дає змогу зменшити до мінімуму пошкодження поверхні під час аналізу, адже під час роботи в статичному режимі розпорошується не більш ніж 1

% поверхневих атомів, що призводить до того, що поверхня не зазнає значного хімічного травлення або пошкодження під час досліджень зразків. Динамічний режим роботи ВІМС використовує набагато вищі струми пучка – приблизно 10^{17} іонів/см², що навпаки призводить до безперервного травлення поверхні під час аналізу. За такого режиму первинний пучок працює в режимі постійного струму. Динамічний режим роботи ВІМС продукує набагато вищі вторинні іонні потоки і, як наслідок, забезпечує кращу чутливість і ширший динамічний діапазон виявлення. Недоліком динамічного режиму вторинної іонної мас-спектрометрії є те, що можуть бути виявлені лише атомарні або невеликі молекулярні види іонів.

Існує три типи мас-аналізаторів, що зазвичай використовуються в ВІМС: часопролітні, квадрупольні та магнітно-секторні, кожен з яких має свої переваги та недоліки. У часопролітному мас-аналізаторі, який використовується в даній роботі, розрахунок відношення маси до заряду відбувається через вимір часу, який необхідний вторинним іонам для прольоту шляху від поверхні досліджуваного зразка до детектора. Знаючи траєкторію польоту та електричний потенціал, а також припускаючи одиничний заряд, визначається маса [36]. Часопролітні мас-аналізатори в основному використовують для статичної версії

ВІМС. Інші мас-аналізатори – квадрупольні та магнітно-секторні, частіше використовуються для динамічного профілювання за глибинного.

У даній роботі для пошарового хімічного аналізу багат шарових плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) у стані після осадження та комплексної іонної та термічної обробки за різних режимів використовували часопролітний мас-аналізатор Ion Tof IV з первинним іонним пучком Cs^+ з енергією 2 кеВ.

2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) – це метод визначення і отримання інформації про кристалічну структуру матеріалів [37].

Коли рентгенівські промені падають на твердий матеріал, вони розсіюються електронами, що обертаються навколо ядер атомів [38]. Ці розсіяні хвилі поширюються в декількох напрямках і взаємно інтерферують. Природа інтерференції може бути конструктивною або деструктивною залежно від напрямку і типу взаємодії хвиль [38].

Дифракція є конструктивною інтерференцією, оскільки періодична, або ж упорядкована будова атомної структури в твердих тілах викликає конструктивну інтерференцію [38]. Періодичність і дифракція сильно корелюють – вищі кути дифракції спостерігаються за коротшої періодичності і навпаки.

Довжини хвиль рентгенівських променів співрозмірні з розмірами атомів, через що інтенсивності рентгенівської дифракції, одержувані у вигляді дифракційних картин, використовуються для отримання інформації про атомні структури. Самі дифракційні картини, отримані у результаті дослідження методом РСФА, залежать від власної кристалічної структури зразка та використаного матеріалу випромінювача, а саме його рентгенівської довжини хвилі.

Перевагами даного методу є те що він неруйнівний, розповсюджений та забезпечення широкого спектру даних про кристалічну структуру зразків, будучи нескладним для проведення відповідних досліджень.

У даній роботі дослідження фазового складу НПК на основі Pt/Co у стані після осадження та після термічної та іонної обробки проведено за допомогою рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV (рис. 2.4) з схемою фокусування за Брегом – Брентано. Дослідження відбувалось в характеристичному мідному випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ з довжиною хвилі $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ в інтервалі кутів $2\theta = 20^\circ - 60^\circ$ з кроком зйомки – $0,04^\circ$. Час витримки в точці – 2 секунд, а тривалість зйомки одного зразка – 33 хв.



Рисунок 2.4 – Дифрактометр Rigaku Ultima IV [39]

2.7 Вібраційна магнітометрія

Магнітометр – це пристрій для вимірювання величини та напрямку магнітного поля [40]. Один із найпоширеніших методів дослідження магнітних матеріалів – вібраційна магнітометрія. Цей метод дає змогу вивчати магнітні властивості як магнітно-м'яких матеріалів із низькою коерцитивною силою, так і магнітно-твердих з високою коерцитивною силою у різних формах: твердих тілах, тонких плівках, монокристалах, порошках і рідинах. Перевагами вібраційної магнітометрії є можливість проводити вимірювання в широкому діапазоні магнітних полів, від слабких до дуже сильних, з використанням

електро- або надпровідних магнітів. Крім того, вона дає змогу виконувати вимірювання за різних температур – від вкрай низьких до дуже високих, за наявності відповідного обладнання для нагрівання або охолодження зразків. Схематичне зображення вібраційного магнітометра відображено на рис. 2.5.

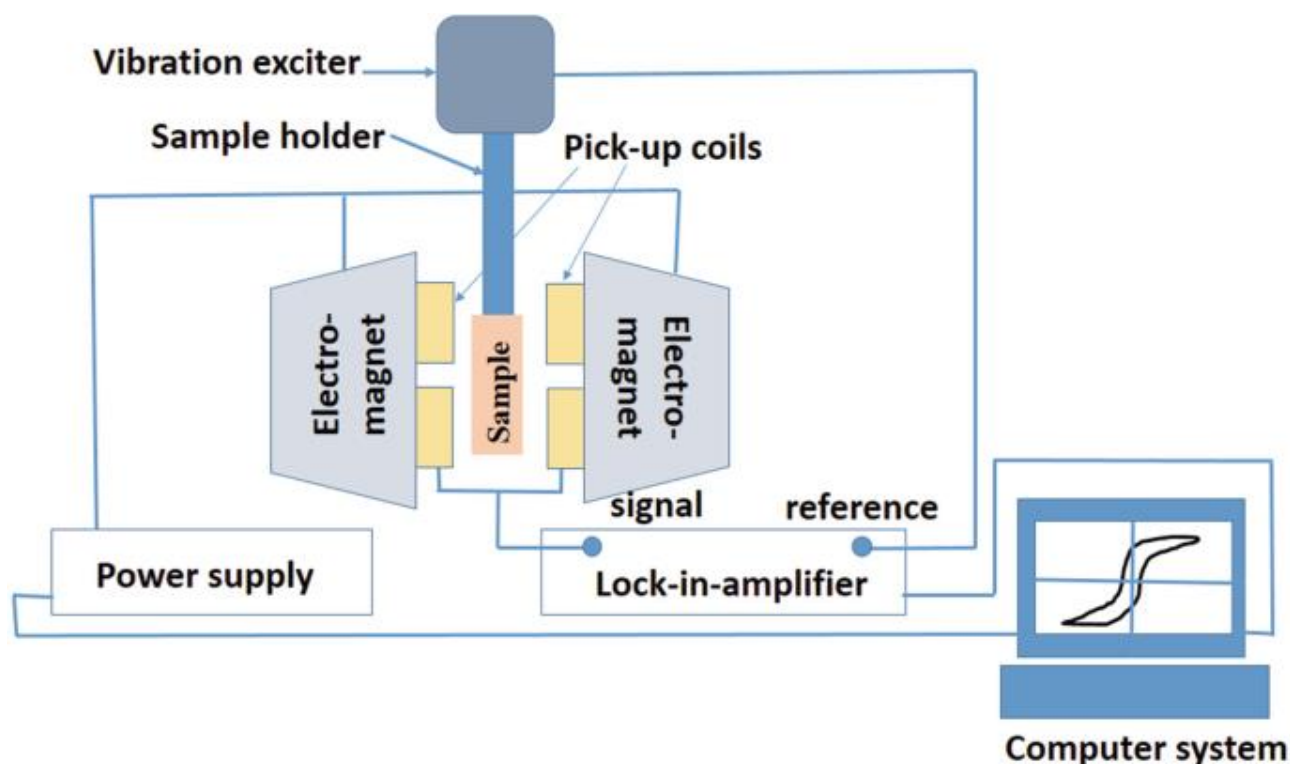


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення вібраційного магнітометра [41]

Зразок встановлюють у тримач між парою вимірювальних котушок, де наявне середовище постійного однорідного магнітного поля. Вимірювальні котушки виявляють зміни в магнітному полі розсіювання під час впливу на зразок вібраційних коливань. Магнітне поле розсіювання – це магнітне поле, що утворюється навколо зразка через магнітний дипольний момент [42]. Коливання магнітного поля розсіювання індукують електричний струм у вимірювальних котушках відповідно до закону Фарадея. Підсилювачі, під'єднані до комп'ютерної системи, посилюють електричний струм, який спричиняє флуктуаційне магнітне поле. Комп'ютерна система містить програмне забезпечення, що фіксує виявлені величини під час досліджень. Отримані дані магнітометрії на вібраційному магнітометрі використовується для запису петлі

гістерезису для магнітних матеріалів і отримання таких параметрів, як намагніченість насичення, залишкова намагніченість та коерцитивна сила.

Для дослідження польових залежностей намагніченості плівкових зразків Pt(10 нм)/Co(10 нм) використано вібраційний магнітометр з магнітним полем до $\pm 0,1$ Тл, яке було прикладене як у площині зразків, так і вздовж напрямку магнітного поля поза їх площиною.

2.8 Висновки до розділу 2

1. Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) отримано методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені підкладинки монокристалічного кремнію, що дозволило сформувати нанорозмірні шари заданого хімічного складу і товщини та чіткими границями розділу між ними.

2. Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) піддано бомбардуванню іонами Ar^+ та N^+ та подальшій термічній обробці у вакуумі за температури $500\text{ }^\circ\text{C}$ упродовж 30 хвилин з метою ініціалізації розвитку дифузійних процесів та зміни фазового складу.

3. Під час дослідження закономірностей впливу комплексної іонної та термічної обробки на структуру та магнітні властивості нанорозмірних систем Pt(10 нм)/Co(10 нм) використано комплекс сучасних методів фізичних досліджень з наведеною аргументацією щодо їх вибору та врахуванням феромагнітної природи зразків та їх форми, що забезпечило високу точність та достовірність отриманих результатів.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Закономірності перерозподілу компонентів за товщиною плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) під впливом іонної та термічної обробки

Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) у вихідному стані після осадження та після обробки іонами Ar^+ за різних режимів представлено на рис. 3.1.

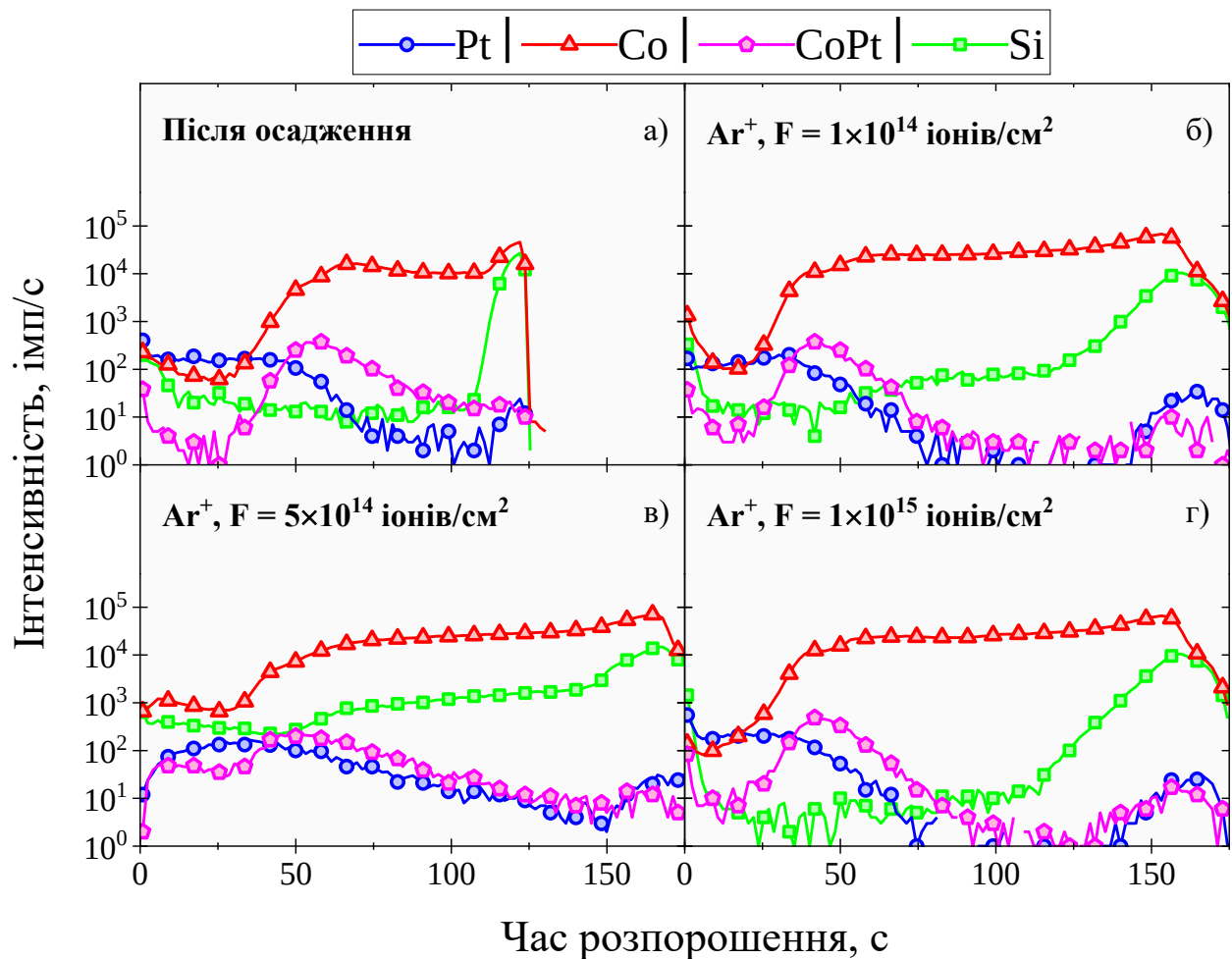


Рисунок 3.1 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) у стані після осадження та після обробки іонами Ar^+ за різних режимів

У стані після осадження (рис. 3.1, а) спостерігається чітка границя розділу між осадженими шарами досліджуваної плівкової композиції. В області вихідної границі розділу Pt/Co спостерігається збільшення інтенсивності комплексного іону CoPt, що пояснюється шорсткістю поверхні розділу між шарами зазначених компонентів системи і не вказує на присутність під час магнетронного розпорошення ініціалізації дифузійних процесів.

Після бомбардування іонами Ar^+ з дозою 1×10^{14} іонів/см² (рис. 3.1, б) спостерігається ініціалізація дифузійних процесів, про що, зокрема, свідчить сформований сегрегаційний прошарок Co на вільній поверхні плівки. В результаті збільшення дози бомбардуючих іонів Ar^+ в 5 разів (рис. 3.1, в) спостерігається рівномірне розподілення Co над шаром Pt, що вказує на збільшення однорідності розподілу хімічних елементів за товщиною плівки внаслідок обробки іонами зазначеної дози. За збільшення дози бомбардування іонами Ar^+ до 1×10^{15} іонів/см² (рис. 3.1, г) спостерігається шарувата структура плівкової системи, подібна до тієї, що спостерігалася у вихідному стані після осадження. Ймовірно даний ефект пов'язано з накопиченням іонів Ar^+ в кристалічній ґратці Pt, що пригнічує розвиток дифузійних процесів між Co та Pt.

Варто відзначити, що після обробки іонами Ar^+ за всіх досліджених доз спостерігається зростання часу розпорошення плівки від поверхні до підкладинки в порівнянні з вихідним станом, що може вказувати на посилення хімічних зв'язків між атомами системи Co та Pt внаслідок іонного бомбардування.

Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) після обробки іонами Ar^+ за різних режимів та подальшої термічної обробки за температури 550 °C упродовж 30 хвилин представлено на рис. 3.2. У стані після одностадійного відпалу без бомбардування іонами Ar^+ (рис 3.2, а) спостерігається гомогенний розподіл хімічних елементів за товщиною плівки. Застосування термічної обробки після обробки іонами Ar^+ у всьому дослідженому інтервалі доз випромінювання (рис 3.2, б-г) не приводить до суттєвих змін в перерозподілі

хімічних компонентів за товщиною плівки порівняно з одностадійним відпалом – спостерігається гомогенний розподіл.

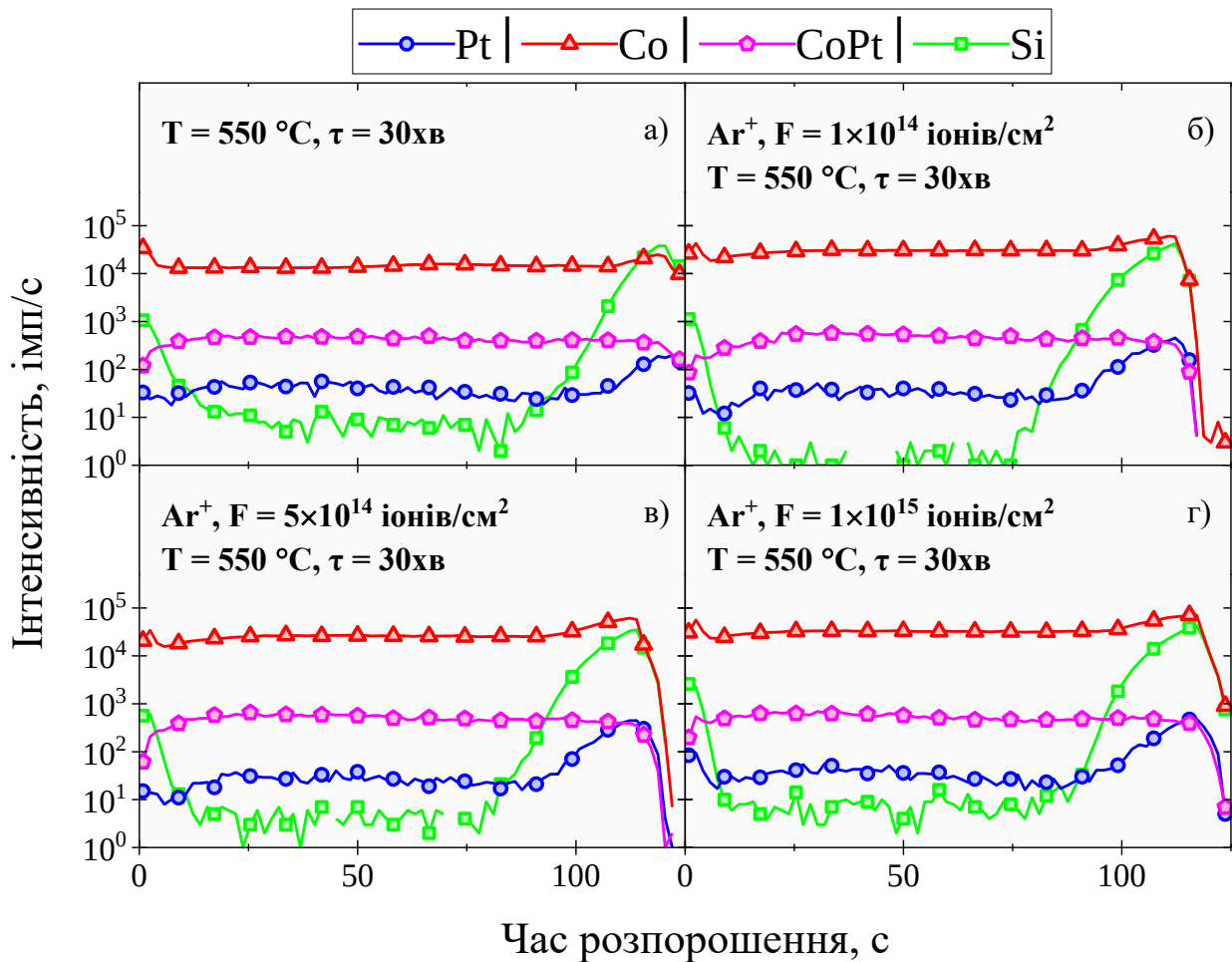


Рисунок 3.2 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) після одностадійного відпалу та після обробки іонами Ar^+ за різних режимів та наступної термічної обробки за температури $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ упродовж 30 хвилин

За дози бомбардування іонами N^+ 1×10^{14} іонів/см² (рис. 3.3, б), аналогічно впливу іонів Ar^+ за тієї самої дози, відбувається ініціалізація дифузійних процесів, на що вказує сегрегація Co на вільній поверхні плівки. В результаті збільшення дози до 5×10^{14} іонів/см² (рис. 3.3, в) не відбувається суттєвих змін у перерозподілі хімічних компонентів порівняно з меншою дозою. В результаті збільшення дози бомбардуючих іонів N^+ до 1×10^{15} іонів/см² знову

спостерігається шарувата структура, що вказує на сповільнення дифузійних процесів, причиною чого, аналогічно бомбардуванню іонами Ar^+ за цієї дози, може бути затримання іонів N^+ в кристалічній ґратці. Також після обробки іонами з максимальною дозою спостерігається зменшення тривалості розпорошення плівки, що може вказувати на послаблення сили взаємодії між атомами у кристалічній решітці плівкового матеріалу.

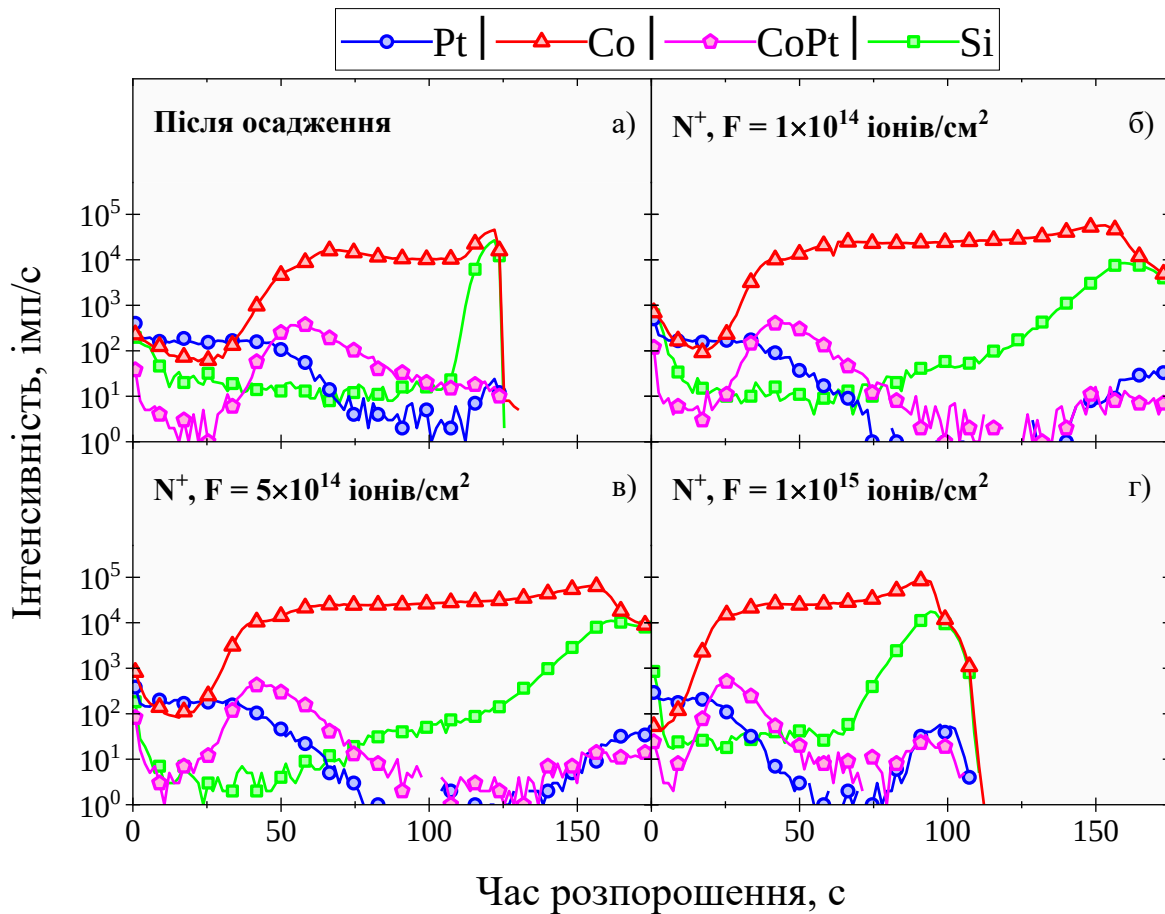


Рисунок 3.3 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) у стані після осадження та після обробки іонами N^+ за різних режимів

Концентраційні профілі розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) після комплексної попередньої обробки іонами N^+ за різних режимів та наступного відпалу представлено рис. 3.4. Після бомбардування іонами N^+ з дозою 1×10^{14} іонів/см²

та 5×10^{14} іонів/см² і подальшого відпалу (рис. 3.4, б-в) не спостерігається суттєвих змін у розподілі хімічних елементів порівняно з одностадійним відпалом.

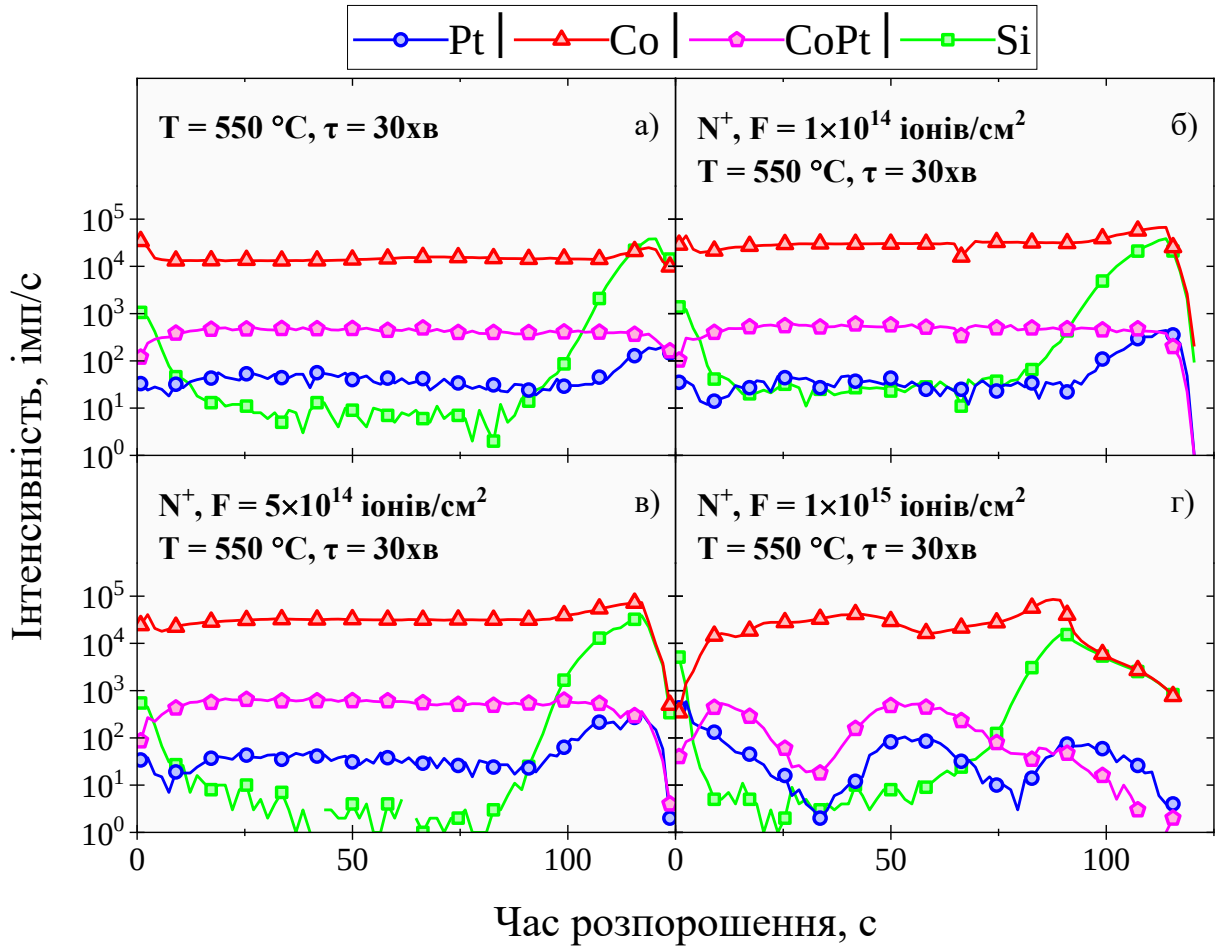


Рисунок 3.4 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) після одностадійного відпалу та після обробки іонами N^+ за різних режимів та наступної термічної обробки за температури 550 °C упродовж 30 хвилин

Збільшення дози бомбардування іонами N^+ до 1×10^{15} іонів/см² (рис. 3.4, г) призводить до суттєвих змін розподілу хімічних елементів – розподіл не є гомогенним за товщиною плівки порівняно з станом після одностадійної термічної обробки та комплексної обробки з меншими дозами випромінювання, що можливо вказує на те, що обробка з даною дозою іонів N^+ перешкоджає розвитку дифузійних процесів.

3.2 Термічно- та іонно-індуковані структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм)

Термічно- та іонно-індуковані структурно-фазові перетворення в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) досліджено методом рентгеноструктурного фазового аналізу. Для ідентифікації фазового складу зразка використано дві картки з бази даних PDF-2 з номером 01-070-2057 для порівняння теоретичної інформації для фази Pt та 03-065-8970 для фази CoPt з результатами експериментів, які підбиралися відповідно до розрахованих міжплощинних відстаней та положення дифракційних максимумів. На основі обраних карток у програмному комплексі PowderCell побудовано розрахункові дифрактограми, які згодом накладено на побудовані експериментальні дифрактограми для демонстрації відповідності експериментального та теоретичного фазового складу.

3.2.1 Фазові зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після іонної обробки без наступної термічної обробки

На рис. 3.5 зображена дифрактограму зразка Pt/Co у стані після осадження з накладеною розрахунковою дифрактограмою.

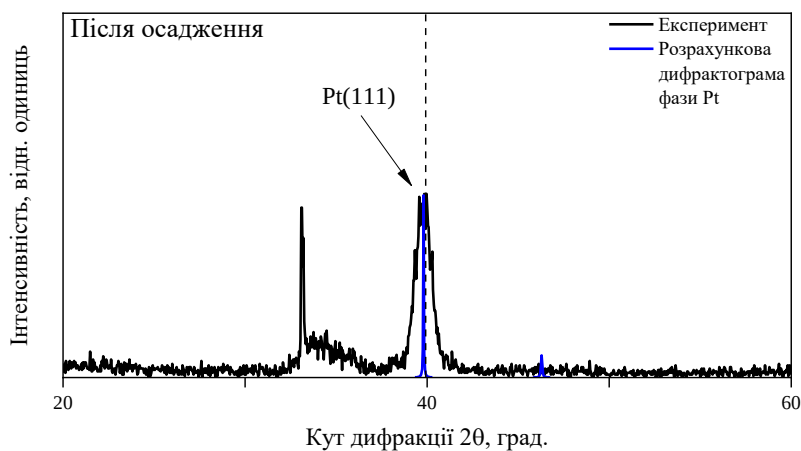


Рисунок 3.5 – Дифрактограма нанорозмірної плівкової композиції Co(10 нм)/Pt(10 нм) у стані після осадження у порівнянні з розрахунковою дифрактограмою

Спостерігається рефлекс Pt(111), що підтверджує шарувату структуру плівкового матеріалу з наявними окремими шарами осаджених металів, між якими не відбулося дифузійної взаємодії. Відсутність на дифрактограмі рефлексу від фази Со можна пояснити тим, що товщини осадженого шару Со недостатньо для формування чіткого дифракційного максимуму, інтенсивність якого можливо було б виокремити з лінії фону.

Дифрактограми зразків нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Со(10 нм) після обробки іонами Ar^+ та N^+ у всьому дослідженому в даній роботі інтервалі доз іонної обробки відображено на рис. 3.6.

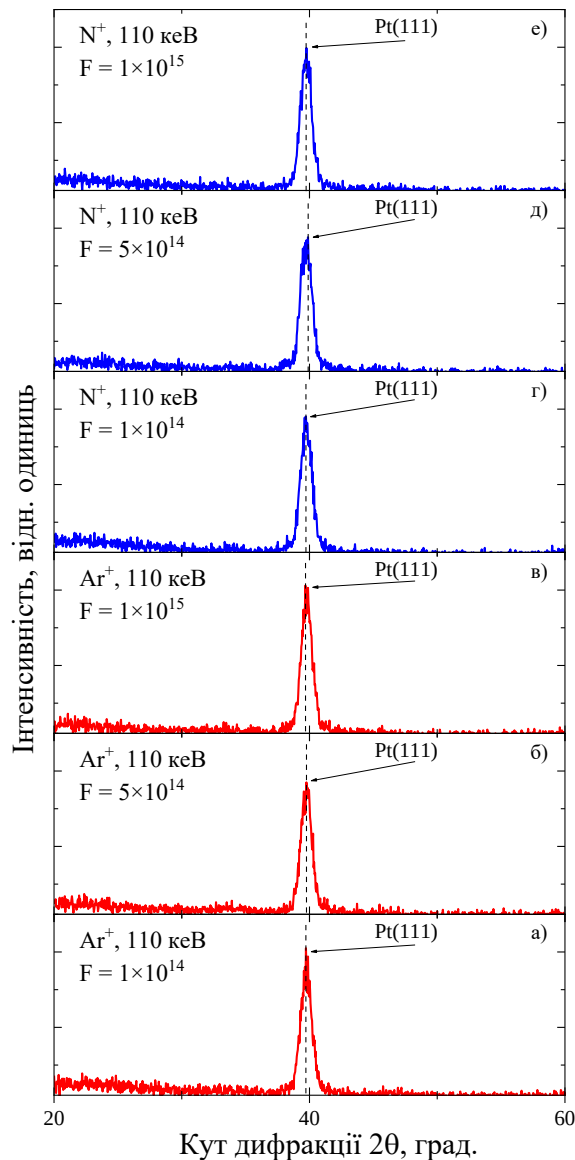


Рисунок 3.6 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Со(10 нм)/Pt(10 нм) після іонної обробки за різних режимів

Всі дози обробки як іонами Ar^+ , так і N^+ не призводять до суттєвих змін на дифракційних спектрах, що свідчить про стабільність структури і відсутність структурно-фазових перетворень.

3.2.2 Структурні зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після іонної обробки без наступної термічної обробки

З результатів рентгеноструктурного фазового аналізу розраховано зміну параметрів кристалічної ґратки фази Pt(111) для невідпалених зразків в залежності від режимів іонної обробки, що представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Зміна параметрів кристалічної ґратки фази Pt(111) у плівкових композиціях Co(10 нм)/Pt(10 нм) від режимів іонної обробки без наступної термічної обробки

Режим іонної обробки	Міжплощинна відстань фази Pt(111) (d), нм	Період ґратки фази Pt(111) (a), нм
Після осадження	0,22582	0,39114
Іони Ar^+ з дозою 1×10^{14} іонів/см ²	0,22686	0,39294
Іони Ar^+ з дозою 5×10^{14} іонів/см ²	0,22664	0,39256
Іони Ar^+ з дозою 1×10^{15} іонів/см ²	0,22730	0,39370
Іони N^+ з дозою 1×10^{14} іонів/см ²	0,22699	0,39317
Іони N^+ з дозою 5×10^{14} іонів/см ²	0,22604	0,39152
Іони N^+ з дозою 1×10^{15} іонів/см ²	0,22670	0,39265

Для всіх оброблених іонами зразків спостерігається збільшення параметрів кристалічної ґратки фази Pt(111) у порівнянні з вихідним станом, що можна пояснити накопиченням у кристалічній ґратці іонів, що застосовуються у цій

роботі, або накопиченням дефектів у кристалічній ґратці внаслідок такої обробки. Для обох видів іонів спостерігається найменше значення параметрів кристалічної ґратки фази Pt(111) після обробки з дозою 5×10^{14} іонів/см². Після обробки іонами Ar^+ з дозою 1×10^{15} іонів/см² спостерігається найбільше збільшення міжплощинної відстань та періоду кристалічної ґратки фази Pt(111) на 0,65 % у порівнянні з станом після осадження. Натомість для обробки іонами N^+ найбільша різниця спостерігається після обробки за дози 1×10^{14} іонів/см² і становить 0,39 %.

На рис. 3.7 представлено залежність зміни кутового положення дифракційного максимуму фази Pt(111) від режиму іонної обробки.

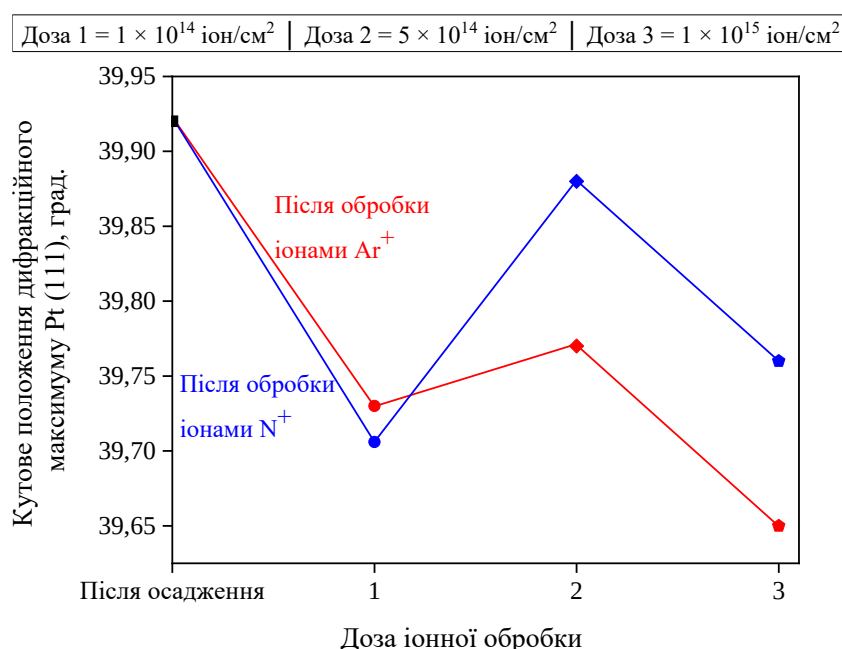


Рисунок 3.7 – Залежність кутового положення дифракційного максимуму Pt(111) від режимів іонної обробки без наступного відпалу

За дози обробки іонами Ar^+ 1×10^{14} іонів/см² спостерігається зміщення рефлексу у бік менших кутів, що вказує на збільшення періоду кристалічної будови плівкового матеріалу. За збільшення дози бомбардуючих Ar^+ іонів до 5×10^{14} іонів/см² спостерігається зміщення рефлексу у бік більших кутів, що також є свідченням зміни параметру кристалічної решітки. Натомість за дози 1×10^{15} іонів/см² спостерігається значне зміщення дифракційного рефлексу у бік

менших кутів, що вказує на подальше збільшення відстаней між атомними площинами ймовірно через втілення іонів до кристалічної решітки. Близькі результати отримані також в результаті обробки іонами N^+ . Обробка іонами N^+ за дози 1×10^{14} іонів/см² обумовлює зміщення дифракційного максимуму у бік менших кутів. За збільшення дози до 5×10^{14} іонів/см² спостерігається зміщення рефлексу у більших кутів з досягненням значення, близького до того, що є характерним для плівкового матеріалу у вихідному стані після осадження. Обробка іонами N^+ з дозою 1×10^{15} іонів/см² призводить до зміщення рефлексу у бік менших кутів, що, ймовірно, також є свідченням втілення даних іонів до кристалічної решітки зі зміною її параметрів.

Також побудовано закономірності зміни розміру областей когерентного розсіювання в залежності від режиму іонної обробки плівкових зразків без подальшої термічної обробки, які відображено на рис. 3.8.

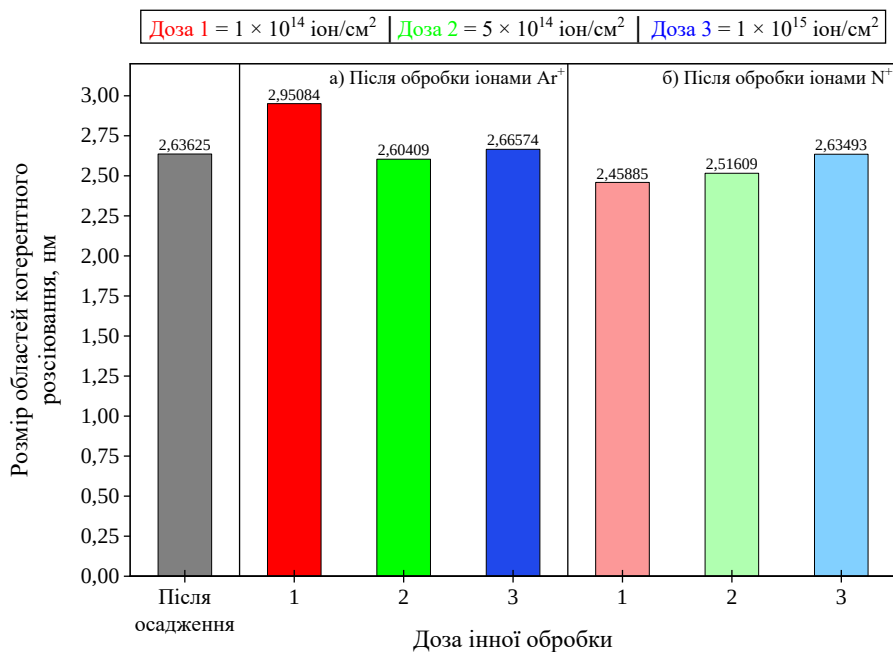


Рисунок 3.8 – Залежність розміру областей когерентного розсіювання плівкових композицій Co(10 нм)/Pt(10 нм) від режимів іонної обробки

За дози обробки іонами Ar^+ (рис 3.8, а) 1×10^{14} іонів/см² спостерігається збільшення розміру областей когерентного розсіювання порівняно з вихідним станом та всіма іншими дозами обробки цими іонами. Підвищення дози

бомбардуючих іонів Ar^+ до 5×10^{14} іонів/см² та 1×10^{15} іонів/см² не призводить до значних змін порівняно з вихідним станом. Після обробки іонами N^+ (рис 3.8, б) з дозою 1×10^{14} іонів/см² спостерігається незначне зменшення розміру областей когерентного розсіювання у порівнянні з вихідним станом. Підвищення дози до 5×10^{14} іонів/см² не обумовлює значних змін розміру кристалітів. За дози обробки 1×10^{15} іонів/см² розмір областей когерентного розсіювання збільшується порівняно з меншими дозами та виходить на один рівень з вихідним станом.

3.2.3 Фазові зміни в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) після комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки

Дифрактограма плівкового зразка Pt/Co після одностадійної термічної обробки з накладеною розрахунковою дифрактограмою представлено на рис. 3.9. Після відпалу на відповідному дифракційному спектрі наявні дифракційні максимуми від фази CoPt, що вказує на перебіг дифузійних процесів. Однак на дифрактограмі також присутній рефлекс від Pt, що може вказувати на недостатність застосованого режиму термічної обробки для повного перебігу дифузійних з формування монофазної структури плівкового матеріалу.

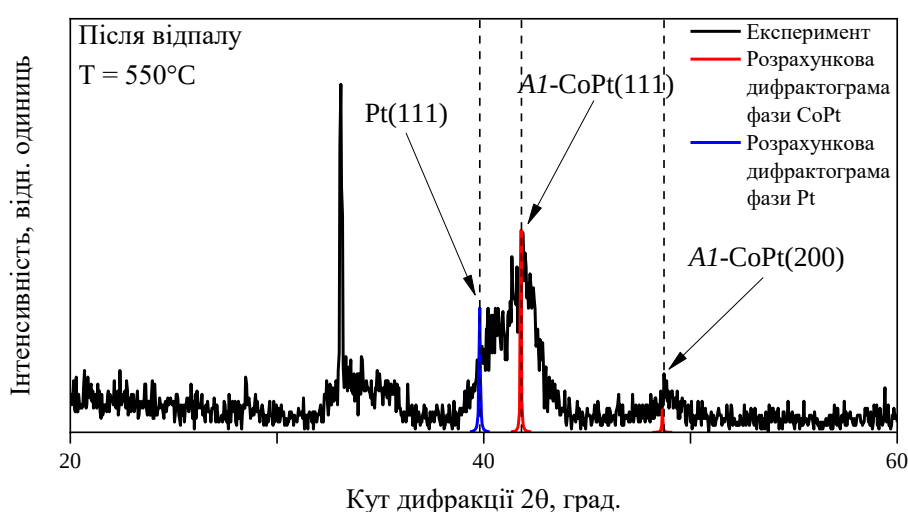


Рисунок 3.9 – Дифрактограма нанорозмірної плівкової композиції Co(10 нм)/Pt(10 нм) після відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин у порівнянні з розрахунковою дифрактограмою

Дифрактограми плівкового зразка Pt/Co після обробки обома дослідженими видами іонів за всіх досліджених доз випромінювання і наступного відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин представлено на рис. 3.10.

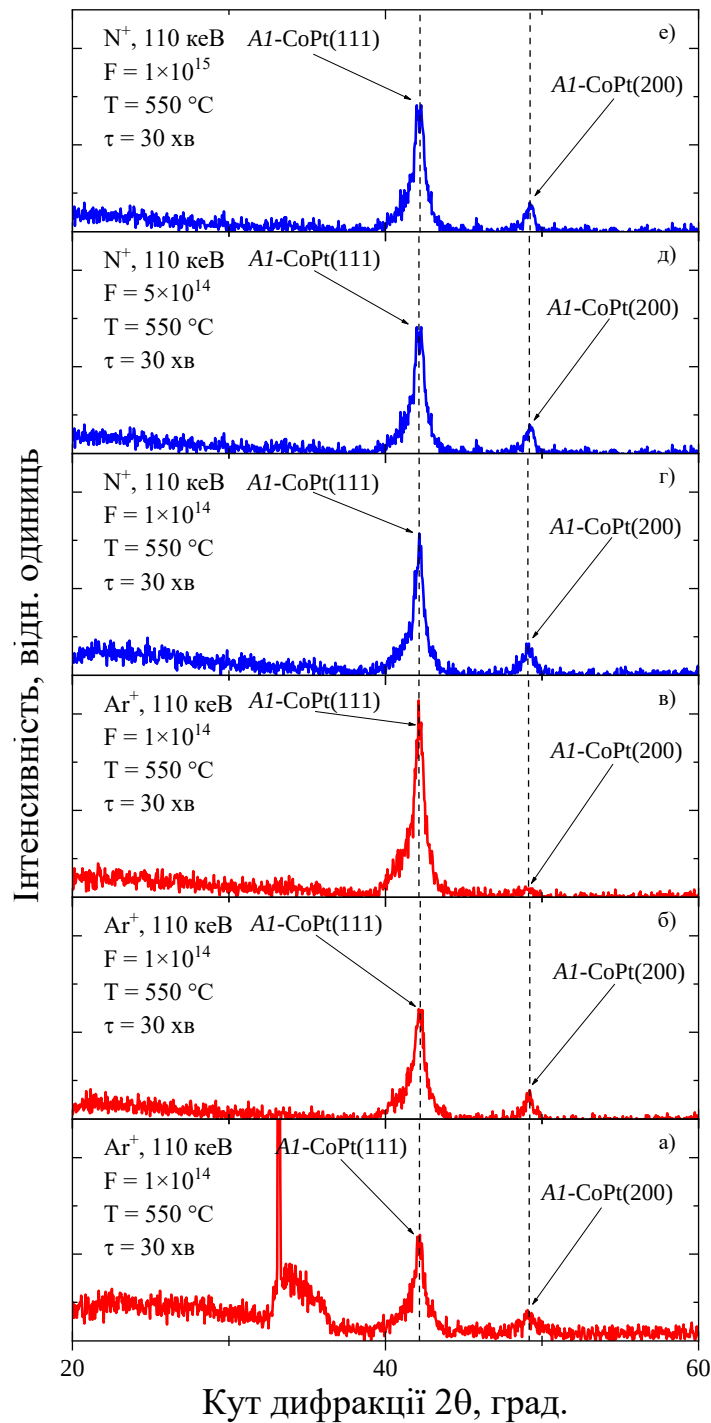


Рисунок 3.10 – Дифрактограми нанорозмірних плівкових композицій Co(10 нм)/Pt(10 нм) після комплексної іонної обробки за різних режимів та наступного відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин

На всіх дифрактограмах наявні рефлекси від неупорядкованої інтерметалідної фази – $Al-CoPt(111)$ та $Al-CoPt(200)$. Варто зазначити, що у порівнянні з вихідним станом на всіх дифрактограмах не спостерігається рефлексу $Pt(111)$, що вказує на те, що комплексна попередня іонна та наступна термічна обробка обумовлює повний перебіг дифузійних процесів.

3.2.4 Структурні зміни в плівкових композиціях $Pt(10\text{ нм})/Co(10\text{ нм})$ після комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки

У табл. 3.2 відображено зміну періодів ґратки та міжплощинних відстаней фази $Al-CoPt(111)$ в залежності від режимів іонної обробки та з наступною одностадійною термічною обробкою за температури $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.2 – Зміна параметрів кристалічної ґратки фази $Al-CoPt(111)$ у плівкових композиціях $Co(10\text{ нм})/Pt(10\text{ нм})$ від режимів іонної обробки з наступною одностадійною термічною обробкою за температури $550\text{ }^{\circ}\text{C}$

Режим іонної обробки	Міжплощинна відстань фази $Al-CoPt(111)$ (d), нм	Період ґратки фази $Al-CoPt(111)$ (a), нм
Після одностадійного відпалу	0,21570	0,37360
Іони Ar^{+} з дозою 1×10^{14} іонів/см ²	0,21414	0,37090
Іони Ar^{+} з дозою 5×10^{14} іонів/см ²	0,21452	0,371575
Іони Ar^{+} з дозою 1×10^{15} іонів/см ²	0,21452	0,37157
Іони N^{+} з дозою 1×10^{14} іонів/см ²	0,21428	0,37115
Іони N^{+} з дозою 5×10^{14} іонів/см ²	0,21385	0,37040
Іони N^{+} з дозою 1×10^{15} іонів/см ²	0,21394	0,37056

Для всіх оброблених іонами зразків спостерігається зменшення параметрів ґратки фази $Al-CoPt(111)$ у порівнянні з станом після одностадійного відпалу, що можна пояснити тим, що дефекти, утворені внаслідок іонної обробки, не повністю усуваються термічною обробкою та призводять до локального стискання кристалічної структури. Після обробки іонами Ar^+ з дозою 5×10^{14} і 1×10^{15} іонів/см² можна спостерігати найбільше зменшення періоду ґратки фази $Al-CoPt(111)$ та міжплощинної відстані, яке становить 0,54 % у порівнянні зі станом після відпалу. Для обробки іонами N^+ найбільша різниця спостерігається для дози обробки 5×10^{14} іонів/см² і становить 0,66 %.

Графік зміни кутового положення дифракційного максимуму фази $Al-CoPt(111)$ в залежності від режиму іонної обробки представлено на рис. 3.11.

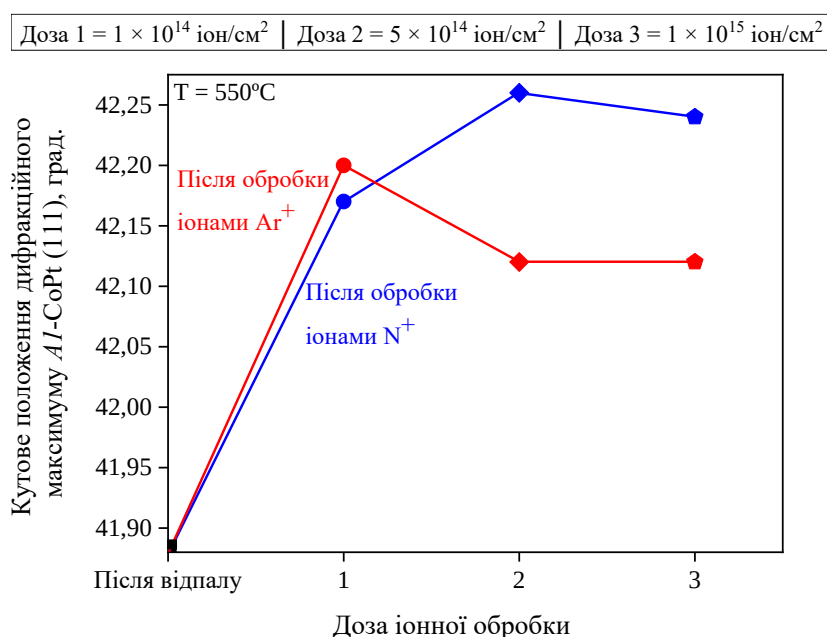


Рисунок 3.11 – Залежність кутового положення дифракційного максимуму $Al-CoPt(111)$ від режимів комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки

За обробки іонами Ar^+ дозою 1×10^{14} іонів/см² спостерігається зміщення положення даного дифракційного максимуму у бік більших кутів порівняно з вихідним станом. Однак, також варто відзначити, що за доз іонної обробки 5×10^{14} іонів/см² і 1×10^{15} іонів/см² спостерігається зміщення дифракційного

максимуму у бік менших кутів. В результаті обробки іонами N^+ за дози 5×10^{14} іонів/см² спостерігається зміщення дифракційного максимуму у бік більших кутів порівняно з положенням, отриманим після обробки з дозою 1×10^{14} іонів/см². За дози бомбардуючих іонів 1×10^{15} іонів/см² спостерігається незначне, порівняно з меншою дозою, зміщення у бік менших кутів. Ці результати свідчать, що варіювання типу іонів дозволяє впливати на параметри кристалічної будови сформованої в результаті наступного відпалу інтерметалідної фази *Al-CoPt*.

Зміна розміру областей когерентного розсіювання фази *Al-CoPt* в залежності від режимів комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки представлено на рис. 3.12.

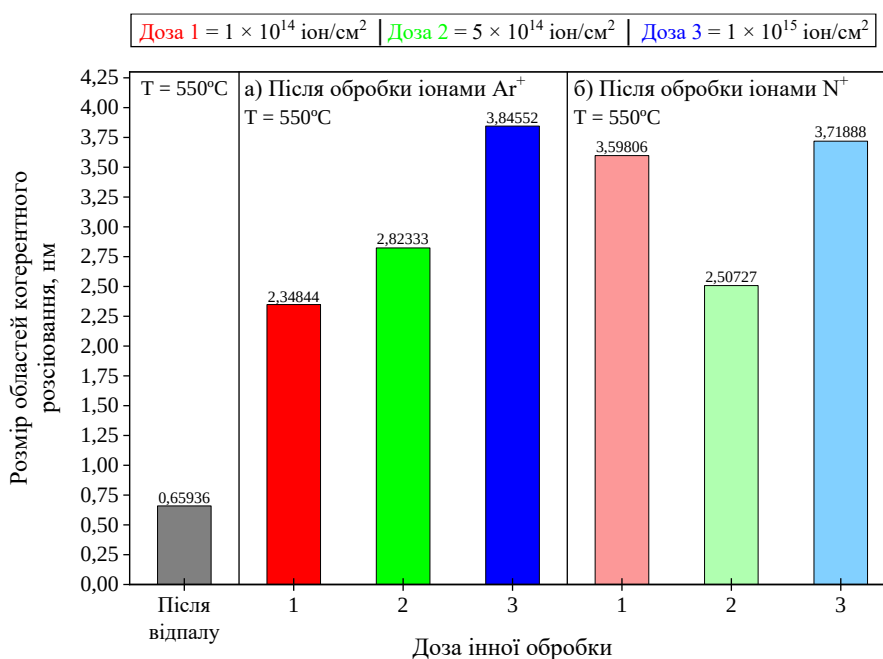


Рисунок 3.12 – Залежність розміру областей когерентного розсіювання фази *Al-CoPt* від режимів комплексної попередньої іонної та наступної термічної обробки

Виявлено, що за всіх доз обробки іонами Ag^+ та N^+ спостерігається суттєве збільшення розміру областей когерентного розсіювання у порівнянні зі станом після одностадійного відпалу. Після бомбардування іонами Ag^+ спостерігається збільшення розміру областей когерентного розсіювання зі зростанням дози

випромінювання. В той самий час, в результаті використання іонів N^+ за збільшення дози до 5×10^{14} іонів/см² (порівняно з 1×10^{14} іонів/см²) спостерігається зменшення розміру областей когерентного розсіювання. Наступне збільшення дози до 1×10^{15} іонів/см² призводить до збільшення розміру областей когерентного розсіювання порівняно з меншими дозами.

3.3 Зміна магнітних властивостей нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) в результаті іонної та термічної обробки

Польові залежності намагніченості нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co після обробки іонами Ar^+ за різних режимів у порівнянні з вихідним станом після осадження представлено на рис. 3.13.

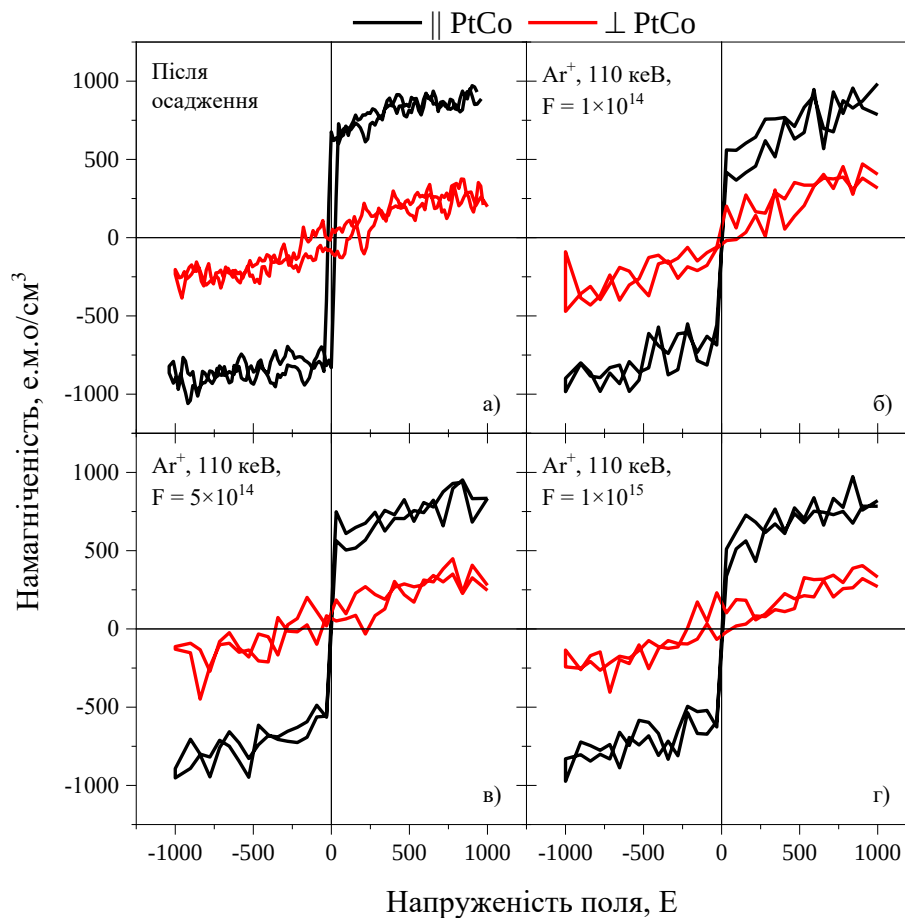


Рисунок 3.13 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) у стані після осадження та після обробки іонами Ar^+ за різних режимів

Всі досліджені зразки характеризуються розташуванням осі легкого намагнічування у площині плівки, про що свідчить порівняння кривих намагнічування, отриманих за зовнішнього поля, прикладеного паралельно та перпендикулярно до площини плівки. Після обробки іонами Ar^+ за всіх режимів (рис. 3.13, б-г) спостерігається несуттєве зменшення коерцитивної сили, у порівнянні зі станом після осадження (рис. 3.13, а).

З отриманих польових залежностей намагніченості нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co побудовано залежності магнітних властивостей – коерцитивної сили та намагніченості насичення – від дози іонної обробки, які представлено на рис. 3.14.

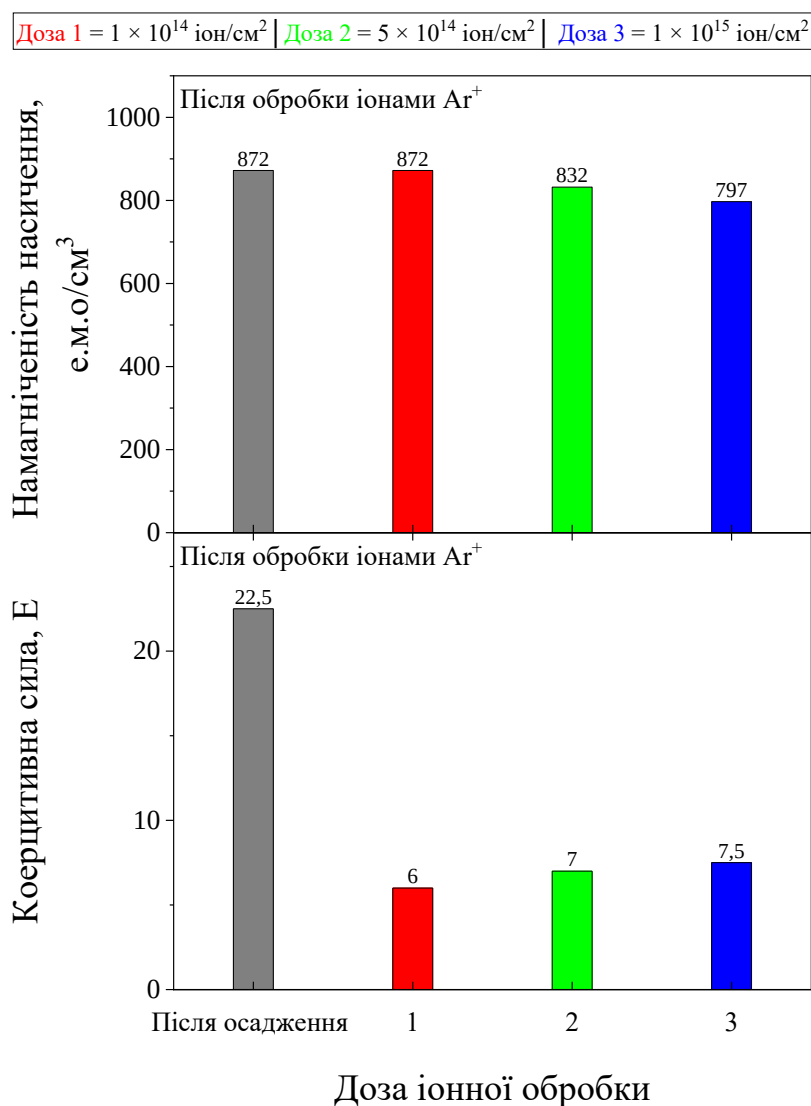


Рисунок 3.14 – Залежність намагніченості насичення і коерцитивної сили плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) від дози обробки іонами Ar^+

Можна бачити, що іонна обробка Ar^+ помірно впливає на намагніченість насичення нанорозмірних плівкових композицій $\text{Pt}(10\text{ нм})/\text{Co}(10\text{ нм})$, оскільки значення залишаються приблизно на одному рівні як після осадження, так і після іонної обробки з усіма дослідженими у даній роботі дозами. Коерцитивна сила за всіх доз обробки зменшується порівняно з вихідним станом. Тобто, іонна обробка нанорозмірних плівок $\text{Pt}(10\text{ нм})/\text{Co}(10\text{ нм})$ дозволяє ефективним чином здійснювати вплив на їхні магнітні властивості.

На рис. 3.15 представлено польові залежності намагніченості плівкових композицій $\text{Pt}(10\text{ нм})/\text{Co}(10\text{ нм})$ після обробки іонами Ar^+ та наступного відпалу за температури $550\text{ }^\circ\text{C}$ упродовж 30 хвилин в порівнянні з результатами, отриманими після одностадійної термічної обробки.

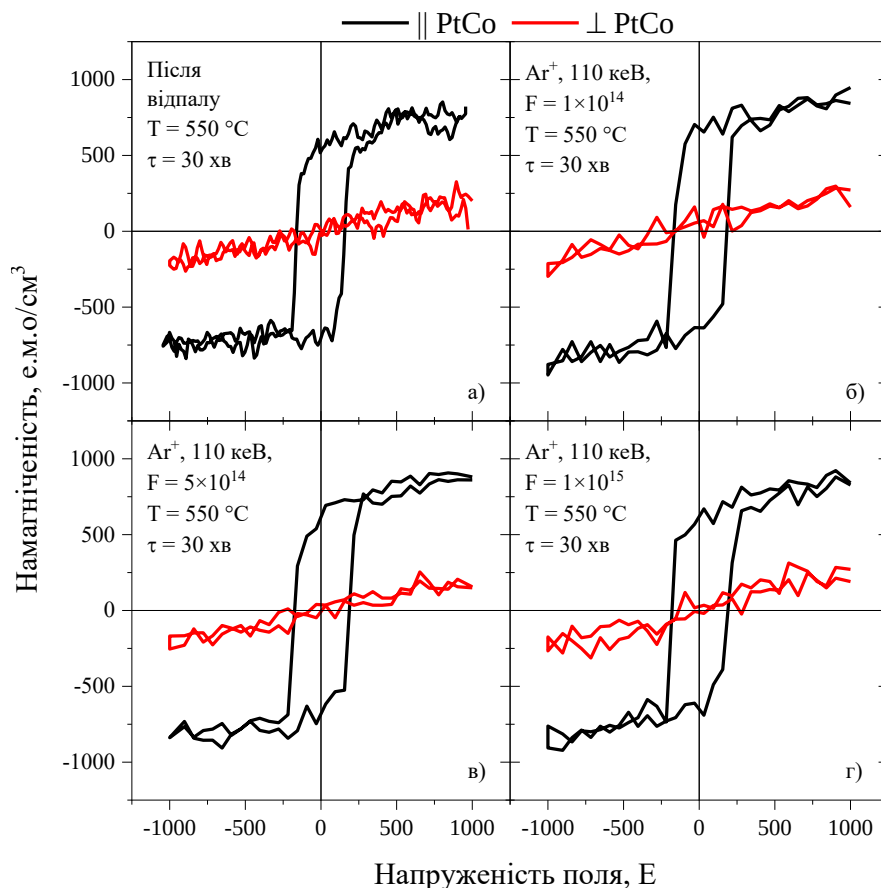


Рисунок 3.15 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій $\text{Pt}(10\text{ нм})/\text{Co}(10\text{ нм})$ після відпалу за температури $550\text{ }^\circ\text{C}$ упродовж 30 хвилин та після комплексної попередньої обробки іонами Ar^+ за різних режимів та подальшої термічної обробки

Для всіх плівок, оброблених іонами Ar^+ з наступним відпалом (рис. 3.15, б-г) можна спостерігати незначну зміну магнітних властивостей у порівнянні зі станом після одностадійного відпалу без попередньої обробки іонами (рис. 3.15, а).

Відповідні графіки зміни намагніченості насичення та коерцитивної сили представлено на рис. 3.16. Можна бачити, що комплексна попередня іонна і наступна термічна обробка нанорозмірних плівкових композицій $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})$ дозволяє досягти вищих значень намагніченості насичення та коерцитивної сили порівняно з одностадійною термічною обробкою.

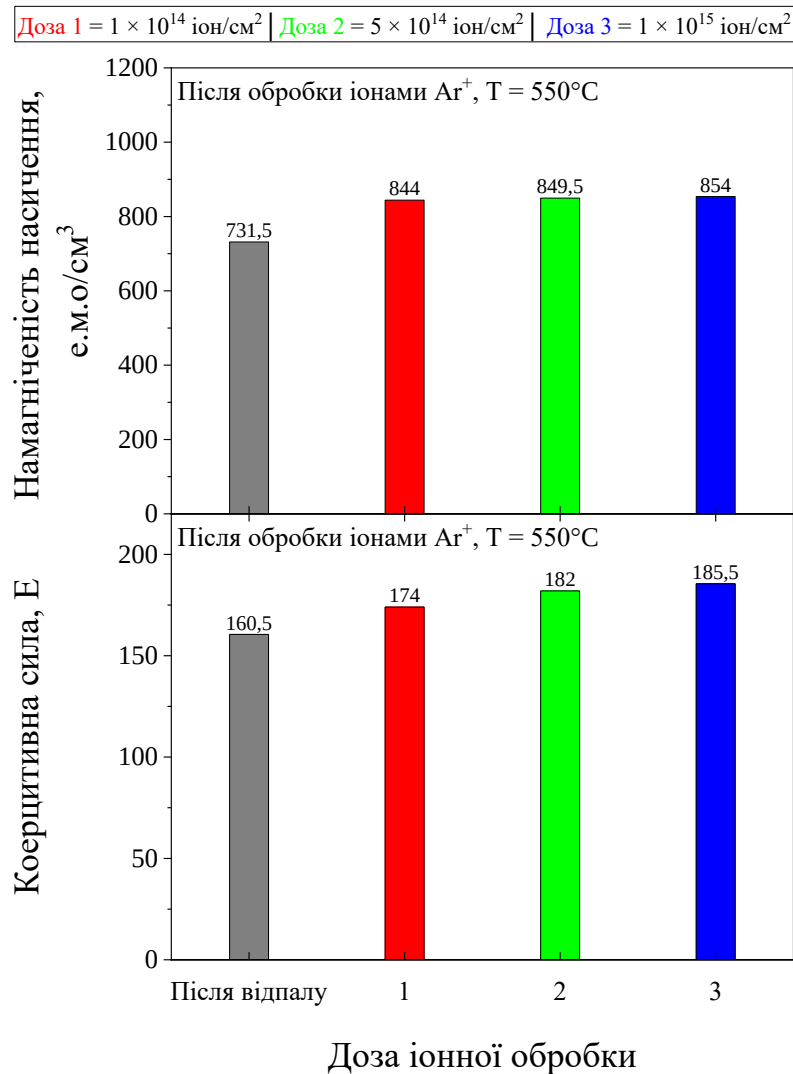


Рисунок 3.16 – Залежність намагніченості насичення і коерцитивної сили плівкових композицій $\text{Pt}(10 \text{ нм})/\text{Co}(10 \text{ нм})$ від параметрів комплексної попередньої Ar^+ іонної та наступної термічної обробки

На рис. 3.17 представлено польові залежності намагніченості нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) після обробки іонами N^+ без подальшого відпалу.

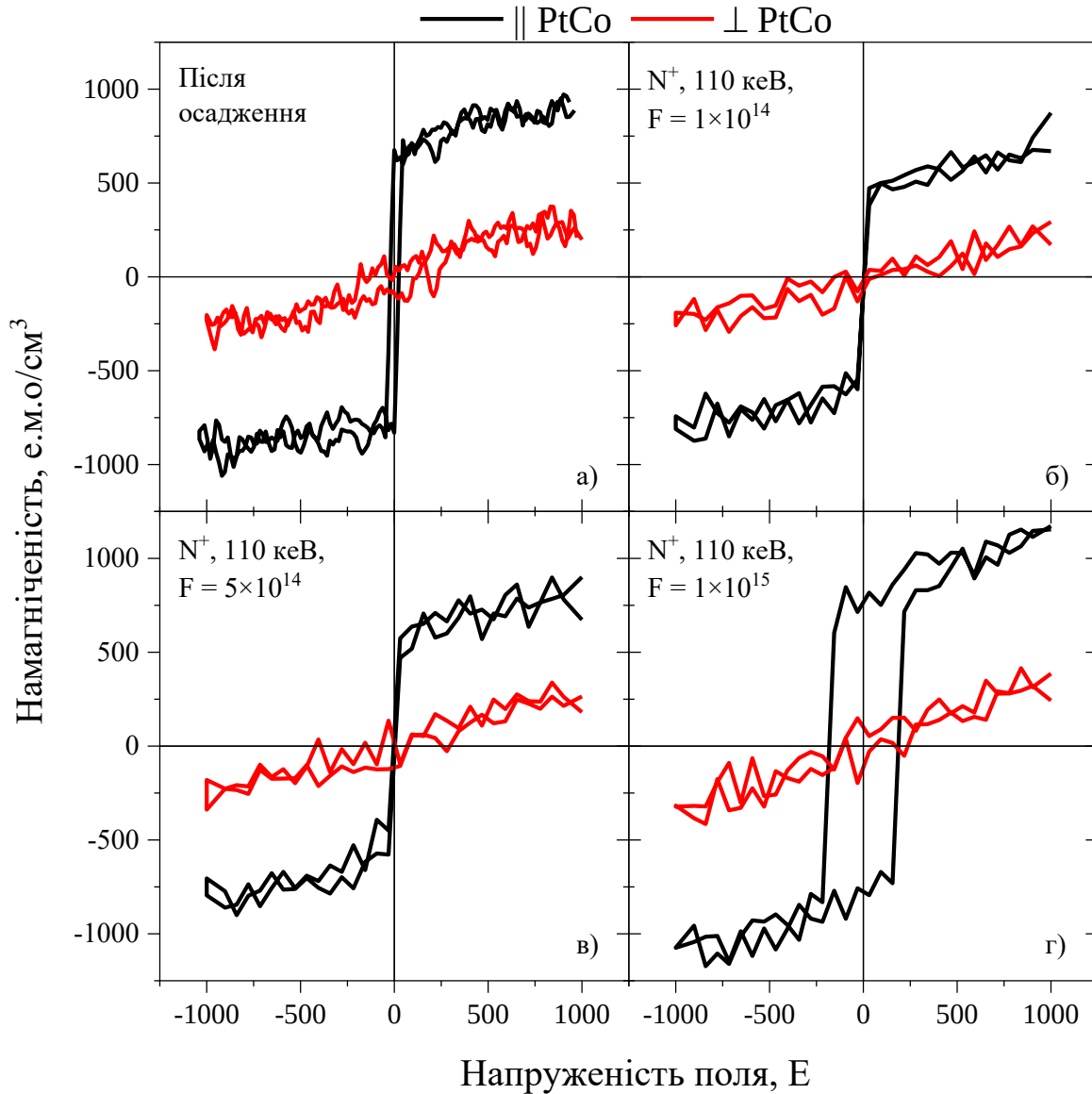


Рисунок 3.17 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) у стані після осадження та після обробки іонами N^+ за різних доз

За доз обробки 1×10^{14} іонів/см² та 5×10^{14} іонів/см² відбувається незначне зменшення коерцитивної сили плівкових зразків порівняно з вихідним станом після осадження (рис. 3.17, б-в). Варто також відзначити, що за дози 1×10^{14} іонів/см² спостерігається зменшення намагніченості насичення

порівняно зі станом після осадження, значення якої збільшуються зі збільшенням дози обробки іонами N^+ . За дози іонів N^+ 1×10^{15} іонів/см² (рис. 3.17, г) спостерігається значне збільшення як і намагніченості насичення, так і коерцитивної сили порівняно з меншими дозами, що можна чітко бачити з рис. 3.18.

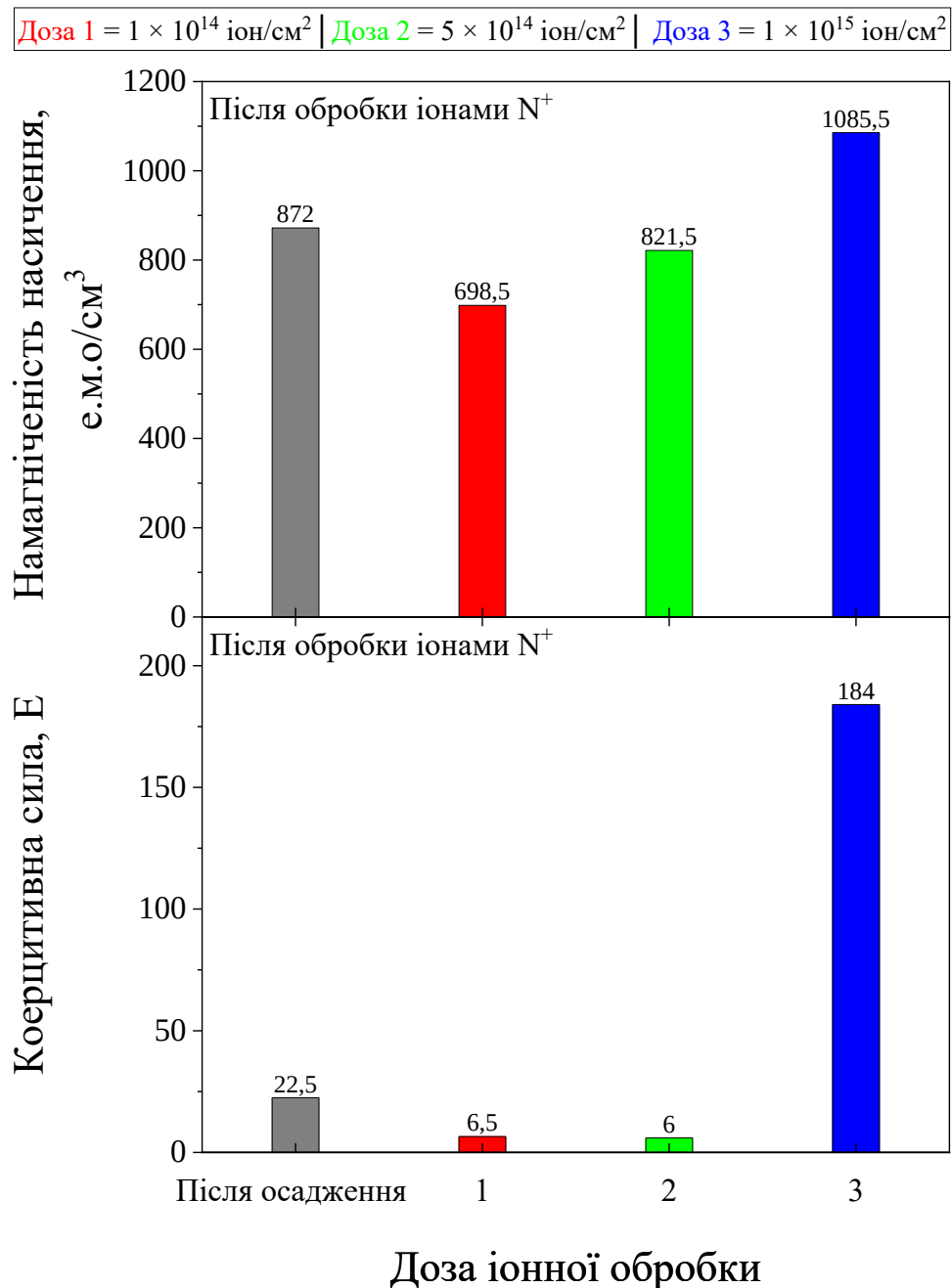


Рисунок 3.18 – Графік зміни магнітних властивостей в плівкових композиціях Pt(10 нм)/Co(10 нм) в залежності від режиму обробки іонами N^+

Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) після комплексної обробки іонами N^+ та наступної термічної обробки за температури 550 °C представлено на рис. 3.19.

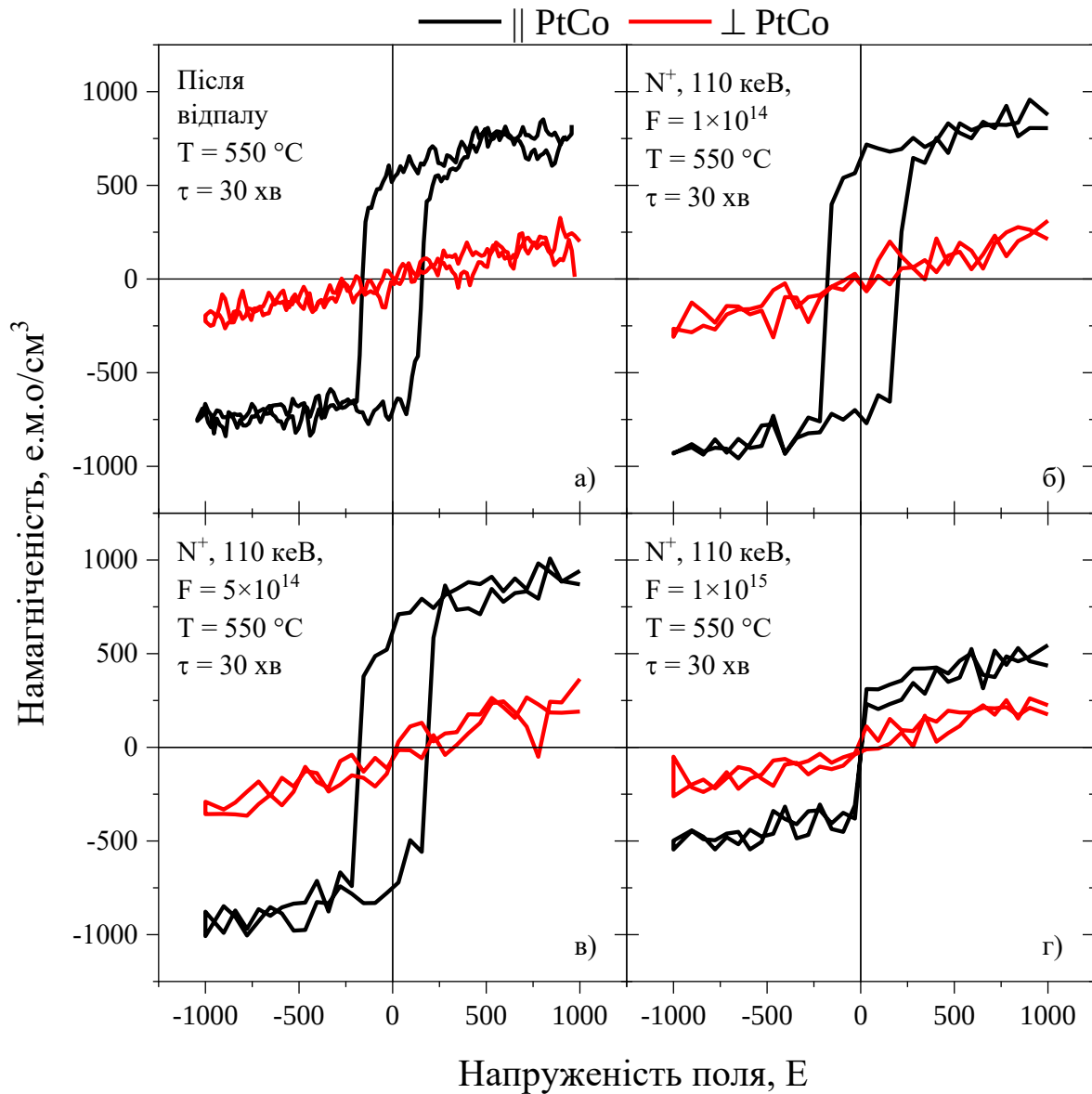


Рисунок 3.19 – Польові залежності намагніченості плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) після одностадійного відпалу за температури 550 °C упродовж 30 хвилин та комплексної обробки іонами N^+ за різних доз та подальшої термічної обробки

Спостерігається помірне збільшення коерцитивної сили за дози обробки іонами N^+ 1×10^{14} іонів/см² та 5×10^{14} іонів/см² (рис. 3.19, б-в) у порівнянні з

однотадійним відпалом. В результаті підвищення дози іонів до 1×10^{15} іонів/см² (рис. 3.19, г) коерцитивна сила значно зменшується. Аналогічна тенденція спостерігається і для намагніченості насичення (рис. 3.20).

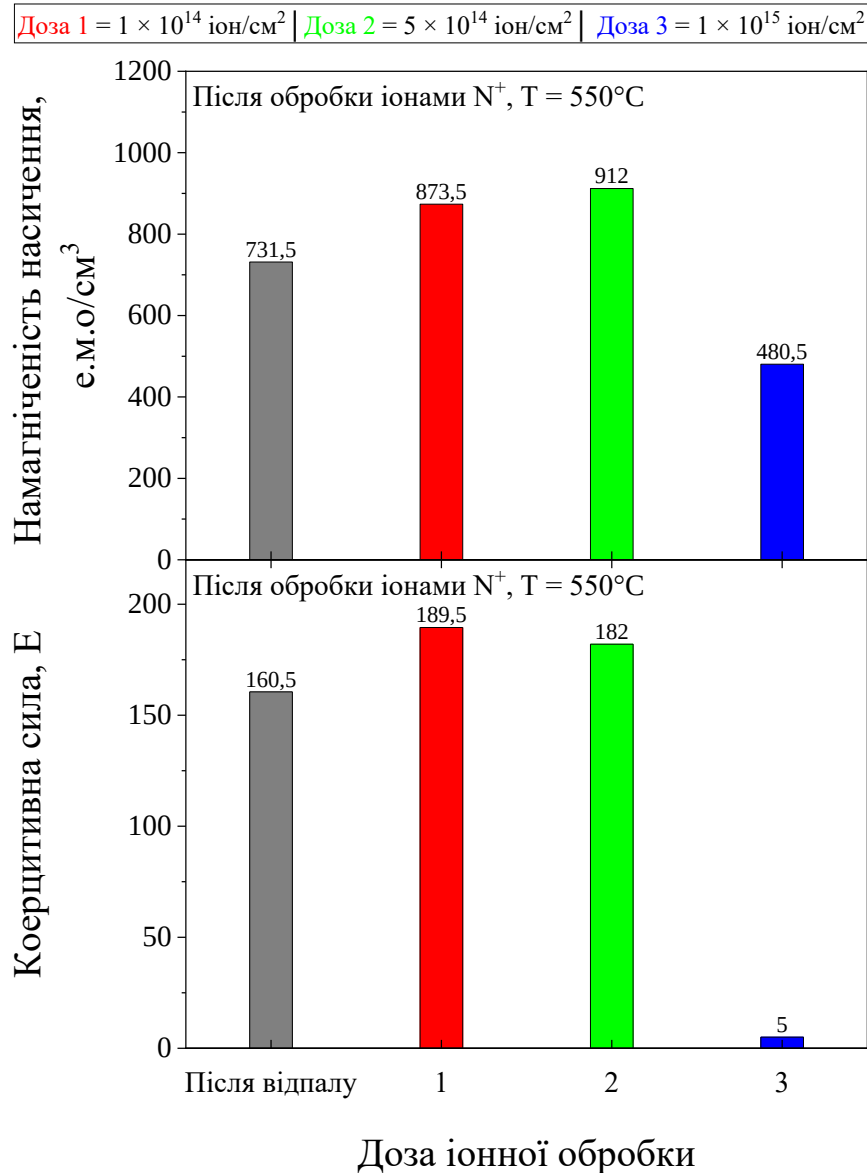


Рисунок 3.20 – Залежність намагніченості насичення і коерцитивної сили плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) від параметрів комплексної попередньої N⁺ іонної та наступної термічної обробки

Отримані результати свідчать, що комплексна попередня іонна та наступна термічна обробка є дієвим контролю магнітних властивостей, таких як

коерцитивна сила та намагніченість насичення у нанорозмірних плівкових композиціях на основі Pt/Co.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Виявлено, що обробка нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) іонами Ar^+ та N^+ з енергією 110 кеВ та дозами 1×10^{14} іонів/см² – 5×10^{14} іонів/см² обумовлює ініціалізацію дифузійних процесів між металевими шарами, збільшення дози випромінювання до 1×10^{15} іонів/см² обумовлює пригнічення даних процесів через втілення іонів до кристалічної решітки плівкового матеріалу.

2. Попередня іонна обробка нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм) дозволяє досягти формування монофазної структури плівкового матеріалу в процесі подальшої термічної обробки за температури 550 °С упродовж 30 хвилин, чого не спостерігалось в результаті одностадійної термічної обробки за тих самих параметрів.

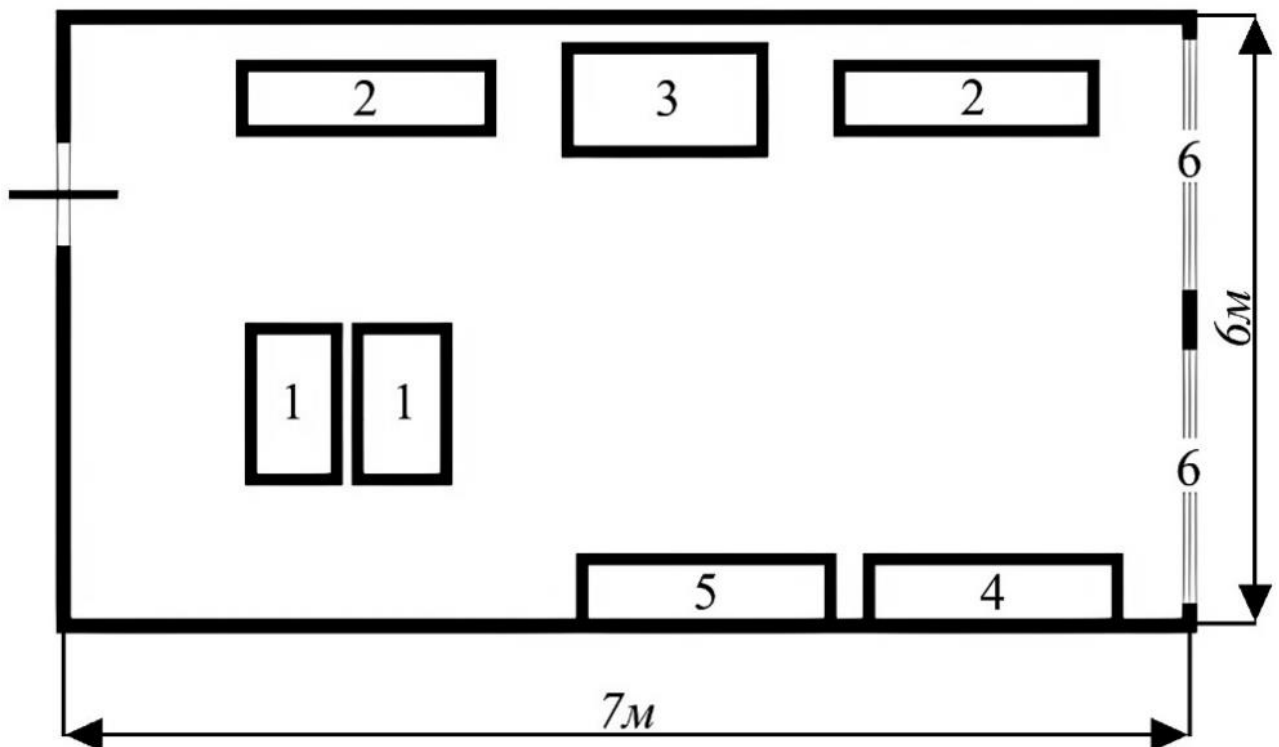
3. Комплексна попередня іонна та наступна термічна обробка є ефективним засобом контролю магнітних властивостей – намагніченості насичення та коерцитивної сили – нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), а досягнення вищих значень цих властивостей забезпечується в результаті комплексної обробки з попереднім бомбардуванням плівкового матеріалу іонами Ar^+ з дозою 1×10^{15} іонів/см² або іонами N^+ з дозою 5×10^{14} іонів/см² і подальшою термічною обробкою у вакуумі за температури 550 °С упродовж 30 хвилин.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основним завданням охорони праці є розробка та впровадження методів і засобів для захисту працівників від можливих загроз і небезпек на робочому місці, а також запобігання аваріям і ліквідація їх наслідків на підприємстві. В Україні право на безпечні умови праці гарантується Законом України "Про охорону праці", Конституцією України та іншими нормативно-технічними та законодавчими актами.

4.1 Аналіз параметрів приміщення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Виконання НДР проходило у лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства, план якої відображено на рис. 4.1.



1 – робочий стіл; 2 – установка ВУП-5М (робоче місце); 3 – стіл з персональним комп'ютером; 4 – шафа для зразків; 5 – стіл з атмосферою піччю; 6 – вікна

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Параметри приміщення лабораторії наступні: ширина 6 м, довжина 7 м, висота стелі 2,7 м. Таким чином площа приміщення становить 42 м², а об'єм приміщення 113,4 м³. Кількість працівників у лабораторії становить 2 людини, отже, площа що припадає на 1 людину становить 21 м², а об'єм 56,7 м³. Ці розраховані параметри знаходяться в межах санітарних норм, встановлених у ДсанПіН 3.3.2-007-98 [43].

4.2 Освітлення в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Виконання будь-яких видів робіт завжди пов'язане з напруженням зору, оскільки більшість інформації про навколишнє середовище та події людина сприймає саме через зір. Недостатнє або погане освітлення може призвести до втоми очей та погіршення зору. У забезпеченні комфортних умов праці та зменшення напруженості зору важливу роль відіграє правильне освітлення робочої зони, оскільки таке освітлення сприяє підвищенню продуктивності людини, концентрації на поставлених задачах та покращенню уваги.

4.2.1 Характеристика природнього освітлення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Коефіцієнт природнього освітлення (КПО) вимірює ступінь освітленості всередині приміщення порівняно з освітленістю на вулиці. Зазвичай використовується наступна формула для розрахунку значення КПО (e_n) (4.1) [44]:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (4.1)$$

де e_n – значення КПО для робіт середньої точності;

e_n – нормоване значення КПО;

m_n – коефіцієнт світлового клімату.

У зв'язку з розташуванням вікон на південній стороні приміщення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства, коефіцієнт світлового клімату має значення 0,85. Для категорії робіт середньої точності, КПО складає 1,5 %. Враховуючи ці дані, розрахункове значення КПО для лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства становить 1,275 ($e_n = 1,5 \cdot 0,85 = 1,275$). У приміщенні лабораторії використовується комбіноване освітлення, яке включає поєднання природного та штучного освітлення. Природне освітлення забезпечується через бічні вікна на південній стороні приміщення, що дозволяє використовувати сонячне світло для освітлення та зменшити потребу в штучному освітленні. Штучне освітлення здійснюється за допомогою рівномірно розташованих люмінесцентних ламп типу ЛБ-40, які забезпечують необхідний рівень освітленості та рівномірний розподіл світла по території приміщення.

4.2.2 Характеристика штучного освітлення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Освітлення в приміщенні лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства забезпечується 12 люмінесцентними лампами типу ЛБ-40. Для оцінки якості штучного освітлення можна скористатися розрахунком нормованої освітленості, враховуючи коефіцієнт використання світлового потоку. Нормовану освітленість можна розрахувати за формулою (4.2) [45]:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z}, \quad (4.2)$$

де E – нормована освітленість, лк;

F – світловий потік;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку;

K – коефіцієнт запасу;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення.

Розрахункові параметри, необхідні для визначення нормованої освітленості в приміщенні в лабораторії, наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахункові параметри для визначення нормованої освітленості в приміщенні лабораторії

Світловий потік, F , лм	3200
Коефіцієнт запасу, K	1,5
Коефіцієнт нерівномірності, Z	1,1
Кількість світильників, N	6
Площа приміщення, S , м ²	42
Кількість ламп у світильнику, n	2
Коефіцієнт використання світлового потоку, η	0,56

Таким чином, для лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства, розташованої у приміщенні лабораторії, розраховане значення нормованої освітленості складає 310 лк. Згідно вимог ДБН В.2.5.28-2018 [44], освітленість робочого приміщення повинна бути не менше 300 лк. Отримане значення відповідає встановленій нормі, що свідчить що штучне освітлення є достатнім для даної лабораторії відповідно вимогам.

4.3 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

Приміщення лабораторії, в якому проводилось виконання представленої НДР, передбачає можливий вплив наступних факторів ризику:

- небезпека ураження електричним струмом;
- теплові ураження;
- шум;
- вібрації.

У табл. 4.2 надано інформацію про потенційні шкідливі фактори та небезпеки, що пов'язані з використанням обладнання, необхідного для проведення науково-дослідних робіт у лабораторії.

Таблиця 4.2 – Шкідливі фактори при виконанні НДР

Операція	Устаткування	Потенційні небезпеки
Підготовка зразків	Алмазний різак	Травмування
Термічна обробка зразків	Установка ВУП-5М	Ураження електричним струмом. Ураження теплом. Шкідливий вплив шуму та вібрацій
Обробка результатів	Комп'ютер	Ураження електричним струмом

Перед початком роботи в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства проводиться інструктаж з техніки безпеки з метою проінформувати працівників стосовно ШНВФ та заходів задля запобігання нещасним випадкам.

4.3.1 Небезпечні чинники при роботі з установкою ВУП-5М

Універсальна вакуумна установка ВУП-5М це спеціалізоване обладнання, яке вимагає навичок роботи з такою технікою, знання техніки безпеки та

дотримання правил експлуатації вакуумного обладнання. Панель керування такою установкою відображає інформацію про рівень води в охолоджувальній системі, температуру в камері, герметичність камери та інші важливі параметри.

Установка ВУП-5М працює від електромережі з напругою 380 В, тому пошкодження кабелів живлення або електрообладнання установки може призвести до ризику ураження електричним струмом. Для забезпечення електробезпеки у установці передбачено підключення до системи заземлювання, а живлення установки від мережі здійснюється через автоматичні вимикачі.

Певні елементи установки, такі як нагрівальний стілець, а також дифузійний вакуумний насос, можуть нагріватися до температур приблизно 500 °С під час роботи, створюючи ризик отримання опіків. Для охолодження таких компонентів використовується система подачі холодної проточної води. У випадку несправності системи охолодження або припинення подачі води установка ВУП-5М автоматично вимикається задля запобігання перегріву зазначених компонентів.

Відведення повітря з вакуумної камери установки ВУП-5М відбувається за допомогою гнучкого гумового шлангу, який підключений до вихідного патрубку механічного форвакуумного насосу і виведений назовні приміщення, що дозволяє уникнути потрапляння всередину лабораторії інертних газів та потенційно шкідливих випарів.

Належне використання установки ВУП-5М є ключовим для забезпечення її надійної роботи та мінімізації ризиків небезпечних ситуацій. Запуск і вимкнення установки потребують суворого дотримання наступної послідовності дій:

- візуальна перевірка установки на предмет пошкоджень обладнання;
- активація системи водяного охолодження;
- увімкнення електроживлення установки та подальший її запуск;
- увімкнення механічного насосу попереднього вакууму (форвакуумного);
- увімкнення насосу високого вакууму (дифузійного);
- відкачування атмосфери повітря з вакуумної камери установки та створення високого вакууму.

Вимкнення відбувається в наступній послідовності:

- вимкнення електроживлення на нагрівальні елементи предметного столика;
- вимкнення дифузійного вакуумного насосу при охолодженні температури зразка до 100 °С;
- вимкнення форвакуумного механічного насосу при охолодженні дифузійного вакуумного насосу до температури 60 °С;
- відключення роботи установки;
- знеструмлення установки;
- відключення подачі водяного охолодження.

Після вимкнення установки ВУП-5М передбачено підтримку низького рівня вакууму, що перешкоджає взаємодії між атмосферою повітря та обладнанням всередині камери.

4.3.2 Безпека при роботі з електричними приладами в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Термін "електробезпека" охоплює сукупність заходів, спрямованих на захист працівників від ризику ураження електричним струмом, внаслідок дії якого можуть виникати електротравми. Насамперед найбільша потенційна загроза їх отримання супроводжується через контакт із неізольованими проводами або незаземленим обладнанням.

Внаслідок отримання таких травм можливе ураження м'яких тканин організму та нервової системи, що може мати смертельні наслідки [46].

В залежності від потенційного ризику ураження електричним струмом, приміщення поділяють на декілька категорій:

- приміщення без підвищеної небезпеки;
- приміщення з підвищеною небезпекою;
- особливо небезпечні приміщення.

Лабораторія тонкоплівкового матеріалознавства це приміщення із підвищеним рівнем потенційної небезпеки. Загроза ураження електричним

струмом виникає через використання комп'ютерного обладнання, яке слугує для обробки отриманих експериментальних даних, та установки ВУП-5М.

Для зменшення потенційних ризиків ураження струмом прийнято ряд заходів. Так, електричний щиток розташований безпосередньо біля входу до лабораторії, що надає швидкий доступ до вимикання електропостачання при ризику небезпеки. Усі електричні пристрої лабораторії, включаючи установку ВУП-5М, підключені до мережі через надійно ізольовані дроти з наявним заземленням, що забезпечує надійний захист від ризиків ураження електричним струмом. Також варто відзначити, що електроживлення лабораторного обладнання забезпечується підключенням через автоматичні запобіжники, які в разі короткого замикання або ураження людини електричним струмом автоматично спрацьовують з маленьким часом затримки для створення безпечніших умов експлуатації цього обладнання. А організація робочих місць спроектована таким чином, щоб мінімізувати ризик випадкового контакту з небезпечними елементами обладнання.

4.3.3 Вплив шуму та вібрацій в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Шум та вібрації мають значний вплив на здоров'я працівників та комфорт у робочій зоні. Понаднормовий рівень шуму може викликати погіршення слуху, негативно впливати на психологічний та емоційний стан, а також привести до розладів нервової системи. Тривалий вібраційний може призвести до порушень у функціонуванні м'язів та опорно-рухового апарату.

Під час виконання науково-дослідних робіт обладнання може створювати шум та вібрації. Установка ВУП-5М функціонує за допомогою електричних пристроїв та додаткових приладів. Основними джерелами шуму є вентилятори охолодження, які розташовані в середині установки та вакуумні насоси (дифузійні та механічні), що використовуються для створення вакууму в камері. Ці насоси є головними джерелами шуму та вібрацій. Небезпечний рівень шуму

для людини, при якому можуть виникнути фізичні ушкодження та втрата слуху становить 120 дБА. У процесі роботи установки рівень шуму становить 52 дБА, що відповідає нормативам ДСН 3.3.6.037-99 [47]. Робота механічного форвакуумного насоса супроводжується виникненням вібрацій. Для зменшення негативного впливу вібрацій на здоров'я людини та стан обладнання насос встановлюється на гумову віброізоляційну підставку і з'єднується з установкою ВУП-5М через гумовий шланг. Ці заходи допомагають знизити рівень вібрацій до безпечного, який відповідає санітарним нормам [48].

4.3.4 Мікроклімат робочої зони в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Якість повітря в робочій зоні є надзвичайно важливим фактором робочого середовища, який впливає на самопочуття та продуктивність працівників. Вона може бути ключовою причиною захворювань і значно впливає на здоров'я, тому повітря в робочому просторі постійно контролюється та оцінюється за допомогою аналізу мікрокліматичних умов та вмісту шкідливих речовин.

Мікрокліматичні умови – це сукупність певних параметрів, які визначають стан повітря в робочій зоні. До параметрів, що характеризують мікроклімат робочої зони, належать [49]:

- температуру повітря, °С;
- відносну вологість повітря, %;
- швидкість руху повітря, м/с;
- інтенсивність інфрачервоного випромінювання від поверхонь обладнання та активних зон технологічних процесів, Вт/м².

Роботи, що виконуються на підприємствах або в лабораторіях, класифікуються за категоріями залежно від енерговитрат організму, пов'язаних з їх виконанням. Для кожної категорії встановлені відповідні допустимі мікрокліматичні вимоги згідно з вимогами ДСН 3.3.6.042-99 [48].

Параметри мікроклімату приміщення лабораторії, де проводилася дана НДР, наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри мікроклімату приміщення лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства у порівнянні з еталонними значеннями відповідно категорії робіт [48]

Категорія робіт середньої важкості, Па			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18-20	40-60	0,2
Виміряне значення	19	55	0,2
Теплий	21-23	40-60	0,3
Виміряне значення	22	50	0,3
Висновок щодо відповідності вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

Науково-дослідна робота, що виконувалась у лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства, за класифікацією відноситься до категорії Па і включає роботи які передбачають ходіння та переміщення малогабаритних предметів вагою до 1 кг у стоячому або сидячому положенні, тобто передбачає невеликий рівень фізичних навантажень, за яких енерговитрати людського організму варіюються в межах від 160 ккал/год до 210 ккал/год [48].

З представлених результатів мікрокліматичного аналізу можна побачити, що приміщення лабораторії, в якому проводилася дана НДР відповідає встановленим у ДСН 3.3.6.042-99 [48] вимогам та створює комфортні мікрокліматичні умови для виконання даної роботи.

4.4 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Організація праці на робочому місці – це система заходів, спрямованих на ефективне використання обладнання, знарядь та предметів праці під час виконання роботи [50]. Робоче місце представляє собою простір, де людина здійснює свою трудову діяльність. Дотримання норм та правил організації праці на робочому місці, які відображені у ДСанПіН 3.3.2.007-98 [43] та НПАОП 0.00-7.15-18 [51] значно підвищує ефективність праці та знижує вплив шкідливих факторів на здоров'я. Згідно з цими нормами, організація робочого простору, графік роботи та відпочинку працівників визначаються залежно від робочої пози (вільна, стояча або сидяча), у якій перебуває працівник. Виконання даного науково-дослідного завдання передбачає необхідність перебування у сидячій позі, оскільки для основної частини роботи використовується комп'ютер. Параметри та організація робочих місць у лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства, де проводилась дана науково-дослідна робота, відповідають санітарним нормам і створюють комфортні умови праці [51]:

- висота столу 800 мм – 900 мм;
- ширина столу 1000 мм – 1400 мм;
- глибина столу 800 мм – 1000 мм;
- місце для ніг: висота – 600 мм, ширина – 500 мм, глибина (на рівні колін) – 450 мм, глибина (на рівні витягнутої ноги) – 650 мм;
- відстань від екрана ПК до очей користувача – 600 мм;
- клавіатура на відстані 300 мм від краю столу;
- коефіцієнт відбиття поверхні робочого столу – 0,6.

4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час виконання робіт завжди присутня ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, пошкодження обладнання, витік шкідливих речовин, вибух, тощо. Враховуючи це, перед початком роботи

проводиться аналіз потенційних небезпек і розробляються заходи для їх запобігання та усунення. При цьому беруться до уваги особливості матеріалів, речовин та обладнання, що використовуються, а також особливості робочих процесів [52].

4.5.1 Пожежна безпека в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

При виконанні науково-дослідної роботи у лабораторії термічної обробки особливу увагу приділяють запобігання пожежі у приміщенні, у разі виникнення якої працівники повинні негайно покинути робочі приміщення та слідувати плану евакуації, зазначеному на схемі на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – План евакуації 5 поверху навчального корпусу

Відповідно до стандарту НАПБ Б.03.002-2007 [50], лабораторія тонкоплівкового матеріалознавства відноситься до категорії "Г" через наявність негорючих матеріалів, які можуть бути нагрітими або розжареними та виділяти тепло [50]. Електрообладнання, яке використовується для проведення наукових досліджень, може становити потенційну загрозу пожежі. Такі пожежі

класифікуються як пожежі класу "Е" і для їх гасіння рекомендується застосовувати порошкові або вуглекислотні вогнегасники. У лабораторії встановлена система пожежного оповіщення, яка автоматично подає сигнал у разі виявлення вогню. Горючі речовини зберігаються у герметичних негорючих контейнерах. Нагріті або небезпечні частини обладнання розташовані на безпечній відстані від легкозаймистих матеріалів, а електрообладнання та кабелі мають надійну ізоляцію і заземлення. Профілактичні заходи для запобігання пожежам охоплюють регулярну перевірку вогнегасників, систем пожежної сигналізації, електричної проводки та обладнання. Співробітники обов'язково проходять інструктаж з правил поведінки під час надзвичайних ситуацій.

4.5.2 Алгоритм дії у випадку повітряної тривоги під час роботи в лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства

Відповідно до наказу № НУ/129/2022 від 04.08.2022, сигнал "Повітряна тривога" передається через систему оповіщення, що охоплює мережу сирен, регіональне радіо та телебачення. Сигнал при цьому триває від трьох до п'яти хвилин і слугує як попередження про можливі ракетні або авіаційні атаки, з рекомендацією негайно перейти до найближчого укриття. Також можна отримувати сповіщення цивільного захисту, такі як "Повітряна тривога" та "Відбій повітряної тривоги", на телефон, встановивши додатки "Повітряна тривога" або "Київ цифровий" з онлайн магазинів додатків AppStore чи Google Play.

Дії працівників, під час виконання роботи у разі сигналу "Повітряна тривога" наступні:

а) після реагування на сигнал "Повітряна тривога":

1) співробітники зобов'язані слугувати розпорядженню керівництва та перейти до найближчого укриття або захисної споруди;

2) якщо можливість негайно перейти до укриття відсутня, співробітники мають обрати найбільш захищене місце в приміщенні, подалі від вікон і зовнішніх стін, та перейти до нього;

3) співробітники мають уникати виходу на вулицю під час всього часу дії "Повітряної тривоги";

б) укриття або захисна споруда:

1) співробітники повинні швидко та організовано перейти до укриття або захисної споруди;

2) в укритті слід суворо дотримуватися вказівок та інструкцій цивільного захисту, наданих керівництвом або відповідними органами;

в) Після закінчення сигналу "Повітряна тривога":

1) співробітники можуть повернутися на робочі місця лише після отримання відповідних вказівок від органів цивільного захисту або керівництва;

2) завдання з цивільного захисту мають виконуватися відповідно до встановлених інструкцій, правил та вимог.

Таким чином, при отриманні сигналу "Повітряна тривога", працівники повинні негайно реагувати, дотримуватись вказівок керівництва та переходити до найближчого укриття або захисної споруди. Суворе виконання інструкцій з безпеки є критично важливим для забезпечення особистої безпеки та мінімізації ризиків під час надзвичайних ситуацій.

4.6 Висновки до розділу 4

1. Проведено аналіз потенційних небезпек під час виконання науково-дослідної роботи в приміщенні лабораторії тонкоплівкового матеріалознавства. Робота з лабораторним обладнанням вимагає належної підготовки, наявності необхідних навичок та суворого дотримання правил і рекомендацій для запобігання можливим аварійним ситуаціям та їх наслідкам.

2. Такі показники як мікроклімат, рівень шуму, вібрацій та організація робочого місця при виконанні наукових досліджень, спрямованих на виявлення закономірностей дифузійного формування нанорозмірних матеріалів на основі CoPt, мають повну відповідність санітарним нормам та забезпечують комфортні умови праці під час проведення науково-дослідної роботи.

3. Рівень природного освітлення, який забезпечується бічними віконними прорізами в приміщенні, не відповідає вимогам комфортних умов праці, тому у лабораторії використовується комбінована система освітлення, що поєднує природне та штучне освітлення для відповідності санітарним нормам.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

5.1 Опис ідеї стартап-проєкту

Сучасні тенденції у розвитку мікро- та наноелектроніки зосереджені на підвищенні обсягів збереження даних, задля забезпечення відповідності їх кількості у сучасному світі, та підвищенні швидкості їх обробки. Однак подальше зменшення розмірів компонентів таких пристроїв не забезпечує суттєвого покращення їх характеристик, що робить актуальним впровадження нових технологій та матеріалів.

Таким чином, головна ідея даного проєкту зводиться до використання нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co як матеріалу для виготовлення спінових клапанів (рис. 5.1), які застосовуються в магніторезистивній пам'яті з довільним доступом (MRAM), зчитувальних головах жорстких дисків та магнітних датчиків. Продуктом стартапу є НПК Pt(10 нм)/Co(10 нм), осаджені методом магнетронного розпорощення на кремнієві підкладки SiO₂(100 нм)/Si(001) та піддані відпалу у вакуумі для покращення їх характеристик.

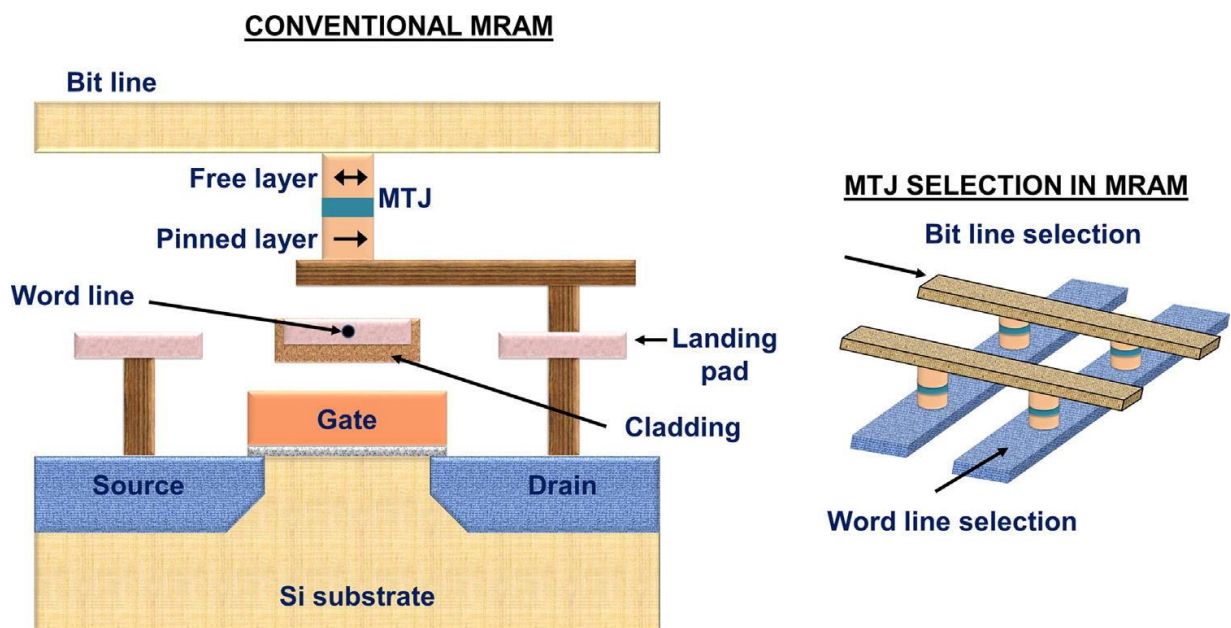


Рисунок 5.1 – Схематичне зображення спінових клапанів в складі комірок магніторезистивної пам'яті з довільним доступом [53]

Враховуючи те, що вплив комплексної іонної та термічної обробки на формування відповідного фазового складу з певним комплексом властивостей, а також оптимізація методів їх отримання не є дослідженими в повній мірі для наявних у даній роботі нанорозмірних плівкових композицій на основі Pt/Co, оцінка ринкової спроможності продукту не може бути проведена в повному обсязі. Втім перспективним є використання даних плівок для виготовлення складових елементів приладів мікро- та нано-електроніки та спінтроники, що відображено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка тонкоплівкових композицій на основі Pt/Co для використання у мікро- та нанoeлектроніці	1. Магніторезистивна пам'ять з довільним доступом	Розробка енергонезалежної пам'яті з зменшенням робочої напруги водночас зі зменшення мінімального часу затримки сигналу та зі збільшенням ефективної пропускної здатності пристрою
	2. Зчитувальні голівки жорстких дисків	Покращення точності позиціонування магнітних головок та збільшення швидкості читання та запису даних

5.2 Аналіз техніко-економічних переваг ідеї

У табл. 5.2 наведено сильні, нейтральні та слабкі сторони даного стартап-проєкту, спрямованого на розробку нанорозмірних тонкоплівкових матеріалів для виробництва компонентів спінтроники та мікроелектроніки, у порівнянні з провідними конкурентами, якими слугують компанії, що активно займаються

розробкою та виробництвом продуктів спінтроніки, а саме: Intel, Samsung та Honeywell [54].

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари				W	N	S
		Даний проєкт	Samsung	Intel	Honeywell	(слабка сторона)	(нейтральна сторона)	(сильна сторона)
1	Собівартість продукції	Магніторезистивна пам'ять з довільним доступом				—	—	+
2	Затрати на технічне обслуговування обладнання для виробництва					—	+	—
3	Вартість матеріалів					—	+	—
5	Готовність продукції до випуску на ринок					+	—	—

* *S* (сильна сторона), *N* (нейтральна сторона), *W* (слабка сторона)

5.3 Технологічний аудит ідеї проєкту

Одним з ключових етапів, що передуює промисловому виробництву продукту стартап-проєкту, є проведення технологічного аудиту ідеї такого проєкту, який включає аналіз наявних технологій, необхідних для покрокової реалізації виробництва, а також оцінку їх існування та доступності (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Аналіз технологій для реалізації проєкту

№	Ідея проєкту	Технологія	Наявність технології	Доступність технології
1	Магніторезистивна пам'ять з довільним доступом	Магнетронне осадження плівок	Наявна технологія	Доступна
2		Іонна обробка плівок	Наявна технологія	Доступна
3		Термічна обробка плівок у вакуумі	Наявна технологія	Доступна
4		Структурно-фазові дослідження зразків	Наявна технологія	Доступна
5		Фотолітографія	Наявна технологія	Доступна

Результати технологічного аудиту проєкту свідчать про доступність і наявність технологій, необхідних для його реалізації. Однак об'єкт дослідження є лише частиною готового та функціонуючого пристрою, тому для запуску виробництва потрібні додаткові дослідження та роботи, що забезпечать виготовлення повноцінного пристрою.

5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску проєкту

Для ефективного планування розвитку проєкту необхідно здійснити аналіз ринкового середовища, зокрема оцінити ринкові можливості та загрози, які можуть вплинути на реалізацію проєкту. Основними конкурентами, що займаються розробкою технологій спінтроники та виробництвом мікросхем для магніторезистивної пам'яті з довільним доступом, є компанії Samsung, Intel та Honeywell. Результати оцінки потенційного ринкового середовища, а також інформація про основних конкурентів наведені у табл 5.4. Аналіз та характеристика потенційних клієнтів наведена у табл. 5.5.

Таблиця 5.4 – Оцінка потенційного ринкового середовища

Показники стану ринку(найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	3
Загальний об'єм ринку, грн/ум. од. на 2024 рік	82,3 млрд грн. [54]
Динаміка ринку	Зростаючий [55]
Наявність обмежень для входу	Відсутні
Специфічні вимоги до стандартизації чи сертифікації	Присутні за стандартами FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485
Середня рентабельність в галузі, %	20-30

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Характеристика	Опис
Потреби, що формують ринок	Збільшення енергоефективності Збільшення швидкості та терміну зберігання даних
Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Компанії, що виробляють мікросхеми MRAM: Samsung, Intel, Honeywell
Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Відмінності у технічних параметрах та умовах експлуатації
Вимоги споживачів до товару	Низька вартість, довгий термін експлуатації, достатня швидкодія
Вимоги споживачів до компанії	Стабільність кількості виготовленого продукту та його поставок, можливість варіювання замовлень під час виробництва

Однак, окрім аналізу ринкових можливостей важливо також оцінити потенційні загрози (табл. 5.6) та нові можливості (табл. 5.7), які можуть вплинути на розвиток проєкту. Під час оцінки цих факторів одночасно визначається реакція компанії на потенційні ситуації, що дозволяє заздалегідь

розробити стратегії для швидкої реакції на зміни ринкових умов.

Таблиця 5.6 – Фактори можливих загроз проєкту

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Нестабільність ринку у галузі мікроелектроніки та напівпровідникових технологій	Втрата фінансування або його зменшення	Залучення компаній- партнерів для підтримки
	Зменшення попиту	Покращення технології, та як наслідок зниження собівартості продукції
	Скорочення ресурсів для функціонування виробництва	Оптимізація виробництва

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей проєкту

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості продукції	Зменшення витрат на матеріали або їх заміна без втрати властивостей продукту а також оптимізація технології виготовлення	Збільшення виробничих потужностей із збільшенням обсягу продажів
2	Прискорення швидкості роботи пам'яті	Розробка та вдосконалення мікросхем пам'яті відповідно	
3	Зменшення технологічного процесу	сучасних технологічних процесів	

Для того, щоб мати можливість точно сказати в який період часу варто впроваджувати продукцію, запропоновану у даній роботі, та з якої кількості товару чи послуги доцільно розпочинати це впровадження, необхідно провести

ступеневий аналіз конкуренції на ринку, який наведено у табл.5.8.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1	2	3
1. Тип конкуренції: олігополія	Ринок пам'яті наразі домінує невелика кількість великих гравців, таких як Samsung, Honeywell, Intel та інші. Через складність технології та високі інвестиційні бар'єри для нових гравців, конкуренція обмежена	Постійний тиск на покращення якості та інновації для підтримки конкурентних позицій та зменшення ціни
2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Виробництво пам'яті є глобальним ринком із ключовими гравцями, що оперують на різних континентах і орієнтовані на міжнародну клієнтську базу	Завоювати довіру на Українському ринку з подальшим розвитком на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Найбільш привабливою є галузь мікроелектроніки та напівпровідникових технологій, в якій відбувається основна конкуренція	Акцент на технічні характеристики та унікальні рішення для виділення серед аналогів у цій галузці

Продовження таблиці 5.8

1	2	3
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Компанії конкурують за створення пам'яті з кращими характеристиками (швидкість, енергоспоживання, обсяг пам'яті тощо), тобто за товари одного виду з різними технічними показниками	Покращення характеристик пам'яті
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Основні переваги досягаються за рахунок технологічних інновацій, якості продукції, патентів та унікальних технічних рішень, а не лише за рахунок цінової політики	Інвестиції в інновації та патенти задля можливості за меншу ціну збільшити характеристики пам'яті
6. За інтенсивністю: марочна	Великі компанії, такі як Samsung або Intel, мають впізнавані бренди, що використовують свої торгові марки для залучення клієнтів і створення довіри до своєї продукції	Розвиток сильного бренду та репутації для збільшення частки ринку Можливість реалізації як і малих (на початку виробництва) так і великих партій

SWOT-аналіз є заключним етапом розгляду ринкових можливостей проєкту. Він включає оцінку сильних і слабких сторін, а також можливостей та потенційних загроз, з якими може зіткнутися проєкт. Перелік цих факторів наведено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – SWOT-аналіз проєкту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
– висока швидкість та енергоефективність пам'яті; – збільшення терміну експлуатації пристроїв зберігання інформації.	– необхідність у проведенні додаткових НДДКР та високі витрати на них; – необхідність створення та тестування робочих прототипів.
Можливості:	Загрози:
– участь у міжнародних НДДКР та патентування їх результатів; – співпраця з компаніями що виготовляють мікрочіпи, мікросхеми та системи пам'яті.	– необхідність значних початкових інвестицій для масштабного виробництва; – швидкий технологічний розвиток і поява нових, конкурентних технологій пам'яті

Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) дуже перспективні для їх використання в магнітній пам'яті з довільним доступом та інших пристроїв спінтроники та мікро- та наноелектроніки. Проте існує потреба у додаткових науково-дослідних та дослідно-конструкторських роботах задля покращення їх магнітних властивостей. Основною метою цієї НДР було дослідження впливу комплексної іонної та термічної обробки на структурно-фазові перетворення та зміну магнітних властивостей у нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Co. Отримані результати цієї роботи свідчать про можливість розробити методи та засоби для удосконалення необхідних властивостей цих НПК, що є важливими для організації технічних процесів виробництва, та кінцевого виробництва на їх основі готових пристроїв та суміжної продукції.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для формування маркетингової програми даного стартап-проекту визначено основні переваги потенційного товару в порівнянні із аналогами, що дасть можливість стверджувати про потенційну конкурентоспроможності його реалізації (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Висока швидкість обробки даних	MRAM забезпечує значно вищу швидкість доступу до пам'яті	Швидкість в 10 разів вища у порівнянні з іншими розповсюдженими видами пам'яті
2	Енергоефективність	Знижене енергоспоживання	Висока енергоефективність при збереженні продуктивності Менша потреба в складних системах охолодження
3	Довговічність зберігання даних	Можливість зберігання інформації без живлення	MRAM має тривалий термін експлуатації без деградації якості продукту та втрати даних
4	Висока надійність у важких умовах	Стійкість до високих температур, радіації та механічних пошкоджень	Підвищена стійкість до фізичних і термічних впливів

Таким чином дані переваги вказують на можливість конкурентоспроможності реалізації даного стартап-проєкту.

5.6 Висновки до розділу 5

1. Нанорозмірні плівкові композиції на основі Pt/Co є перспективними для застосування у технологіях мікро- та нано-електроніки та спінтроніки, оскільки їх використання сприяє підвищенню швидкодії та енергоефективності відповідних функціональних елементів, а також забезпечує триваліший і більш надійний термін зберігання інформації.

2. Розробка повноцінного комерційного продукту на основі нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co вимагає подальших наукових досліджень, зосереджених на вдосконаленні та оптимізації технологій для виробництва у промислових масштабах.

3. Здійснено технологічний аудит даної стартап-ідеї, проаналізовано ринкові перспективи, здійснено аналіз технологій для реалізації проєкту та аналіз ринкових можливостей запуску проєкту та можливих загроз його реалізації. Також проведено SWOT-аналіз та розроблено маркетингову програму стартап-проєкту.

ВИСНОВКИ

1. Іонна обробка є перспективним та ефективним методом модифікації структури та фазового складу нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм), що забезпечує можливість досягнення наперед заданих магнітних властивостей плівкового матеріалу.

2. Зміна фізико-технологічних параметрів іонної обробки, зокрема, дози випромінювання, дозволяє здійснювати ефективний вплив на розвиток дифузійних процесів, та, як наслідок, на закономірності формування структурно-фазових станів нанорозмірних плівкових композицій Pt(10 нм)/Co(10 нм).

3. Нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) отримано методом магнетронного розпорошення на підкладинки з термічно-окисненого монокристалічного кремнію, що дозволило сформувати металеві шари заданої товщини з чіткими границями поділу між ними.

4. З метою ініціації розвитку дифузійних процесів та структурних змін, нанорозмірні плівкові композиції Pt(10 нм)/Co(10 нм) піддано попередній іонній обробці з наступним відпалом за температури 550 °C.

5. Встановлено, що досягнення вищих значень коерцитивної сили ≈ 182 Е та намагніченості насичення (850 – 910) е.м.о./см³ нанорозмірних плівкових композицій Pt/Co забезпечується в результаті комплексної обробки з попереднім бомбардуванням плівкового матеріалу іонами Ar⁺ з дозою 1×10^{15} іонів/см² або іонами N⁺ з дозою 5×10^{14} іонів/см² і подальшою термічною обробкою у вакуумі за температури 550 °C упродовж 30 хвилин.

6. З метою забезпечення безпечної роботи проведено аналіз потенційних ризиків та шкідливих і небезпечних виробничих факторів, що можуть виникнути під час проведення науково-дослідних. Визначено, що всі умови відповідають встановленим санітарним нормам, забезпечуючи комфортні умови для виконання науково-дослідної роботи.

7. Розроблено стартап-проект за темою науково-дослідної роботи та проведено технологічний аудит стартап-ідеї. Результати свідчать, що проєкт є перспективним для галузей мікро- та наноелектроніки та приладів спінтроніки.

CONCLUSIONS

1. Ion treatment is a promising and effective method for modifying the structure and phase composition of nanoscale Pt(10 nm)/Co(10 nm) film compositions, which makes it possible to achieve predetermined magnetic properties of the film material.

2. Changes in the physical and technological parameters of ion treatment, in particular, the radiation dose, allow for an effective influence on the development of diffusion processes, and, as a result, on the patterns of formation of structural and phase states of nanoscale Pt(10 nm)/Co(10 nm) film compositions.

3. Nanoscale film compositions of Pt(10 nm)/Co(10 nm) were obtained by magnetron sputtering on substrates of thermally oxidised single crystal silicon, which allowed to form metal layers of a given thickness with clear boundaries of separation between them.

4. In order to initiate the development of diffusion processes and structural changes, nanoscale Pt(10 nm)/Co(10 nm) film compositions were subjected to preliminary ionic treatment followed by annealing at 550 °C.

5. It has been established that the achievement of higher values of coercive force ≈ 182 E and saturation magnetization (850 – 910) emu/cm³ of nanoscale Pt/Co film compositions is ensured as a result of complex treatment with preliminary bombardment of the film material with Ar⁺ ions at a dose of 1×10^{15} ions/cm² or N⁺ ions at a dose of 5×10^{14} ions/cm² and subsequent heat treatment in a vacuum at 550 °C for 30 minutes.

6. In order to ensure safe work, an analysis of potential risks and harmful and dangerous production factors that may arise during research work in the premises of the Thin Film Materials Science Laboratory was carried out. It was determined that all conditions comply with the established sanitary standards, providing comfortable conditions for research work.

7. A start-up project was developed on the topic of the research work and a technological audit of the start-up idea was conducted. The results show that the project is promising for the fields of micro- and nanoelectronics and spintronics devices.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Okamoto H. Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Au-La, Ce-Pt, Co-Pt, Cr-S, Cu-Sb, Fe-Ni, Lu-Pd, Ni-S, Pd-Ti, Si-Te, Ta-V, and V- Zn / H. Okamoto // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2019. – V. 40. – P. 743-756.
2. Tunable magnetic properties of CoPt nanoparticles: Impacts of phase coexistence and thermal annealing / N. H. Num, T. T. Thung, L. M. Kien et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – V. 8. – 100589.
3. Phase transformation and magnetic properties of bulk CoPt alloy / Q.F. Xiao, E. Brück, Z. D. Zhang et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – V. 364. – P. 64-71.
4. Structural, electronic and magnetic properties of $L1_0$ ordered CoPt nanoparticles: An experimental and DFT study / M. Islam, M. S. I. Sarker, T. Nakamura et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2021. – V. 269. – 124727.
5. Evolution of structure and magnetic properties of sputter-deposited CoPt thin films on MgO(111) substrates: Formation of the $L1_1$ phase / A.-C. Sun, F.-T. Yuan, J. Hsu, H. Y. Lee // Scripta Materialia. – 2009. – V. 61 – P. 713-716.
6. Chapter Five - Ion-beam modification of magnetism in thin films and multilayers / S. S. Varnoosfaderani, E. Fouad, A. Ruotolo, K. Lin // Solid State Physics. – 2021. – V. 72 – P. 159-188.
7. Zhang Y. Ion irradiation and modification: The role of coupled electronic and nuclear energy dissipation and subsequent nonequilibrium processes in materials / Y. Zhang, W.J. Weber // Applied Physics Reviews. – 2020. – V. 7. – 041307.
8. Jain I. P. Ion beam induced surface and interface engineering / I. P. Jain, G. Agarwal // Surface Science Reports. – 2011. – V. 66. – P. 77-172.
9. Devolder T. Light ion irradiation of Co/Pt systems: Structural origin of the decrease in magnetic anisotropy / T. Devolder // Physical Review B. – 2000. – V. 62. – 5794.
10. Lin K. Chapter One - Using Ion-Beam-Assisted Deposition and Ion Implantation for the Rational Control of Nanomagnetism in Thin Film and

Nanostructured Systems / K. Lin, C. Ouyang, J. Lierop // Solid State Physics. – 2018. – V. 69. – P. 1-45.

11. Formation of Co nanodisc with enhanced perpendicular magnetic anisotropy driven by Ga^+ ion irradiation on Pt/Co/Pt films / M. Sakamaki, K. Amemiya, I. Sveklo et al. // Physical Review B. – V. 94. – 174422.

12. Characterization of the magnetic modification of Co/Pt multilayer films by He^+ , Ar^+ and Ga^+ ion irradiation / C. T. Rettner, S. Anders, J. E. E. Baglin et al. // Applied Physics Letters. – 2002. – V. 80. – P. 279-281.

13. XAS and XMCD studies of magnetic properties modifications of Pt/Co/Au and Pt/Co/Pt trilayers induced by Ga^+ ions irradiation / P. Mazalski, I. Sveklo Z. Kurant et al. // Journal of Synchrotron Radiation. – 2015. – V. 22. – P. 753-759.

14. Perpendicular magnetic anisotropy in a Pt/Co/Pt ultrathin film arising from a lattice distortion induced by ion irradiation / M. Sakamaki, K. Amemiya, M. O. Liedke et al. // Physical Review B. – 2012. – V. 86. – 024418.

15. Tuning of the Dzyaloshinskii–Moriya interaction by He^+ ion irradiation / H.T. Nembach, E. Jué, K. Poetzger et al. // Journal of Applied Physics. – 2022. – V. 131. – 143901.

16. Correlation between anisotropy and concentration profiles of Ir/Co/Pt system modified by Ga^+ bombardment with different energies / M. Kowacz, M. Matczak, M. Schmidt et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – V. 587. – 171271.

17. Tailoring interfacial effect in multilayers with Dzyaloshinskii–Moriya interaction by helium ion irradiation / A. Sud, S. Tacchi, D. Sagkovits et al. // Scientific Reports. – 2021. – V. 11. – 23626.

18. Irradiation induced effects on magnetic properties of Pt/Co/Pt ultrathin films / J Ferré, C Chappert, H Bernas et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – V. 198-199. – P. 191-193.

19. On defects' role in enhanced perpendicular magnetic anisotropy in Pt/Co/Pt, induced by ion irradiation / M.M. Jakubowski, M.O. Liedke, M. Butterling et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2019. – V. 31. – 185801.

20. The effect of Ar^+ and N^+ ion irradiation on the thermally induced evolution of the structural and magnetic properties of Co/Pt and Pt/Co bilayered stacks / R. Pedan, I. Kruhlov, P. Makushko et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2024. – V. 327. – 129862.

21. Thermal annealing and transient electronic excitations induced interfacial and magnetic effects on Pt/Co/Pt trilayer / N. Sehdev, R. Medwal, R. Malik et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2018. – V. 420. – P. 50-56.

22. The heavy ions irradiation effects on advanced spin transfer torque materials / W. Cao, J. Gao, M. Yang et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – V. 542. – 168579.

23. Focused ion beam irradiation for generation of skyrmionic bubble like structures / V. Ahrens, S. Mendisch, W. Kaiser et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – V. 523. – 167591.

24. Magnetic properties of He^+ -irradiated Pt/Co/Pt ultrathin films / T. Devolder, J. Ferré, C. Chappert et al. // Physical Review B. – 2001. – V. 64. – 064415.

25. Magnetic properties of ultrathin CO/Pt multilayer Hall devices irradiated using focused ion beam / K. Wang, Y. Huang, Y.Z. Qiu et al. // Physica B: Condensed Matter. – 2015. – V. 476. – P. – 158-160.

26. Ion irradiation driven changes of magnetic anisotropy in ultrathin Co films sandwiched between Au or Pt cover / P. Mazalski, Z. Kurant, I. Sveklo et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – V. 479. – P. 332-336.

27. Local control of magnetic interface effects in chiral Ir/Co/Pt multilayers using Ga^+ ion irradiation / C. H. Mark, J. M. Mariëlle, J. Lucassen et al. // Physical Review B. – 2022. – V. 105. – 064429.

28. Ultrathin Co films with Pt and Au covers – magnetic and structural properties driven by Ga^+ ion irradiation / P. Mazalski, L. Ohnouteck, I. Sveklo et al. // New Journal of Physics. – 2021. – V. 23. – 023015.

29. Tailoring of magnetism in Pt/Co/Pt ultrathin films by ion irradiation / A. Maziewski, P. Mazalski, Z. Kurant et al. // *Physical Review B*. – 2012. – V. 85. – 054427.
30. Dzyaloshinskii-Moriya interaction and magnetic anisotropy in Pt/Co/Au trilayers modified by Ga⁺ ion irradiation / R. Gieniusz, P. Mazalski, U. Guzowska et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – V. 537. – 168160.
31. Modification of magnetization ordering in Pt/Co/Pt trilayers depending on the scanning direction of a focused ion beam / P. Mazalski, P. Kuświk, I. Sveklo et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2019. – V. 477. – P. 317-322.
32. Sputtering thin films: Materials, applications, challenges and future directions / R. Garg, S. Gonuguntka, S. Sk et al. // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2024. – V. 330. – 103203.
33. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges / J. T. Gudmundsson // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2020. – V. 29. – 13001.
34. Secondary ion mass spectrometry / N. P. Lockyer, S. Aoyaga, J. S. Fletcher et al. // *Nature Reviews Methods Primers*. – 2024. – V. 4. – 32.
35. Mueller C. W. Understanding of soil processes at the microscale—Use of NanoSIMS in soil science / C. W. Mueller, C. Hoeschen, I. Koegel-Knabner // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. – 2023. – V. 2. – P. 670-680.
36. Characterization of polymeric surfaces and interfaces using time-of-flight secondary ion mass spectrometry / H. Mei, T. S. Laws, T. Terlier et al. // *Journal of Polymer Science*. – 2021. – V. 60. – P. 1174-1198
37. Iqbal H. M. N. Nano-Bioremediation: Fundamentals and Applications [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/x-ray-diffraction-analysis>, вільний. – (дата звернення: 15.09.2024). – Назва з екрана.
38. Ali A. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions / A. Ali, Y. W. Chiang, R. M. Santos // *Minerals*. – 2022. – V. 12. – 205.

39. Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://science.kpi.ua/bez-rubriki/rigaku-ultima-iv>, вільний. – (дата звернення: 15.09.2024). – Назва з екрана.

40. Dodrill B. Vibrating Sample Magnetometry / B. Dodrill, J. R. Lindemuth // Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization. – 2021. – P. 15–37.

41. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges / J. T. Gudmundsson // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – V. – 29. – 113001.

42. An Introduction to Vibrating Sample Magnetometer [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.stanfordmagnets.com/an-introduction-to-vibrating-sample-magnetometer.html>, вільний. – (дата звернення: 15.09.2024). – Назва з екрана.

43. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Організація і обладнання робочих місць. – Чинний від 1998-07-01. – Київ: МОЗ України, 1998. – 35 с.

44. ДБН В.2.5.28-2018. Природне та штучне освітлення. – Чинний від 2019 – 03 – 01. – ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2016. – № 264.

45. Москальова В.М. Охорона праці: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення / В.М. Москальова // – Рівне: НУВГП. – 2009.

46. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 32 с.

47. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Чинний від 1999 – 12 – 01. – Київ: Державні Санітарні Норми, 1999. – 10 с.

48. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Чинний від 1999 – 12 – 01. – Київ: Державні Санітарні Норми, 1999. – № 42.

49. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136

«Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

50. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Чинний від 2007 – 12 – 03. – Київ: Наказ МНС, 2016. – № 833.

51. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. – Чинний від 2018 – 05 – 18. – Київ: Державні Нормативні акти з Охорони Праці, 2018. – № 207.

52. НПАОП 0.00-4.33-99 Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій. – Чинний від 1999 – 06 – 30. – Київ: Державні Нормативні акти з Охорони Праці, 1999. – № 112.

53. Spintronics based random access memory: a review / S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata et al. // Materials Today. – 2017. – V. 20. – P. 530-548.

54. MRAM Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029) [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/magneto-resistive-ram-market>, вільний. – (дата звернення: 18.11.2024). – Назва з екрана.

55. Global Magnetoresistive RAM MRAM Market By Type (Toggle MRAM, Second Generation MRAM (STT-MRAM)), By Application (Consumer Electronics, Robotics), By Geographic Scope And Forecast [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/magnetoresistive-ram-mram-market/>, вільний. – (дата звернення: 18.11.2024). – Назва з екрана.