

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

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Металофізичні процеси та їх
комп'ютерне моделювання»**

зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

**на тему: «Вплив додаткових шарів Tb і Mn на термічно-індуковане
формування структури тонких плівок FePt»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ФМ-81мн
Трубчанінова Дар'я Ігорівна _____

Керівник:

доцент, к.т.н
Владимирський Ігор Анатолійович _____

Консультант з ОП та безпеки в НС:

доцент, к.т.н,
Левченко Олег Григорович _____

Консультант з нормоконтролю:

асистент каф. ФМ,
Шаповалова Наталя Анатоліївна _____

Рецензент:

асистент каф. ФХОТМ, к.т.н.,
Ворон Михайло Михайлович _____

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

Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інженерно-фізичний факультет
Кафедра фізики металів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство

Освітньо-наукова програма «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Світлана ВОЛОШКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Трубчаніновій Дар'ї Ігорівні

1. Тема дисертації «Вплив додаткових шарів Tb і Mn на термічно-індуковане формування структури тонких плівок FePt», науковий керівник дисертації Владимирський Ігор Анатолійович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «17» березня 2020 р. № 893-с
2. Термін подання студентом дисертації 12 травня 2020 року.
3. Об'єкт дослідження: нанорозмірні плівкові композиції FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм), осаджені методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені кремнієві підкладинки SiO₂(100 нм)/Si(001).
4. Предмет дослідження: процеси структурно-фазових перетворень та упорядкування у нанорозмірних плівкових композиціях FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм).
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести літературний огляд за тематикою роботи, підготувати зразки для дослідження, провести серію відпали за різних фізико-технологічних параметрів, провести рентгеноструктурні дослідження та пошаровий хімічний аналіз, проаналізувати отримані результати, розробити стартап-проект за темою

роботи, провести аналіз можливих аварійних та небезпечних випадків в процесі проведення роботи, зробити висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП та безпека в НС	Левченко О.Г., доцент		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Визначення та узгодження теми МД		
2	Проведення літературного огляду		
3	Розробка методики експериментів		
4	Підготовка першого та другого розділів		
5	Проведення термічної обробки		
6	Обробка результатів та підготовка третього розділу		
7	Підготовка четвертого і п'ятого розділів та оформлення МД		
8	Попередній захист		
9	Захист на засіданні ЕК		

Студент

Дар'я ТРУБЧАНІНОВА

Науковий керівник дисертації

Ігор ВЛАДИМИРСЬКИЙ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 77 сторінок, 15 таблиць, 26 рисунків, 4 формули, 42 літературних джерела.

ВІДПАЛ, ДИФУЗИЯ, ПРОМІЖНИЙ ШАР, СТРУКТУРА, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ, ФАЗА.

Об'єкт досліджень: нанорозмірні плівкові композиції FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм), осаджені методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені кремнієві підкладки SiO₂(100 нм)/Si(001).

Предмет дослідження: процеси структурно-фазових перетворень та упорядкування у нанорозмірних плівкових композиціях FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм).

Мета роботи: дослідження закономірностей термічно-індукованого дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм) в процесі їхньої термічної обробки у вакуумі.

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

Результати досліджень та їх новизна: виявлено, що після осадження плівкових композицій FePt, FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt в їхній структурі формується неупорядкована фаза *A1*-FePt. В процесі відпалу відбувається формування впорядкованої фази *L1₀*-FePt за температури 550 °C у зразках FePt/Mn/FePt та FePt. При відпалі плівкової композиції FePt/Tb/FePt за температури 550 °C в її структурі утворюється проміжна інтерметалідна фаза Pt₂Tb. Прикладання зовнішнього магнітного поля в процесі термічної обробки обумовлює прискорення процесу впорядкування кристалічної структури досліджуваних плівкових матеріалів.

Сфера застосування: матеріали для магнітного запису, матеріали для спінтроники.

ABSTRACT

Master dissertation: 77 pages, 15 tables, 26 figures, 4 formulas, 42 references.

ANNEALING, DIFFUSION, INTERMEDIATE LAYER, STRUCTURE, THIN FILM COMPOSITION, PHASE.

The object of research: FePt(30 nm), FePt(15 nm)/Tb(10 nm)/FePt(15 nm) and FePt(15 nm)/Mn(10 nm)/FePt(15 nm) film compositions deposited on a SiO₂(100 nm)/Si(001) monocrystalline substrates.

The purpose of research: investigation of diffusion phase formation in thin film stacks Pt(15 nm)/Tb(10 nm)/Fe(15 nm) during thermal treatment in vacuum.

The subject of research: processes of structural and phase transformations and ordering in FePt(30 nm), FePt(15 nm)/Tb(10 nm)/FePt(15 nm) and FePt(15 nm)/Mn(10 nm)/FePt(15 nm) nanoscale film stacks.

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

Research results and novelty: it was revealed that after deposition of the FePt, FePt/Tb/FePt and FePt/Mn/FePt layer stacks, disordered *A1*-FePt phase was formed in their structure. It was found that for FePt/Mn/FePt and FePt stacks further temperature increase up to 550 °C lead to the initialization of the ordering process and the chemically *L1₀*-FePt ordered phase formation. The intermetallic phase Pt₂Tb was formed when the FePt/Tb/FePt sample was annealed at 550 °C. Application of external magnetic field during films heat treatment leads to acceleration of the ordering process.

Field of application: ultrahigh density magnetic recording medium, spintronics materials.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Особливості формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях на основі FePt	11
1.2 Вплив фізико-технологічних параметрів термічної обробки на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.....	14
1.3 Вплив введення додаткових шарів на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях на основі FePt.....	21
1.4 Висновки до розділу 1	27
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1 Магнетронне осадження тонких металевих шарів	28
2.2 Параметри термічної обробки плівкових зразків	29
2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	30
2.4 Пошаровий хімічний аналіз методом вторинної іонної мас-спектрометрії	31
2.5 Висновки до розділу 2	32
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	33
3.1 Вплив параметрів термічної обробки на фазоутворення в нанорозмірних плівках FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt.....	33
3.2 Вплив магнітного поля на фазоутворення в тонких плівках при відпалі у вакуумі.....	42
3.3 Особливості розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівок FePt/Tb/FePt після термічної обробки	43
3.4 Висновки до розділу 3	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	47
4.1 Аналіз параметрів приміщення	47
4.2 Мікроклімат робочої зони.....	49
4.3 Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії.....	50
4.3.1 Розрахунок характеристик природнього освітлення.....	51

4.3.2 Розрахунок параметрів штучного освітлення	51
4.4 Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії	53
4.4.1 Аналіз шуму та вібрацій.....	53
4.4.2 Аналіз небезпек при роботі з установкою ВУП-5М.....	54
4.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами.....	55
4.4.4 Виробничі випромінювання.....	56
4.5 Організація робочого місця	57
4.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях	58
4.6.1 Пожежна безпека.....	59
4.6.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	60
4.7 Висновки до розділу 4	60
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	61
5.1 Опис ідеї проекту	61
5.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень	63
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	63
5.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску	64
5.2.3 Витрати на матеріали для досліджень	64
5.2.4 Розрахунок інших прямих неврахованих витрат.....	64
5.2.5 Визначення накладних витрат	65
5.2.6 Визначення кошторису науково-дослідної роботи	65
5.3 Технологічний аудит ідеї проекту.....	65
5.4 Ринкові можливості запуску проекту	66
5.10 Висновки до розділу 5	69
ВИСНОВКИ.....	71
CONCLUSIONS	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ВСТУП

Сьогодні все, що нас оточує стрімко змінюється і розвивається. Найбільш помітні ці зміни на прикладі розвитку електронних пристроїв (смартфонів, ноутбуків, флеш-носіїв і т. д.). Чітко прослідковується тенденція до мініатюризації приладів та до збільшення обсягу інформації, яка ними зберігається. Це стає можливим в тому числі завдяки збільшенню щільності магнітного запису інформації.

Історія магнітного запису почалася ще у XIX столітті завдяки датському вченому Вальдемару Поульсену, який розробив метод магнітного запису звуку на стальний дріт. З того часу цей метод трансформувався і сьогодні ми маємо змогу записувати і зберігати інформацію на жорстких дисках та флеш носіях. Та матеріали, які використовуються для магнітного запису, потребують постійного вдосконалення і покращення магнітних властивостей.

Найбільш перспективним матеріалом для магнітного запису є нанорозмірні плівки FePt, що обумовлюється їхніми високими магнітними характеристиками та можливістю досягнення суттєвої термічної та часової стабільності зберігання інформації. Таких характеристик, як висока енергія магнітокристалічної анізотропії ($K_u \approx 7 \text{ МДж/м}^3$) та висока коерцитивна сила ($H_c \approx 792 \text{ кА/м}$) можна досягти при відпалі плівок на основі FePt за температури $\sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ або при їх осадженні на нагріту підкладку, що стимулює утворення впорядкованої фази $L1_0$ -FePt. Однак, високотемпературна термічна обробка, в свою чергу, призводить до росту зерен, що в подальшому знижує потенційно можливу щільність магнітного запису.

Таким чином, постає матеріалознавча задача зниження температури формування впорядкованої фази та контролю розміру зерен в плівкових матеріалах на основі FePt. Зокрема відомо, що зниження температури формування впорядкованої фази можливо досягти шляхом введення

додаткових шарів легуючих елементів (Au, Mn, Tb, Cu, Ag). Прискорення процесів дифузійного фазоутворення в цьому випадку пов'язане з виникненням додаткових напружень через невідповідність кристалографічних параметрів ґраток сплаву FePt і легуючого елементу. Зміна фізико-технологічних параметрів термічної обробки плівок FePt (тиск та склад атмосфери, швидкість нагрівання) також чинить істотний вплив на закономірності формування їхніх структурно-фазових станів.

Метою даної роботи є дослідження впливу введення додаткових шарів Tb та Mn та параметрів термічної обробки на закономірності перебігу термічно-індукованих фазових перетворень в плівкових матеріалах на основі FePt. Шари Tb та Mn представляють особливий інтерес, через свої магнітні властивості. Введення феромагнітного Tb і антиферомагнітного Mn обумовлює можливість впливати на намагніченість впорядкованої фази $L1_0$ -FePt. Зокрема, зниження намагніченості при збереженні високих значень інших магнітних характеристик – магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили – може бути корисним для використання даних плівкових матеріалів в приладах спінтроніки.

Для досягнення поставленої мети необхідним є вирішення наступних задач:

- провести термічну обробку нанорозмірних плівкових композицій FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt за різних температурах у вакуумі;
- визначити закономірності фазоутворення в тонких плівках в процесі термічної обробки за допомогою рентгеноструктурних досліджень та пошарового хімічного аналізу методом мас-спектрометрії вторинних іонів.

Предмет дослідження – процеси структурно-фазових перетворень та упорядкування у нанорозмірних плівкових композиціях FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм).

Об'єкт дослідження – нанорозмірні плівкові композиції FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм),

осаджені методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені кремнієві підкладки $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Особливості формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях на основі FePt

Плівкові композиції на основі Fe/Pt після термічної обробки за певних фізико-технологічних параметрів можуть мати в своїй структурі хімічно впорядковану фазу $L1_0$ -FePt, яка характеризується високою енергією магнітокристалічної анізотропії ($K_u \approx 7$ МДж/м³), значною коерцитивною силою ($H_c \approx 792$ кА/м) та високою корозійною стійкістю. Фаза $L1_0$ -FePt має гранецентровану тетрагональну кристалічну ґратку, що зумовлює наявність одноосьової магнітокристалічної анізотропії [1, 2].

Саме завдяки цим унікальним магнітним властивостям даний плівковий матеріал є найбільш перспективним для використання в якості носіїв інформації з великою щільністю та функціональних елементів пристроїв спінтроніки. Однак тонка плівка FePt, осаджена за кімнатної температури, має в своїй структурі невпорядковану фазу $A1$ -FePt з магнітно-м'якими, ізотропними властивостями. Для отримання високоанізотропної фази $L1_0$ -FePt необхідне проведення відпалу для термічної активації фазового перетворення $A1$ -FePt \rightarrow $L1_0$ -FePt [3, 4].

Проте високотемпературний відпал є недоцільним для застосування при виготовленні жорстких дисків, оскільки цей процес спричиняє ріст нанокристалічних зерен, а також деформацію скляної підкладки.

Крім того, тонкі плівки FePt після осадження мають переважну орієнтацію зерен в напрямку $[111]$, а для застосування цього матеріалу в якості носіїв магнітного запису важливим є утворення текстури $L1_0$ -FePt $[001]$ [1]. Для виготовлення плівок з орієнтацією кристалітів $[001]$ існує кілька методів: лазерне розпорошення [5]; епітаксіальне зростання на монокристалічних підкладках [6, 7]; епітаксіальне зростання на різних підкладках або на проміжному між підкладкою і плівкою шарі [8, 9]. Найпоширенішим є метод

магнетронного осадження сплаву FePt та почергове осадження шарів Fe і Pt [10].

Слід приймати до уваги, що впорядкована фаза $L1_0$ -FePt не є стехіометричною сполукою і має певну область однорідності (40 ат.% - 55 ат.% Pt). Тому також постає матеріалознавча задача виявлення оптимального хімічного складу, який забезпечить досягнення бажаних фізичних властивостей тонких плівок.

У роботах [11, 12] виявлено, що максимальна ступінь впорядкування плівки FePt товщиною 0,5 мкм може бути досягнута для матеріалу із концентрацією Pt в діапазоні 47 ат.% - 50 ат.%. У цьому випадку співвідношення параметрів кристалічної решітки впорядкованої фази (c/a) та температури впорядкування приймають свої мінімальні значення.

Варто зазначити, що плівки із вмістом Pt 47 ат.% - 50 ат.% порівняно з плівками з більш високим або низьким вмістом Pt мають більшу ступінь впорядкування на всьому інтервалі температур термічної обробки. Автори пов'язують цей ефект з енергією активації фазового перетворення $A1 \rightarrow L1_0$ -FePt, яка набуває мінімальних значень у діапазоні концентрації Pt 47 ат.% - 50 ат.% [12]. Ще одне підтвердження того, що вищезазначений діапазон концентрації є оптимальним, стосується того факту, що плівки FePt товщиною 0,5 мкм, отримані шляхом осадження на підкладку за температури 250 °C, мають повністю впорядковану структуру $L1_0$ -FePt при концентрації Pt 48,2 ат.%. У той же час, щоб отримати повністю впорядковану структуру у плівках із меншим або більшим вмістом Pt, температуру підкладки під час осадження необхідно підвищити до 300 °C [13]. Не менш важливими параметрами, які впливають на отримання впорядкованої структури є товщина плівки та наявність додаткових шарів легуючих елементів.

В роботі [14] досліджено вплив товщини шарів Pt та FePt в нанорозмірних плівкових композиціях CrV/Pt/FePt на їхню мікроструктуру та магнітні властивості. Плівкову систему CrV/Pt/FePt осаджено на скляні підкладки методом магнетронного розпорошення. Шари Pt та FePt

осаджено на підшар Cr_{94}V_6 . Параметри кристалічної будови даного підшару є близькими до відповідних параметрів фази $L1_0\text{-FePt}$, що обумовлює ріст зазначеної фази з переважною орієнтацією зерен у кристалографічному напрямку $[001]$. Крім того, енергія деформації, викликана не повною відповідністю параметрів решітки підшару та шару FePt , сприяє зниженню температури фазового переходу $A1\text{-FePt} \rightarrow L1_0\text{-FePt}$. Виявлено, що варіювання товщини підшару дозволяє впливати на параметри структури і магнітні властивості впорядкованої фази $L1_0\text{-FePt}$ [14].

На рис. 1.1 представлено криві намагнічування нанорозмірних плівкових композицій CrV/Pt/FePt з різною товщиною підшару Pt .

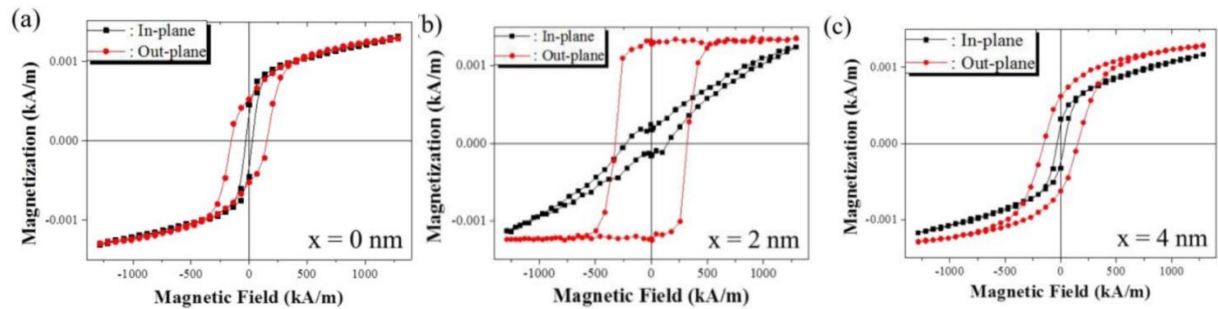


Рисунок 1.1 – Криві намагнічування нанорозмірних плівкових композицій CrV/Pt/FePt з різною товщиною підшару Pt [14]

Найкращі магнітні властивості виявлено у зразку з товщиною шару Pt 2 нм. Це зумовлено тим, що Pt перешкоджає дифузії Cr і V та мінімізує невідповідність параметрів ґратки і сприяє утворенню фази $L1_0\text{-FePt}$. В свою чергу, подальше збільшення товщини шару Pt погіршує магнітні властивості. Припускається, що шар Pt з більшою товщиною обмежує утворення фази $L1_0\text{-FePt}$ через формування текстури зерен даної фази в напрямку $[200]$.

На рис. 1.2 показано криві намагнічування досліджуваних плівкових композицій в залежності від товщини шару FePt .

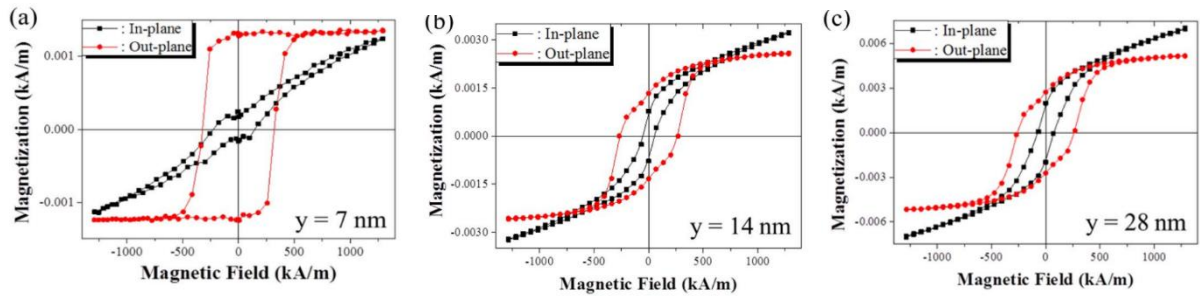


Рисунок 1.2 – Криві намагнічування нанорозмірних плівкових композицій CrV/Pt/Fe з різною товщиною шару FePt [14]

Найкращі магнітні властивості спостерігаються за товщини шару FePt 7 нм. В той самий час, при збільшенні товщини цього шару магнітні властивості погіршуються. Даний ефект може мати наступне пояснення – значний вклад в утворення фази $L1_0$ -FePt вносить енергія деформації, яка зумовлена невідповідністю параметрів ґраток і концентрується біля поверхні шару FePt [14]. Тому зі збільшенням товщини шару внесок енергії деформації зменшується і утворюється фаза FePt з текстурою зерен [200].

Можна зробити висновок, що відсотковий вміст елементів в плівкових композиціях, а також варіювання товщини шарів в нанорозмірних плівкових композиціях має істотний вплив на закономірності термічно-індукованого формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

1.2 Вплив фізико-технологічних параметрів термічної обробки на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt

У роботі [15] досліджено вплив тиску за процесів осадження та термічної обробки плівок FePt на залишкові напруження, кристалографічну орієнтацію їхніх зерен та хімічний стан поверхні цих матеріалів.

Одношарові плівки FePt отримано методом магнетронного розпорошення на скляну підкладку. Для плівок першої серії досліджували

вплив тиску за швидкого термічного відпалу, для плівок другої серії досліджували вплив базового тиску вакуумної камери перед осадженням.

На рис. 1.3 представлено результати досліджень методом рентгеноструктурного фазового аналізу плівок, підданих відпалу за різного тиску. На дифрактограмах від всіх зразків чітко спостерігається дифракційний рефлекс (001), що свідчить про наявність впорядкованої фази. Рефлекси від зразка, який відпалено за тиску 5×10^{-2} Torr, зміщені у бік менших кутів дифракції, що свідчить про розширення решітки за рахунок окиснення плівкового матеріалу.

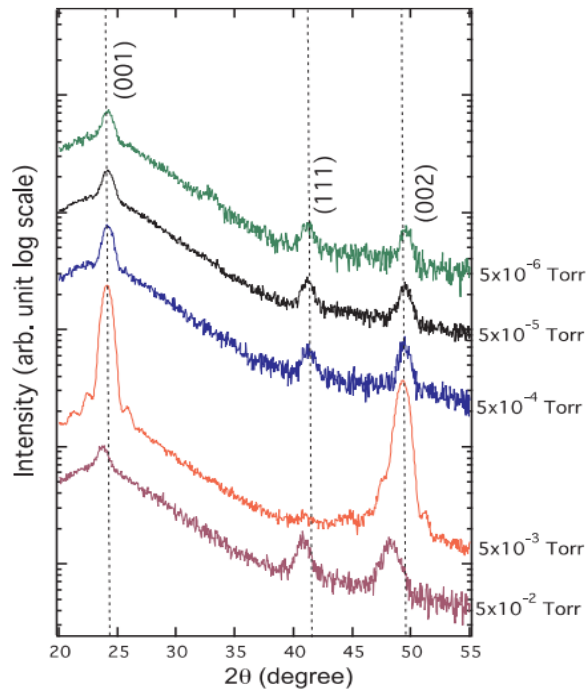


Рисунок 1.3 – Дифрактограми плівок FePt, підданих відпалам за різного тиску [15]

На рис. 1.4 зображено залежності коефіцієнта орієнтації (LOF) та залишкових напружень від прикладеного за відпалу тиску. В цьому випадку $LOF = 0$ відповідає структурі з абсолютно хаотичною орієнтацією зерен, а $LOF = 1$ відповідає матеріалу, в якому всі зерна орієнтовані в напрямку [001].

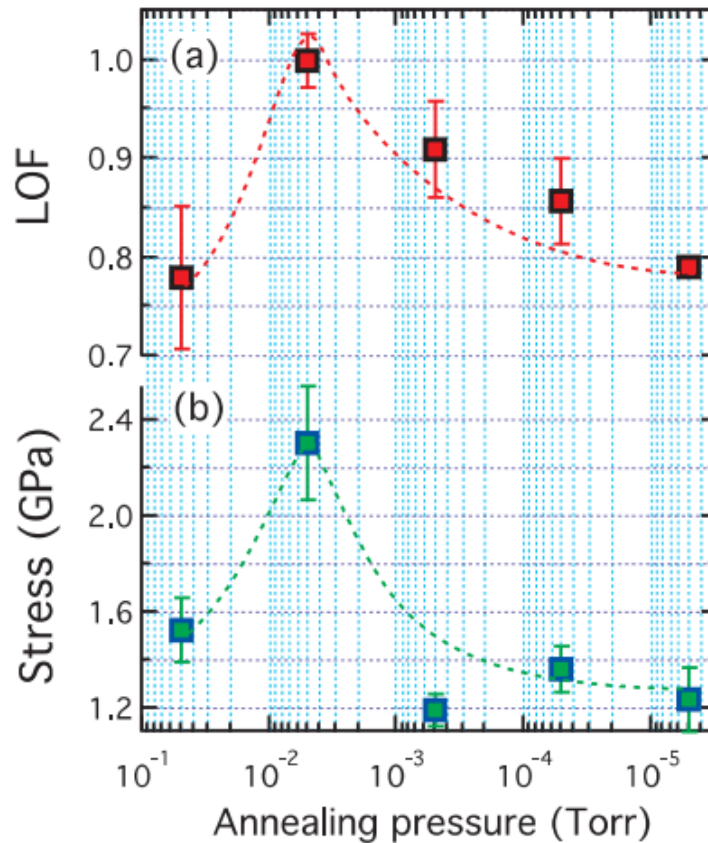


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнта орієнтації та залишкових напружень від тиску в процесі термічної обробки [15]

З наведених графіків можна бачити, що за тиску від 5×10^{-2} тор до 5×10^3 тор спостерігається майже ідеальна текстура [001]. При цьому залишкові напруження є максимальними. Хімічний аналіз засвідчив присутність оксиду Fe_2O_3 на поверхні плівки, який викликає напруження розтягу, що сприяють формуванню текстури [001].

Для другої серії зразків досліджували вплив базового тиску вакуумної камери перед осадженням.

На рис. 1.5 представлено результати дифрактометричних досліджень зразків другої серії.

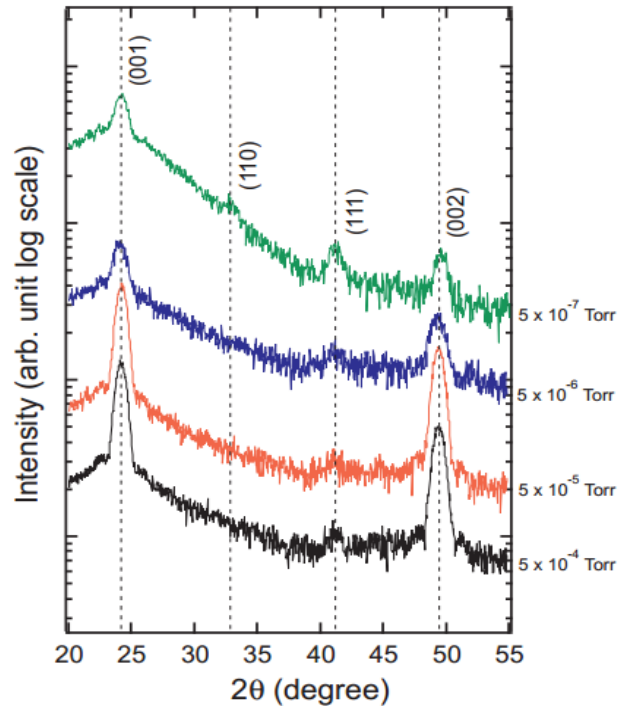


Рисунок 1.5 – Дифрактограми плівок FePt, осаджених за різного тиску [15]

З графіків чітко видно, що збільшення тиску призводить до формування текстури [002]. Розрахунок коефіцієнта орієнтації (LOF) та вимірювання залишкових напружень (рис. 1.6) підтверджують формування текстури [001] за менших значень тиску.

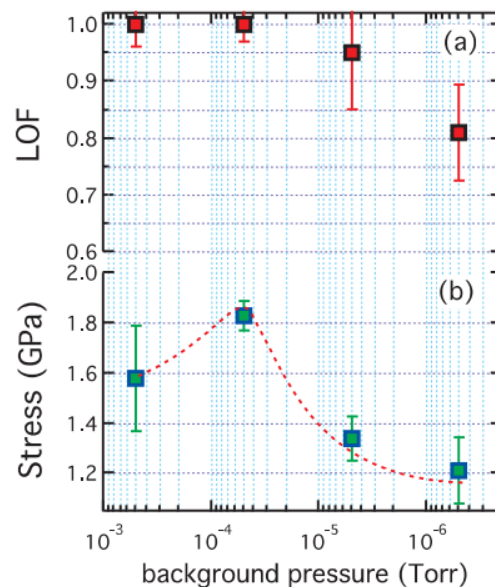


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнта орієнтації та залишкових напружень від тиску в процесі термічної обробки [15]

Хімічний аналіз дозволив виявити, що поверхня плівок окислюється з утворенням оксиду Fe_2O_3 , подібно до зразків першої серії.

За отриманими даними можна зробити висновок, що прикладання тиску в межах 10^{-2} тор - 10^{-4} тор в процесі осадження і термічної обробки плівок FePt сприяє формуванню текстури [001]. Даний ефект можна пояснити утворенням поверхневого оксидного шару, який викликає виникнення напружень розтягу в плівці. При більшому тиску кисень меншою мірою взаємодіє з поверхнею плівки і утворення оксидної фази є недостатнім для сприяння формуванню текстури [001] [15].

У роботі [16] досліджено вплив фізико-технологічних параметрів термічної обробки на магнітні властивості плівкових композицій FePt/ Fe_2O_3 та FePt/Cu з метою досягнення термічно-індукованого формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

Плівкові системи FePt/ Fe_2O_3 осаджено за допомогою поверхнево-активних речовин на кремнієву підкладку. В той же час, систему FePt/Cu отримано змішуванням наночастинок FePt та Cu в гексані під дією ультразвуку.

Отримані плівкові матеріали піддано лазерній термічній обробці та відпалу у вакуумі. Припускається, що наночастинки Fe_2O_3 та Cu мають мінімізувати агрегацію частинок FePt під час термічної обробки, що сприяє отриманню впорядкованої фази.

При відпалі зразків у вакуумі коерцитивна сила композицій FePt/ Fe_2O_3 та FePt/Cu зростає приблизно утричі. Даний факт надає ґрунтовні підстави стверджувати, що при відпалі відбувається фазовий перехід з неупорядкованої фази $A1$ -FePt до впорядкованої фази $L1_0$ -FePt [16].

Натомість, лазерна термічна обробка не призводить до зміни ширини петлі гістерезису. Цей факт дозволяє зробити висновок, що фазова трансформація навіть за високих температур потребує певного проміжку часу.

В свою чергу прикладання зовнішнього магнітного поля під час термічної обробки плівок на основі FePt може суттєво вплинути на фазові

перетворення, що пояснюється зміною вільної енергії Гіббса феромагнітної фази [17, 18]. Таким чином, зміна магнітної енергії виступає додатковою рушійною силою для фазового перетворення $Al-FePt \rightarrow Ll_0-FePt$. Тому, щоб прискорити впорядкування у плівках на основі FePt за наявності зовнішнього магнітного поля, доцільно використовувати температуру вище точки Кюрі неупорядкованої фази $Al-FePt$ (330 °C) і нижче точки Кюрі впорядкованої фази Ll_0-FePt (480 °C).

У роботі [19] досліджено вплив прикладання зовнішнього магнітного поля під час осадження та відпалу на властивості плівок FePt. Плівки синтезовано методом магнетронного розпорошення. На рис. 1.7 представлено результати рентгеноструктурного фазового аналізу досліджуваних плівкових матеріалів, підданих відпалу у магнітному полі.

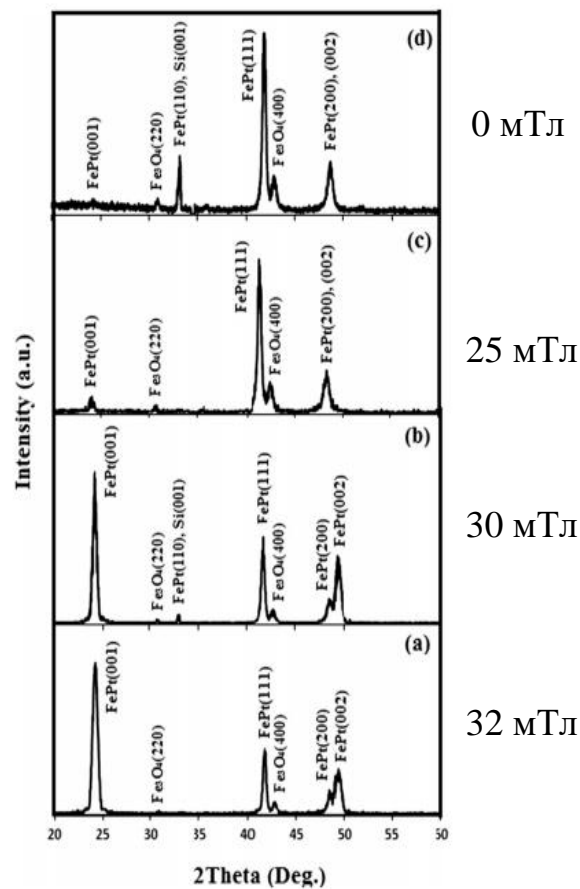


Рисунок 1.7 – Дифрактограми тонких плівок FePt, відпалених при накладанні зовнішнього магнітного поля [19]

Можна чітко бачити, що при збільшенні напруженості магнітного поля інтенсивність дифракційного максимуму (001) FePt зростає.

Наявність магнітного поля з напруженістю, більшою від порогового значення (25 мТл), призводить до формування впорядкованої фази з текстурою зерен [001].

На дифрактограмах зразків FePt, на які впливали магнітним полем за процесу осадження (рис. 1.8), не спостерігаються надструктурні дифракційні максимуми (001), що свідчить про відсутність впорядкованої структури $L1_0$ -FePt.

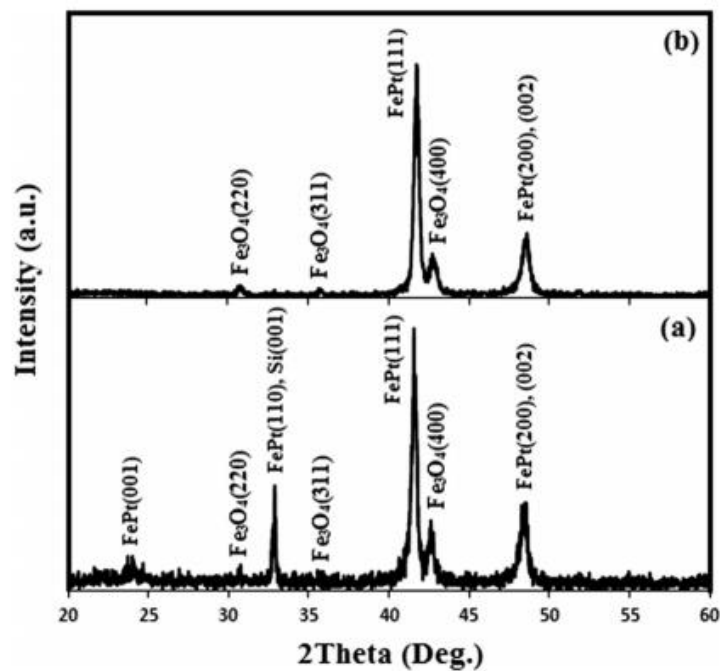


Рисунок 1.8 – Дифрактограми тонких плівок FePt, осаджених без магнітного поля (а) та в магнітному полі (б) [19]

Представлені результати надають можливість зробити висновок, що прикладання магнітного поля (з індукцією від 25 мТл) за відпалу наночастинок $L1_0$ -FePt обумовлює формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt з вираженою текстурою її зерен в напрямку [001]. Проте прикладання магнітного поля в процесі осадження плівок не призводить до досягнення переважної орієнтації зерен досліджуваного плівкового матеріалу [19].

Дослідження особливостей структурних змін та магнітних властивостей тонких плівок FePt товщиною 80 нм після відпалу в температурному інтервалі 450 °С - 600 °С за наявності зовнішнього магнітного поля напруженістю 40 кЕ проведено у роботі [17]. Виявлено, що температура початку процесу впорядкування зменшується щонайменше на 100 °С порівняно з відпалом без поля [17]. Формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt прискорювалося переважно на початковій стадії термічної обробки. Коерцитивна сила тонких плівок, відпалених у магнітному полі, завжди є вищою порівняно з плівками після обробки за тієї самої температури, але без зовнішнього поля.

Попередній відпал тонкої метастабільної плівки FeAg/SiO₂ в магнітному полі напруженістю 10 кЕ здійснено у роботі [18] з подальшим нанесенням шару Pt на поверхню плівки. Крім того, термообробку в діапазоні температур 300 °С - 500 °С проводили без магнітного поля для формування магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt. Встановлено, що попередній відпал у магнітному полі сприяє орієнтації частинок Fe у напрямку [001], а також збільшує їхній розмір порівняно з відпалом без поля. Частинки Fe з'явилися внаслідок їхнього відокремлення від метастабільної матриці FeAg. Осадження шару Pt на шар Fe з текстурою [001] приводить до зниження температури впорядкування в тонкій плівці Pt/FeAg/SiO₂, а також до покращення її магнітно-твердих властивостей [18].

Всі ці результати переконливо свідчать, що термічна обробка плівок з прикладанням зовнішнього магнітного поля є ефективним засобом зниження температури дифузійного формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

1.3 Вплив введення додаткових шарів на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях на основі FePt

Введення додаткових шарів легуючих елементів є одним із методів зниження температури формування впорядкованої фази в тонких плівках FePt.

В залежності від властивостей легуючого елемента магнітні характеристики плівкових композицій на основі FePt можуть змінюватися в процесі термічної обробки.

В роботі [20] досліджено вплив наявності додаткових проміжних шарів на формування структурно-фазових станів та магнітні властивості впорядкованих наночастинок $L1_0$ -FePt.

Наночастинки отримано методом розпорошення суміші FePt + 10 ат. % Ag на попередньо осаджені шари Ag та MnO. Зразки синтезували двома способами:

- за кімнатної температури з подальшим відпалом;
- за температури 500 °C без подальшої термічної обробки.

В результаті дослідження виявлено, що для осадження за кімнатної температури з подальшим відпалом більш доцільно використовувати шар Ag, що сприяє зниженню температури фазового переходу $A1$ -FePt \rightarrow $L1_0$ -FePt. Зазначене зниження температури фазового перетворення в кінцевому рахунку обумовлює зменшення розмірів зерен впорядкованої фази.

У випадку прямого синтезу за підвищеної температури більш доцільним є використання в якості підкладки шару MnO. Даний шар забезпечує досягнення однорідності морфології і формування наночастинок FePt розміром 10 нм, а 10 ат.% Ag сприяють утворенню фази $L1_0$ -FePt.

Аналіз магнітних властивостей досліджуваних матеріалів засвідчив, що присутність шарів Ag та MnO обумовлює збільшення коерцитивної сили частинок FePt в середньому у 3,5 рази [20].

У роботі [21] досліджувався вплив товщини шару $Fe_{83}Tb_{17}$ у плівкових композиціях $Fe_{83}Tb_{17}/Pt$ на їхні магнітні та магнітно-оптичні властивості. Плівкову систему FeTb/Pt осаджено на скляну підкладку методом магнетронного розпорошення.

На рис. 1.9 представлено температурну залежність намагніченості насичення плівкових композицій $Fe_{83}Tb_{17}/Pt$ з різною товщиною шару $Fe_{83}Tb_{17}$.

Для порівняння на графіку також представлена відповідна залежність для масивного сплаву $\text{Fe}_{83}\text{Tb}_{17}$.

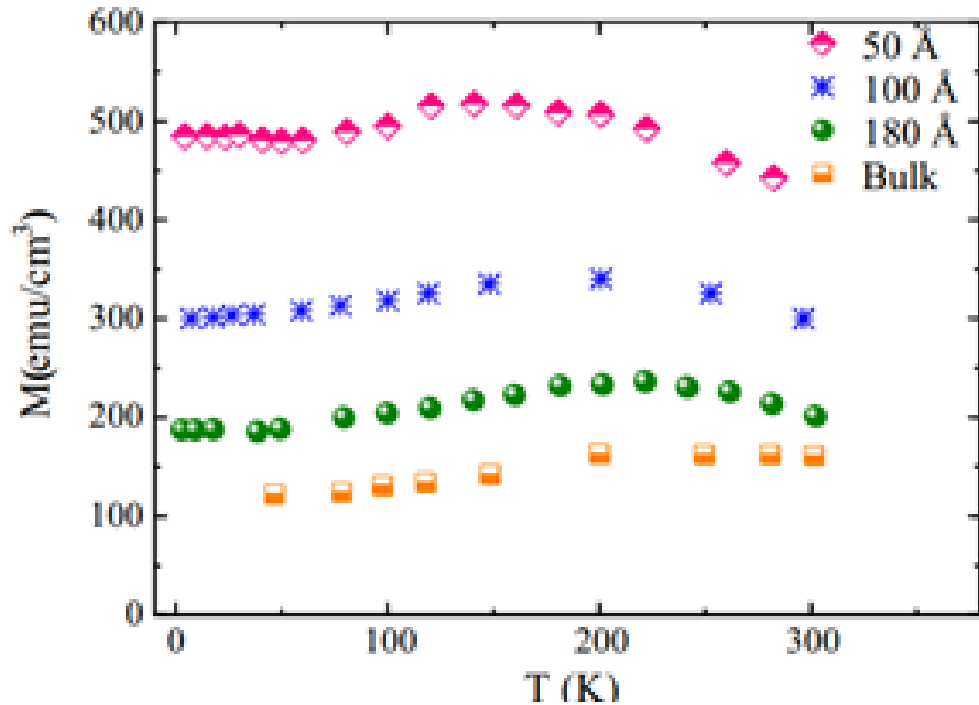


Рисунок 1.9 – Залежність намагніченості насичення плівкових композицій FeTb/Pt з різною товщиною шару FeTb від температури [21]

У всіх випадках спостерігається однакова тенденція – зміна намагніченості, характерна для феримагнітного сплаву з двома підрешітками, які мають намагніченості M_{Fe} і M_{Tb} . За всіх температур намагніченість збільшується зі зменшенням товщини шару $\text{Fe}_{83}\text{Tb}_{17}$.

Для опису намагніченості застосовано наступну феноменологічну модель:

$$M_{ML} = M_B + \frac{2\delta M_{int}}{t_{\text{FeTb}}}, \quad (1.1)$$

де M_{ML} – намагніченість зразка;

M_B – намагніченість об'ємного шару;

M_{int} – намагніченість міжфазного шару;

δ – товщина міжфазного шару.

Графік залежності добутку $M_{ML} \times t_{FeTb}$ від t_{FeTb} (товщини шару FeTb) представлено на рис. 1.10.

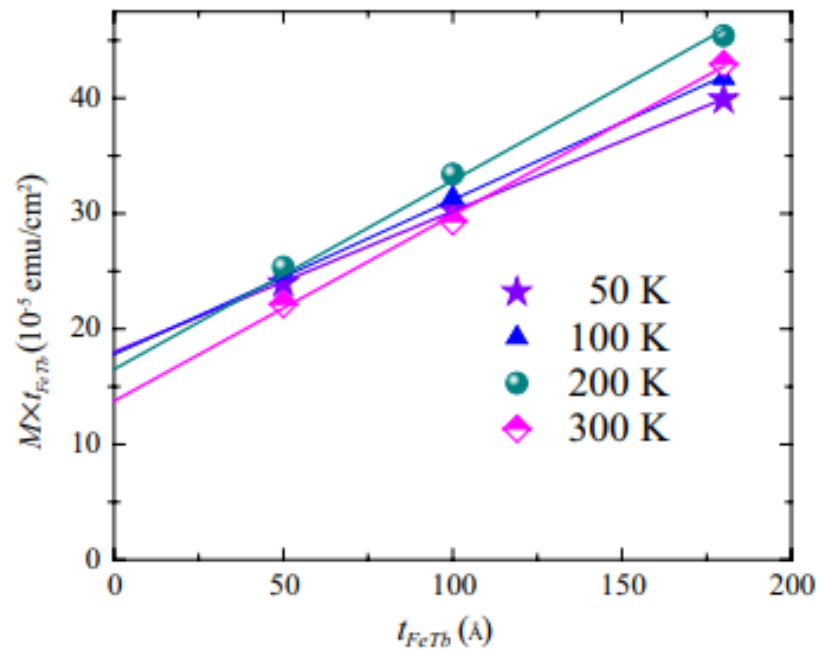


Рисунок 1.10 – Залежність добутку $M_{ML} \times t_{FeTb}$ від товщини шару FePt за різних температур [21]

За допомогою математичних методів розраховано величини намагніченості об'ємного шару (M_B) та $2\delta \times M_{int}$ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Залежність намагніченості об'ємного шару (M_B) та $2\delta \times M_{int}$ від температури [21]

Температура, К	Намагніченість об'ємного шару M_B , ерґ/см ³	$2\delta \times M_{int}$, ерґ/см ²
50	122	18×10^{-5}
100	134	$17,8 \times 10^{-5}$
200	163	$16,5 \times 10^{-5}$
300	161	$13,8 \times 10^{-5}$

З табл. 1.1 можна бачити, що намагніченість міжфазного шару (M_{int}) зменшується зі збільшенням температури, що є ознакою феромагнетизму, а не поведінки феримагнетика. Таким чином, можна припустити, що проміжний

шар є феромагнетиком, а саме – фазою FePt. Це підтверджує вимірювання магнітно-оптичного повороту Керра, отримане значення якого близьке до літературного значення, притаманного для FePt.

Зі зменшенням товщини шару $\text{Fe}_{83}\text{Tb}_{17}$ (t_{FeTb}) нижче 200 Å намагніченість насичення та полярний поворот Керра плівкових композицій FeTb/Pt зростає. Встановлено, що міжфазний шар товщиною 10 Å обумовлює виникнення більшої намагніченості, ніж об'ємний шар. Крім того, виявлено, що перпендикулярна магнітна анізотропія деградує зі зменшенням товщини шару FePt [21].

Вплив додаткових шарів Cu на температуру впорядкування у багатошарових плівках $[\text{Fe}/\text{Pt}/\text{Cu}]_{18}$ досліджено у роботі [22]. Отримані плівки відпалювали в атмосфері суміші $\text{Ar} + \text{H}_2$ в температурному діапазоні 300 °C - 500 °C протягом 60 секунд. Попередньо встановлено, що впорядкована фаза $L1_0$ -FePt формується вже за температури 300 °C у плівках з додатковими шарами Cu. В той же час, впорядкування у випадку плівок Fe/Pt починається за температури 350 °C. Вплив вмісту Cu на ступінь впорядкування оцінювали за співвідношенням параметрів решітки (c/a) впорядкованої фази. Встановлено, що співвідношення c/a збільшується зі збільшенням концентрації Cu, що вказує на те, що певна кількість Cu (яка не розчиняється у FePt) стримує процес впорядкування.

В роботі [23] досягнуто зменшення температури впорядкування плівки FePt товщиною 20 нм до 300 °C шляхом введення нижнього шару AgCu товщиною 20 нм. Коерцитивна сила плівок після відпалу за температури 300 °C становила 5,2 кЕ, а після збільшення температури 400 °C зросла до 10 кЕ. Зниження температури впорядкування можна пояснити виникненням напружень під час розкладання метастабільної фази AgCu при нагріванні. Також встановлено, що Cu під час відпалу дифундує у шар FePt, утворюючи потрібну сполуку $L1_0$ -FePtCu, що також сприяє зниженню температури впорядкування.

Введення аморфного шару NiAl також сприяє зниженню температури утворення впорядкованої фази $L1_0$ -FePt, що обумовлено різницею коефіцієнтів термічного розширення фаз NiAl та FePt [24]. Тонкі плівки FePt (90 нм), нанесені на аморфний шар NiAl (10 нм), характеризуються коерцитивністю 5 кЕ після відпалу за температури 380 °С. Тоді як плівки на підкладинці $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ без додаткового нижнього шару мають коерцитивність 0,4 кЕ.

У роботі [25] порівнюється вплив введення шарів Ru та Ag на температуру впорядкування та формування текстури зерен у тонких плівках FePt. Встановлено, що введення шару Ag приводить до зниження температури впорядкування та формування бажаної орієнтації зерен у напрямку [001]. В той же час, наявність шару Ru збільшує температуру формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt приблизно на 100 °С порівняно з плівками без додаткового шару. Це можна пояснити різницею в рівні напружень, що виникають в процесі термічної обробки. Наявність шару Ag викликає напруження розтягу, а наявність шару Ru спричинює виникнення напружень стиску.

Вплив проміжного шару Mn на формування впорядкованої структури у плівкових композиціях FePt/Mn/FePt досліджено у роботі [26]. Тонкі плівки отримано методом магнетронного розпорошення на кремнієву підкладинку $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$. Зразки піддано швидкому термічному відпалу в температурному діапазоні 650 °С - 800 °С з метою формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt. Додавання Mn з концентрацією до 10 ат.% сприяє перебігу процесу впорядкування та підвищує значення перпендикулярної магнітокристалічної анізотропії. Встановлено, що атоми Mn лише частково втілюються у кристалічну решітку FePt. Значною мірою вони дифундують крізь шар FePt, тим самим ініціюючи процес впорядкування, та утворюють оксид MnO на поверхні зразка. Також встановлено, що збільшення відсоткового вмісту Mn призводить до деградації текстури [001], яка характерна для впорядкованої фази.

Таким чином, можна зробити висновок, що введення додаткових шарів легуючих елементів у плівки на основі FePt може обумовлювати зниження температури впорядкування. Однак, цей вплив істотно залежить від характеру додаткового компонента, початкової товщини шарів та фізико-технологічних параметрів термічної обробки.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Тонкоплівкові композиції на основі FePt є перспективним матеріалом для створення магнітних носіїв інформації з надвисокою щільністю збереження даних, що обумовлюється високими магнітокристалічною анізотропією і коерцитивною силою впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

2. На закономірності термічно-індукованого формування структурно-фазових станів плівкових композицій на основі FePt істотний вплив чинять наявність додаткових шарів легуючих елементів та фізико-технологічні параметри термічної обробки.

3. Закономірності впливу введення додаткових магнітних шарів – зокрема Tb і Mn – на дифузійне формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt і її магнітні властивості не можна вважати такими, що встановлені повною мірою.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі досліджено закономірності термічно-індукованого формування структурно-фазових станів в плівках FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм). Плівки отримано методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені кремнієві підкладинки SiO₂(100 нм)/Si(001) і піддано відпалу у вакуумі за різних температур (300 °C - 550 °C). Закономірності формування фазового складу досліджувались за допомогою методу рентгеноструктурного фазового аналізу. Зміну пошарового розподілу хімічних елементів за товщиною плівкових композицій визначено методом вторинної іонної мас-спектрометрії.

2.1 Магнетронне осадження тонких металевих шарів

Метод магнетронного осадження представляє собою технологію нанесення тонких плівок на підкладинку за допомогою катодного розпорошення мішені в плазмі. При магнетронному розпорошенні в магнетроні за допомогою електричного та магнітного полів плазма локалізується поблизу поверхні катода-мішені. Саме цей ефект сприяє підвищенню ефективності розпорошення. В розряді утворюються позитивні іони, які прискорюються в напрямку катода та бомбардують його поверхню, вибиваючи при цьому частинки матеріалу. Розпорошені частинки мішені частково осаджуються на підкладинці у вигляді плівки, а частково розсіюються на молекулах залишкових газів і осаджуються на стінки вакуумної камери. Локалізація плазми поблизу катода дозволяє досягати значної густини іонного струму за меншого робочого тиску та забезпечувати високу швидкість розпорошення [27].

За допомогою магнетронного розпорошення можна виготовляти надпровідні і феромагнітні плівки, плівки з діелектриків, а також виготовляти плівки в атмосфері реактивних газів. Плівки, отримані магнетронним

розпорошенням, як правило, мають високу адгезію. Під час отримання плівкового матеріалу за допомогою даного методу підкладка не нагрівається, що дозволяє використовувати матеріали з низькою термічною стійкістю. Також можливе отримання тугоплавких матеріалів у тонкоплівковому стані [28].

2.2 Параметри термічної обробки плівкових зразків

В даній роботі нанорозмірні плівкові композиції FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм) піддавалися відпалу у вакуумній установці типу ВУП-5М (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд камери вакуумного універсального поста ВУП-5М

Тонкі плівки відпалювалися у вакуумі за різних температур (300 °С - 550 °С). Температура контролювалась за допомогою термопари, підведеної до нагріваючої поверхні.

Одна серія плівок відпалювалась у присутності магнітного поля з індукцією 145 мТл, друга – без прикладання магнітного поля. Магнітне поле створювалось навколо зразка електромагнітом під час нагрівання та витримки (рис. 2.2). Метою термічної обробки було отримання впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд електромагніту для створення магнітного поля під час відпалу

2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Після осадження і термічної обробки фазовий склад досліджуваних плівкових композицій визначався за допомогою методу рентгеноструктурного фазового аналізу, проведеного на дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV у випромінюванні мідного аноду (довжина хвилі $\lambda_{\text{CuK}\alpha}=1,54184 \text{ \AA}$).

Рентгеноструктурний аналіз заснований на явищі дифракції рентгенівського випромінювання на вузлах кристалічної ґратки. Кристалічна ґратка характеризується періодичністю розташування атомів в просторі. Тому коли електромагнітна хвиля довжиною λ падає на кристал, інтенсивне

розсіювання буде спостерігатися тільки в тих напрямках, для яких виконується умова Вульфа-Бреггів [29]:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

де d – міжплощинна відстань;

θ – брегівський кут;

λ – довжина хвилі випромінювання;

n – порядок відбиття.

Таким чином, якщо різниця ходу між розсіяними хвилями на сусідніх атомних площинах відрізняється на ціле число λ , тоді при інтерференції такі хвилі будуть посилюватися, а на дифрактограмі спостерігатимуться максимуми. Оскільки довжина хвилі випромінювання відома, можливо знайти кутові положення всіх рефлексів на дифрактограмі та розрахувати міжплощинні відстані, що їм відповідають, за формулою 2.1. Щоб визначити наявний фазовий склад матеріалу, необхідно порівняти знайдену міжплощинну відстань з картотекою ASTM [29].

2.4 Пошаровий хімічний аналіз методом вторинної іонної мас-спектрометрії

Мас-спектрометрія вторинних іонів (ВІМС) – це метод хімічного аналізу поверхні, який засновано на іонізації атомних шарів поверхні сфокусованим пучком іонів, які її бомбардують. Іони, які бомбардують поверхню (первинні) вибивають із неї атоми та іони речовини (вторинні). В якості первинних іонів можуть застосовувати іони інертних газів (Ar^+ , Xe^+), кисню (O^{2+} , O^+), металів (Cs^+ , In^+ , Ga^+ , Bi^+ та ін.). Вторинні іони аналізуються і дають інформацію щодо хімічного складу поверхні [30]. В результаті отримують графіки залежності інтенсивності виходу вторинних іонів від часу розпорошення, тобто розподіл іонів по глибині зразка.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Нанорозмірні плівкові композиції FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм) отримано методом магнетронного розпорошення на термічно-окиснені монокристалічні кремнієві підкладинки.

2. Отримані зразки піддано термічній обробці у вакуумі в інтервалі температур 300 °C - 600 °C з метою активації дифузійних процесів і формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt

3. Структуру, фазовий та хімічний склад плівкових зразків досліджено методами рентгеноструктурного фазового аналізу та вторинної іонної мас-спектрометрії, відповідно.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вплив параметрів термічної обробки на фазоутворення в нанорозмірних плівках FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt

Для визначення фазового складу та особливостей кристалічної структури нанорозмірні плівкові композиції FePt, FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt досліджувались методом рентгеноструктурного фазового аналізу після осадження та термічної обробки за різних фізико-технологічних параметрів. Термічна обробка проводилась у температурному інтервалі 300 °C - 550 °C. На рис. 3.1 представлено температурно-часові криві процесів нагріву, витримки і охолодження досліджуваних плівкових зразків.

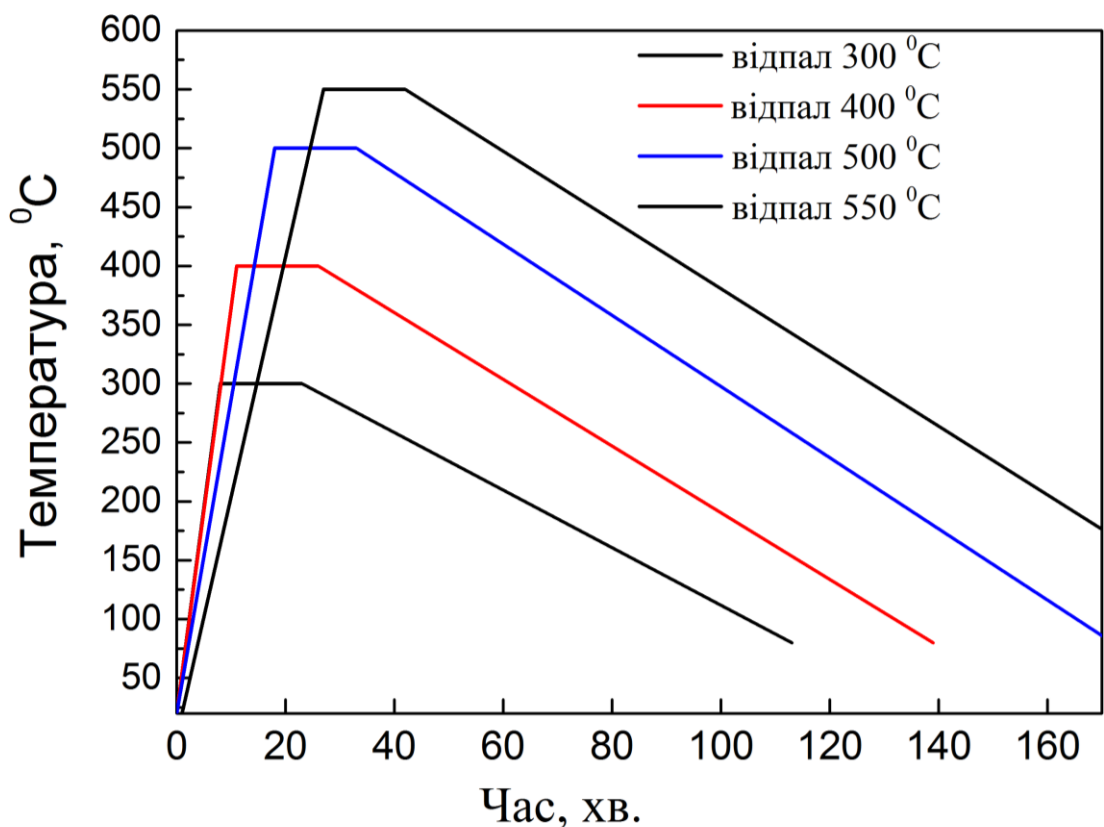


Рисунок 3.1 – Залежність температури зразків від часу в процесі термічної обробки

В табл. 3.1 представлено швидкості нагрівання і охолодження зразків в процесі відпалу. Варто зазначити, що середні швидкості охолодження є майже однаковими для всіх температур відпалу, тоді як швидкості нагрівання дещо відрізняються. Найшвидше нагрівається зразок до найменшої температури відпалу (300 °C), найповільніше – до найбільшої (550 °C). Це свідчить про деяку непостійність швидкості нагріву на різних температурних інтервалах – чим вищою є температура, тим повільніше здійснюється процес нагріву.

Таблиця 3.1 – Швидкості нагрівання та охолодження зразків під час термічної обробки

Температура відпалу, °C	Швидкість нагрівання, °C/хв	Швидкість охолодження, °C/хв
300	35	2,4
400	34,5	2,8
500	26,7	2,9
550	19,6	2,9

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу плівкових зразків FePt(30 нм), FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм) у вихідному стані після осадження представлено на рис 3.2.

На наведених дифрактограмах спостерігається рефлекс (111) від фази Al-FePt, що підтверджує формування неупорядкованої кристалічної структури з кубічним типом решітки в процесі осадження плівкового матеріалу. Також на наведених дифрактограмах наявний гармонічний рефлекс другого порядку від монокристалічної підкладки.

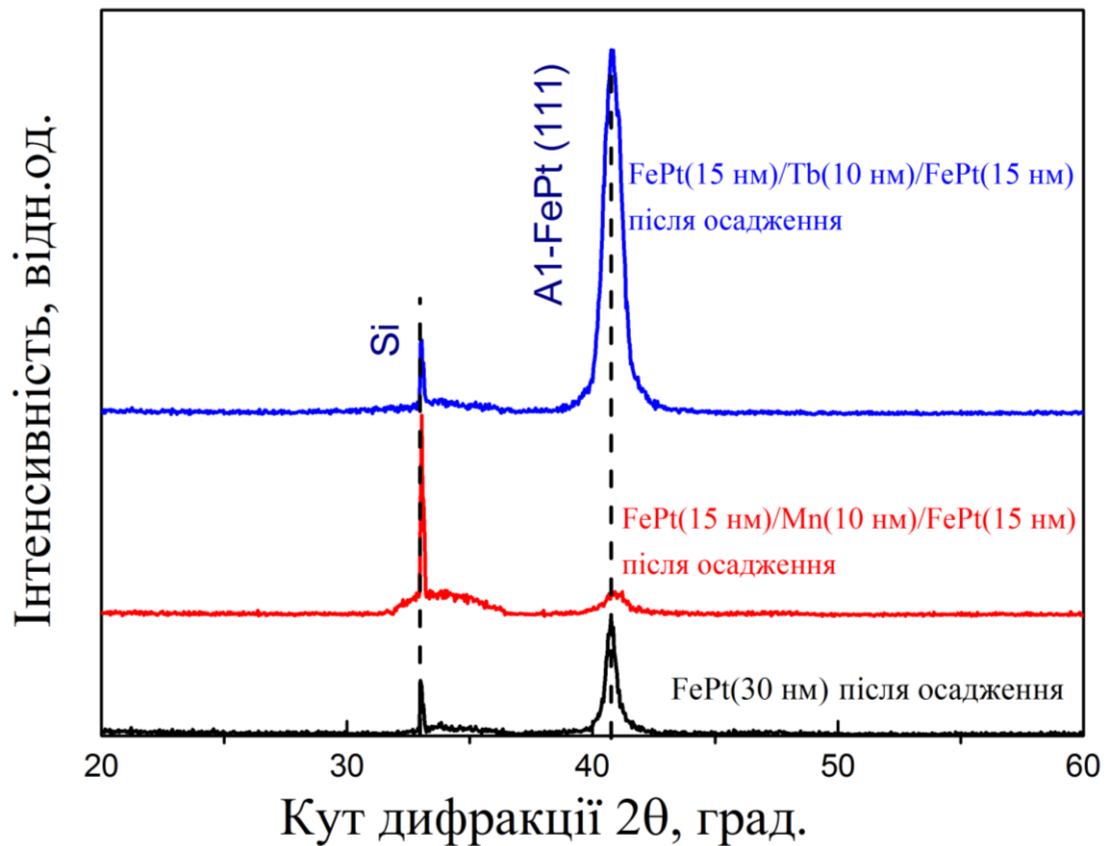


Рисунок 3.2 – Дифрактограми плівкових композицій FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt після осадження

Подальша термічна обробка призводить до зміщення дифракційного рефлексу (111) від фази $A1$ -FePt в бік більших кутів (рис. 3.3), що свідчить про початок процесу впорядкування.

При відпалі зразків FePt, FePt/Mn/FePt за температури 500 °C і вище з'являється рефлекс (111) від фази $L1_0$ -FePt, для зразка FePt/Tb/FePt даний рефлекс з'являється вже після термічної обробки за температури 400 °C.

З дифрактограми, представленої на рис. 3.3, в, можна бачити, що термічна обробка плівкового зразка FePt/Tb/FePt за температури 550 °C приводить до утворення інтерметалідної фази Pt_2Tb , про що свідчить поява дифракційного рефлексу (111), характерного для даної фази.

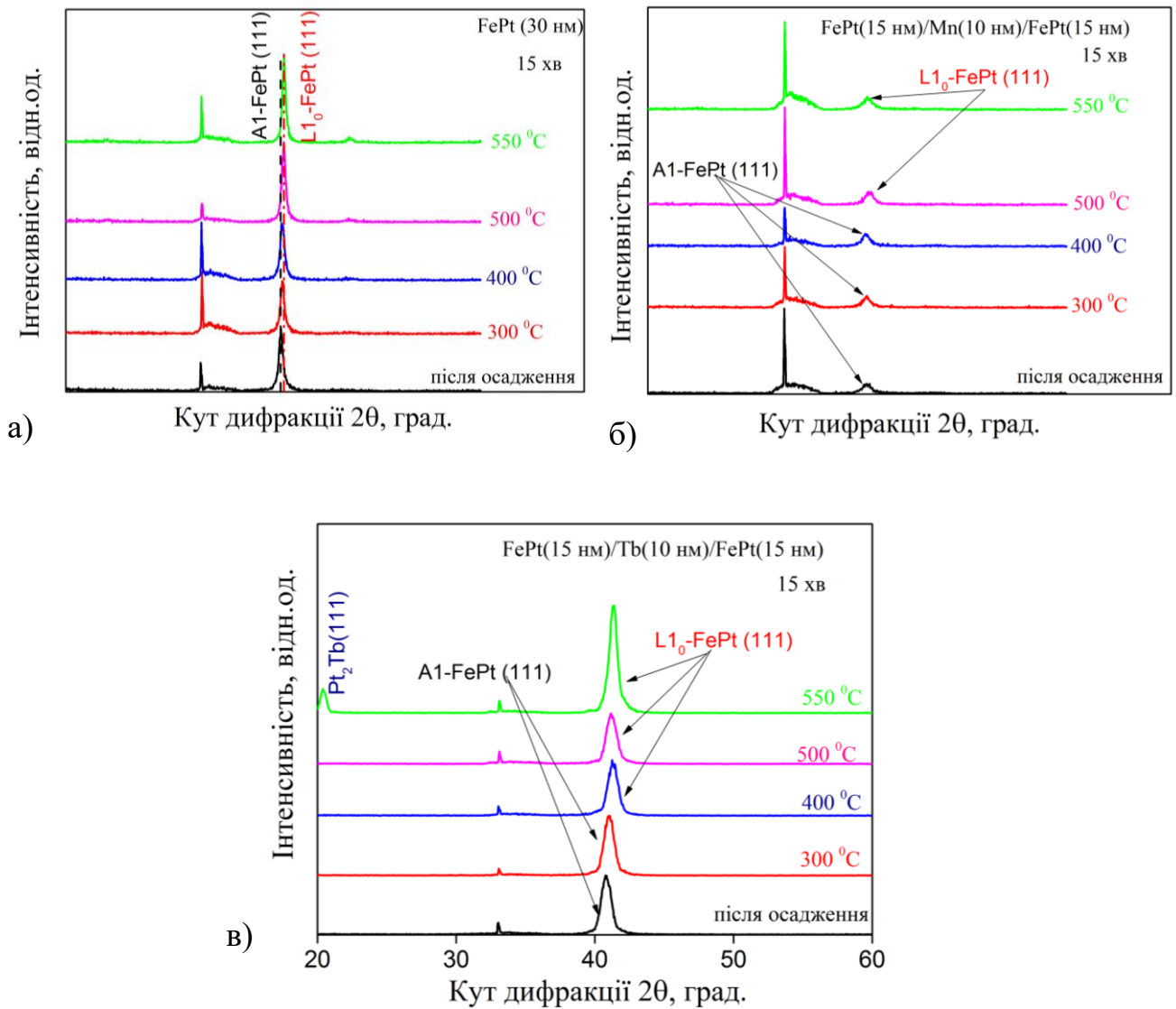


Рисунок 3.3 – Дифрактограми плівкових композицій FePt (а), FePt/Mn/FePt (б), FePt/Tb/FePt (в) після термічної обробки

При детальнішому розгляді дифрактограм зразків FePt та FePt/Mn/FePt виявлено, що після відпалу за температури 550 °C впродовж 15 хвилин, 60 хвилин та 120 хвилин, окрім найвиразнішого рефлексу (111) від фази L₁₀-FePt, можна бачити, що на дифрактограмах також наявні рефлекс від впорядкованої фази L₁₀-FePt (001) та рефлекс L₁₀-FePt (200), що свідчить про формування впорядкованої фази з тетрагональними викривленнями кристалічної будови.

На рис. 3.4 зображено дифрактограми зразків FePt, відпалених за різної витримки.

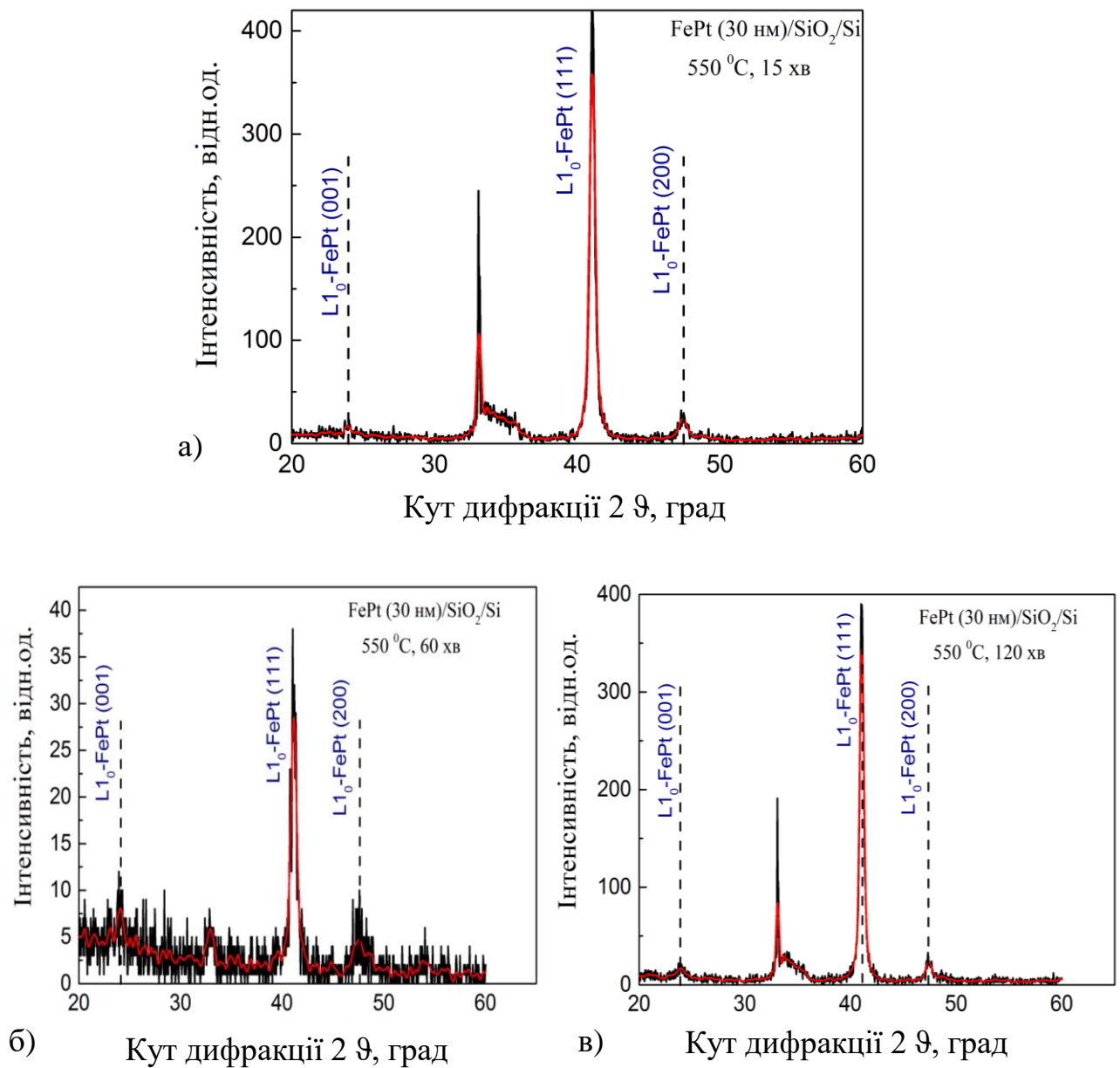


Рисунок 3.4 – Дифрактограми плівкових композицій FePt після термічної обробки впродовж 15 хвилин (а), 60 хвилин (б) та 120 хвилин (в) за температури 550 °С

Відпал плівкових зразків з додатковим проміжним шаром Mn за температури 550 °С впродовж 15, 60 та 120 хвилин (рис. 3.5) також призводить

до утворення впорядкованої фази, про що свідчить наявність рефлексу (001) від фази $L1_0$ -FePt

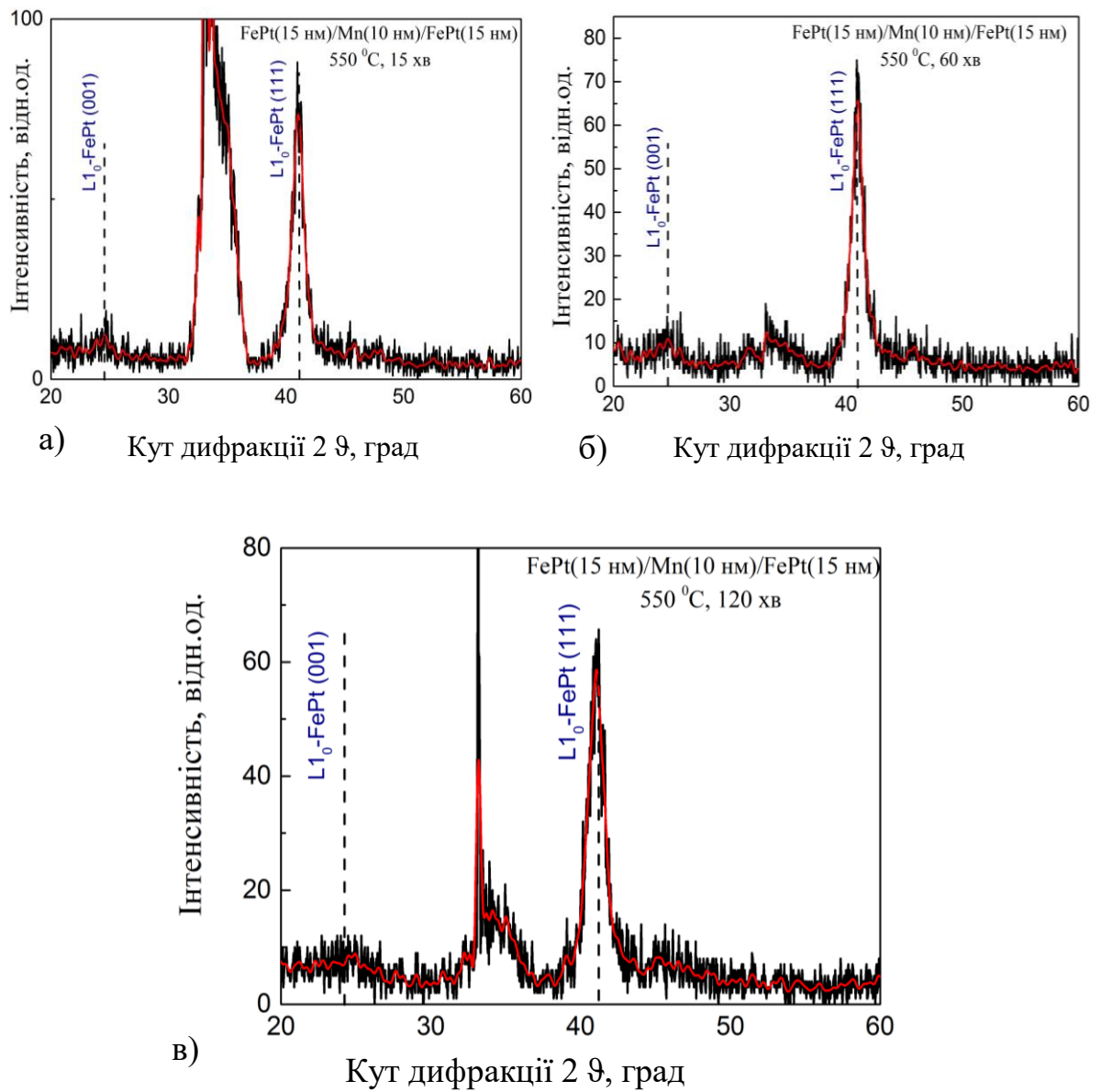


Рисунок 3.5 – Дифрактограми плівкових композицій FePt/Mn/FePt після термічної обробки впродовж 15 хвилин (а), 60 хвилин (б) та 120 хвилин (в) за температури 550 °C

Термічна обробка за температур, вищих від 500 °C, приводить до утворення впорядкованої фази у зразках FePt та FePt/Mn/FePt, при цьому

тривалість відпалу не чинить істотного впливу на перебіг процесу впорядкування.

Результати розрахунку міжплощинних відстаней та параметрів кристалічної структури зразків FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt після термічної обробки за різних фізико-технологічних параметрів наведено в таблиці 3.2, з якої можна побачити, що збільшення температури відпалу призводить до зменшення параметру кристалічної ґратки. Це свідчить про початок процесів трансформації кубічної ґратки в тетрагональну, яка притаманна впорядкованій фазі.

Таблиця 3.2 – Результати індиціювання дифрактограм плівкових композицій FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt після осадження і відпалів при різних температурах

Зразок	Кут дифракції 2θ , градуси	$\sin\theta$	Міжплощин-на відстань d/n , Å	Парамет-ри ґратки, Å	Рефлекс
Після осадження					
FePt	40,76	0,348	2,214	$a = 3,834$	$A1\text{-FePt}(111)$
FePt/Tb/FePt	40,76	0,348	2,214	$a = 3,834$	$A1\text{-FePt}(111)$
FePt/Mn/FePt	40,92	0,350	2,205	$a = 3,820$	$A1\text{-FePt}(111)$
Після відпалу за температури 300 °C					
FePt	40,88	0,349	2,207	$a = 3,823$	$A1\text{-FePt}(111)$
FePt/Tb/FePt	40,96	0,350	2,203	$a = 3,816$	$A1\text{-FePt}(111)$
FePt/Mn/FePt	40,96	0,350	2,203	$a = 3,816$	$A1\text{-FePt}(111)$
Після відпалу за температури 400 °C					
FePt	40,8	0,349	2,212	$a = 3,831$	$A1\text{-FePt}(111)$
FePt/Tb/FePt	41,24	0,352	2,189	$a = 3,791,$ $c = 3,655$	$L1_0\text{-FePt}(111)$
FePt/Mn/FePt	40,96	0,350	2,203	$a = 3,816$	$A1\text{-FePt}(111)$

Продовження таблиці 3.2

Зразок	Кут дифракції 2θ , градуси	$\sin\theta$	Міжплощин-на відстань d/n , Å	Парамет-ри ґратки, Å	Рефлекс
Після відпалу за температури 500 °C					
FePt	41,04	0,351	2,199	$a = 3,809$, $c = 3,672$	$L1_0$ -FePt (111)
FePt/Tb/FePt	41,16	0,352	2,193	$a = 3,799$, $c = 3,662$	$L1_0$ -FePt (111)
FePt/Mn/FePt	41,08	0,351	2,197	$a = 3,806$, $c = 3,669$	$L1_0$ -FePt (111)
Після відпалу за температури 550 °C					
FePt	41,04	0,351	2,199	$a = 3,809$, $c = 3,672$	$L1_0$ -FePt (111)
	47,4	0,402	1,918	$a = 3,836$, $c = 3,698$	$L1_0$ -FePt (200)
	23,91	0,207	3,722	$a = 3,722$, $c = 3,588$	$L1_0$ -FePt (001)
FePt/Tb/FePt	41,36	0,353	2,183	$a = 3,781$, $c = 3,645$	$L1_0$ -FePt (111)
	20,45	0,178	4,343	$a = 7,522$	Pt_2Tb (111)
FePt/Mn/FePt	41,28	0,352	2,187	$a = 3,788$, $c = 3,652$	$L1_0$ -FePt (111)
	24,5	0,212	3,633	$a = 3,633$, $c = 3,502$	$L1_0$ -FePt (001)

Графік залежності кутового положення дифракційних максимумів $L1_0$ -FePt (111) та $L1_0$ -FePt (111) від температури відпалу для трьох серій досліджених плівкових зразків демонструє однакову поведінку – зі збільшенням температури відпалу дані дифракційні рефлекси зміщуються в бік більших кутів (рис. 3.6), що свідчить про розвиток процесів дифузійного фазоутворення.

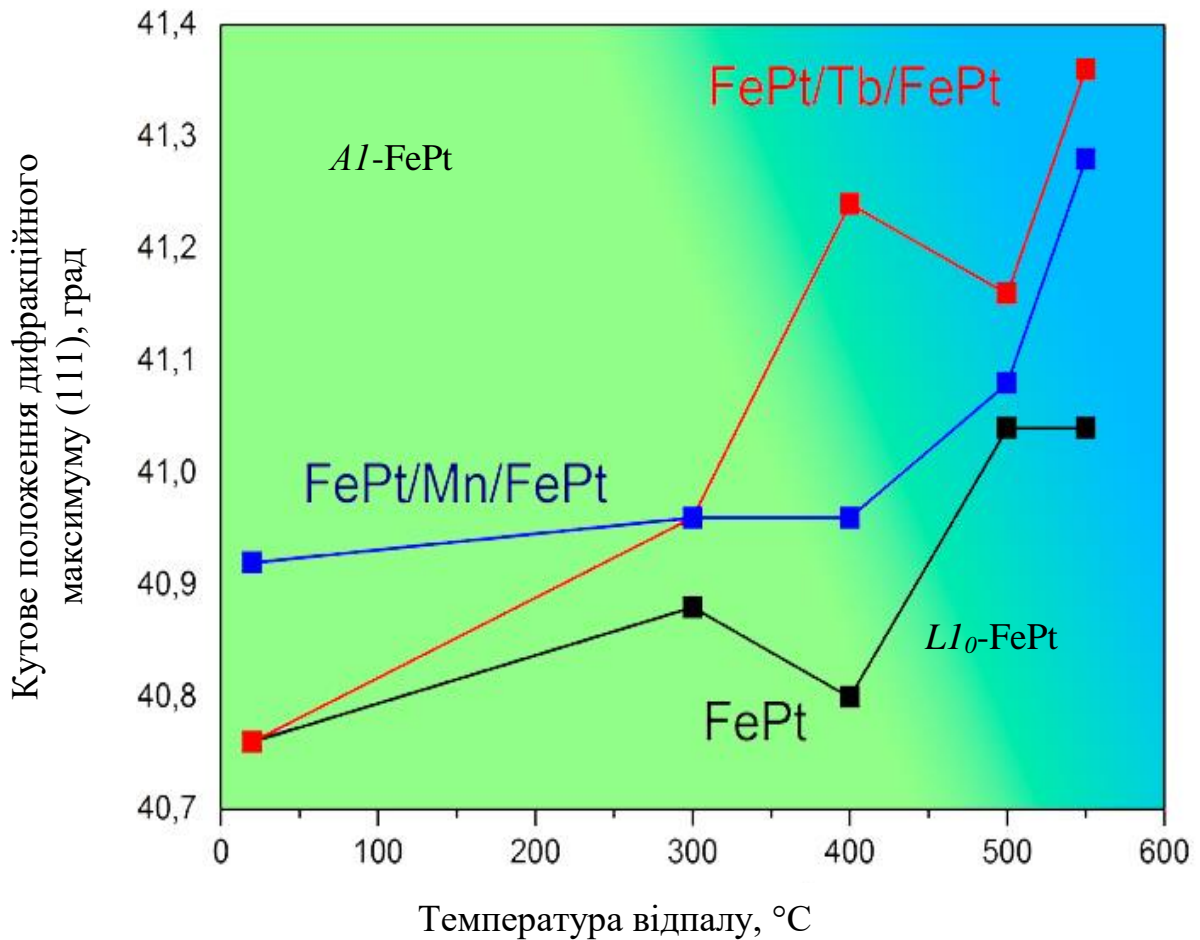


Рисунок 3.6 – Залежність кутового положення дифракційних максимумів FePt (111) та LI_0 -FePt (111) від температури відпалу

Варто зазначити, що для зразків з проміжним шаром тербію рефлекс (111) від фази AI -FePt зміщується значніше, ніж для зразків FePt та FePt/Mn/FePt. Після відпалу за температури 550 °C різниця між кутовими положеннями рефлексів (111) від фази LI_0 -FePt зразків FePt/Tb/FePt та FePt складає 0,32 градуса, тоді як кутові положення рефлексів FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt різняться всього на 0,08 градуса.

3.2 Вплив магнітного поля на фазоутворення в тонких плівках при відпалі у вакуумі

Результати рентгеноструктурних досліджень впливу магнітного поля, прикладеного в процесі термічної обробки, на перебіг фазових перетворень в тонких плівках FePt/Tb/FePt представлено на рис. 3.7.

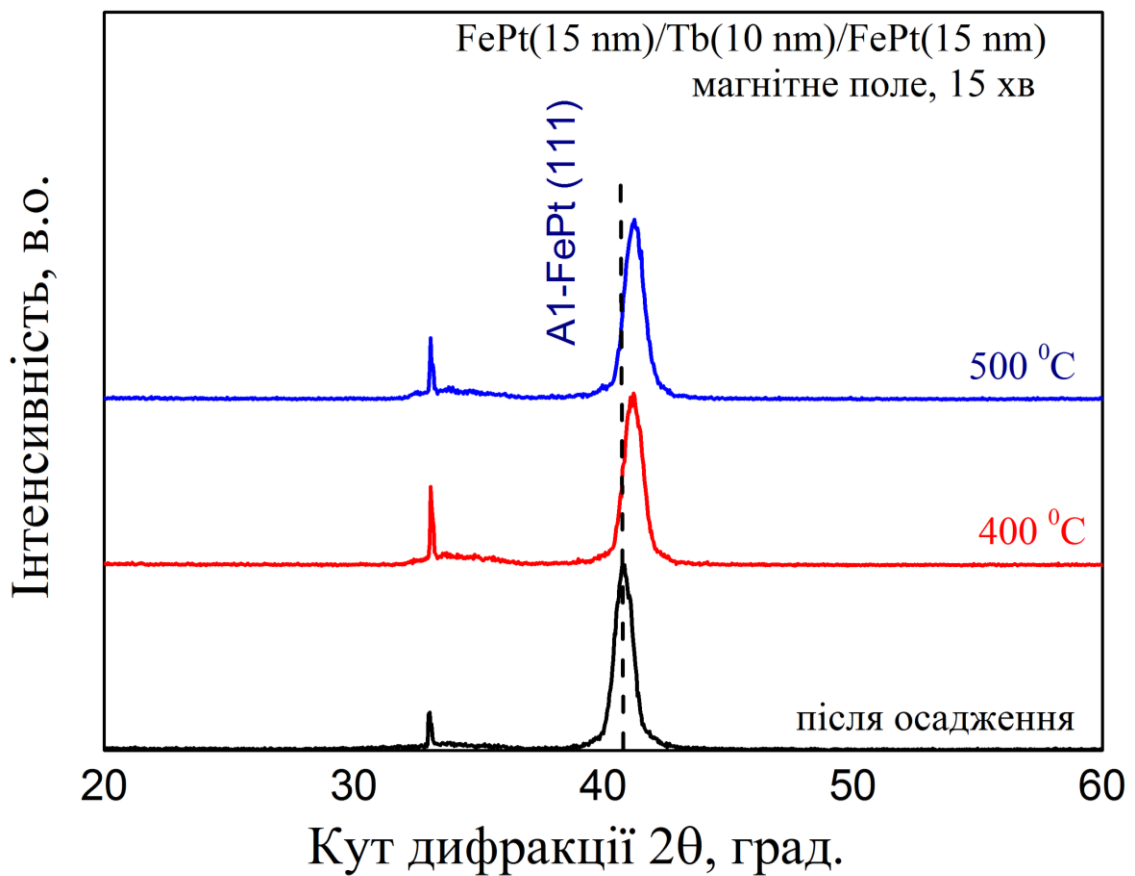


Рисунок 3.7 – Дифрактограми зразків FePt/Tb/FePt, відпалених за різних температур в присутності зовнішнього магнітного поля

Зразки FePt/Tb/FePt піддавалися відпалу у присутності зовнішнього магнітного поля за температур 400 °C та 500 °C впродовж 15 хвилин.

В таблиці 3.3 показано зміщення кутового положення дифракційного максимуму (111) відпалених у магнітному полі зразків та зразків, відпалених за його відсутності.

Таблиця 3.3 –Кутове положення дифракційного максимуму

Температура відпалу, °C	Наявність магнітного поля	Кутове положення дифракційного максимуму
400	відсутнє	41,24
400	присутнє	41,25
500	відсутнє	41,16
500	присутнє	41,27

Можна зробити висновок, що присутність магнітного поля сприяє зміщенню дифракційного максимуму в бік більших кутів. Тобто, зовнішнє магнітне поле сприяє перебігу процесу впорядкування і формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

3.3 Особливості розподілу хімічних елементів за товщиною нанорозмірних плівок FePt/Tb/FePt після термічної обробки

Результати пошарового хімічного аналізу методом вторинної іонної мас-спектрометрії плівкових зразків FePt/Tb/FePt після осадження і після відпалу за температури 550 °C представлено на рис. 3.8 та рис. 3.9, відповідно.

На наведених пошарових розподілах хімічного складу спостерігаються чіткі границі поділу між шарами FePt і Tb. Після проведення термічної обробки за температури 550 °C впродовж 15 хвилин можна бачити, що платина рівномірно розподілилася за товщиною плівкового зразку, а залізо та тербій залишилися майже без змін в порівнянні зі зразком у вихідному стані. З цього можна зробити висновок, що відпал сприяв активації дифузійних процесів в плівковому зразку FePt/Tb/FePt.

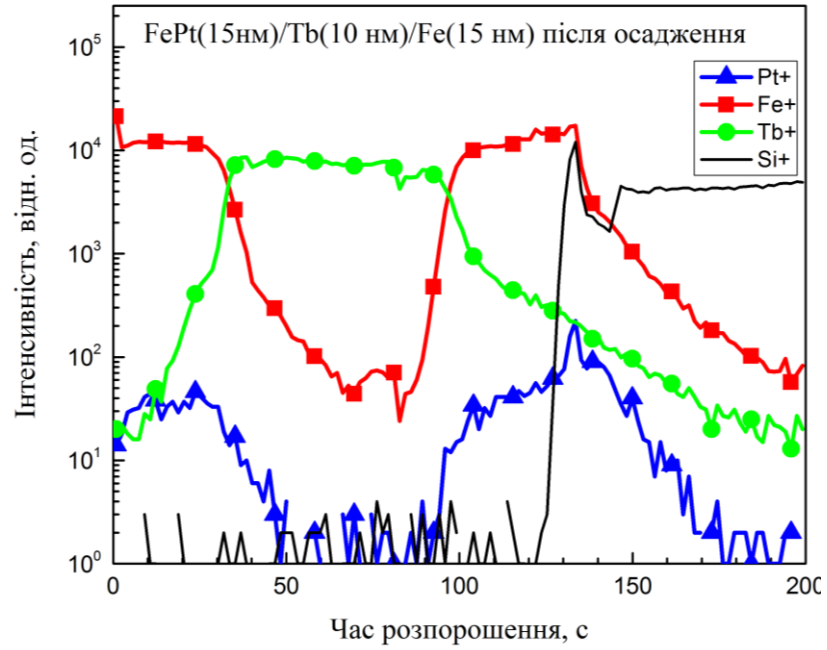


Рисунок 3.8 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції FePt/Tb/FePt після осадження

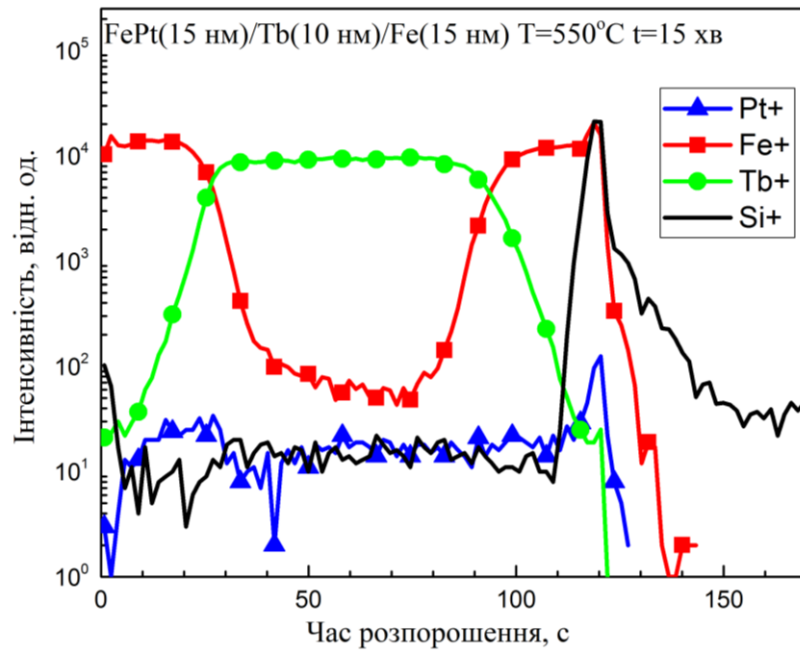


Рисунок 3.9 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції FePt/Tb/FePt після термічної обробки за температури 550 °C

На рис. 3.10 зображено розподіл елементів Fe, Pt, Tb після осадження та після відпалу за 550 °C за товщиною плівкової композиції FePt/Tb/FePt.

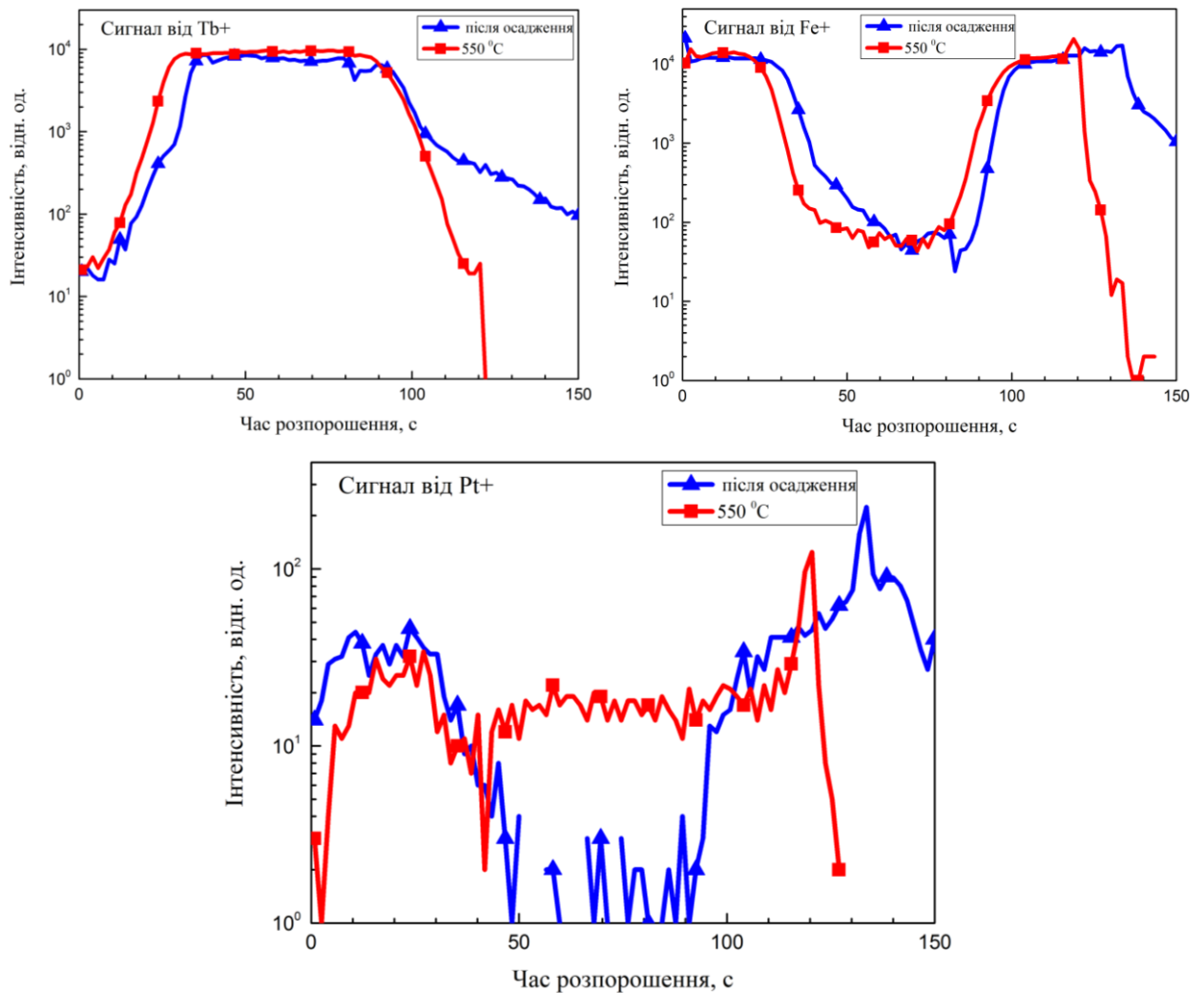


Рисунок 3.10 – Пошаровий розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції FePt/Tb/FePt після термічної обробки за температури 550 °C

Істотні зміни після відпалу можна спостерігати для платини. Незважаючи на те, що FePt є стійким з'єднанням, після відпалу платина дифундувала по всій глибині зразка, тоді як залізо та тербій майже не змінили свого положення.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що в процесі магнетронного осадження в структурі плівкових композицій FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt формується неупорядкована фаза $A1$ -FePt з кубічним типом кристалічної будови.

2. Відпал плівкової композиції FePt/Tb/FePt за температури 550 °C призводить до утворення інтерметалідної фази Pt₂Tb, також, відповідно до результатів пошарового хімічного аналізу, до рівномірного розподілу Pt за всією товщиною плівкового матеріалу.

3. Прикладання зовнішнього магнітного поля в процесі термічної обробки нанорозмірних плівкових композицій FePt, FePt/Tb/FePt, FePt/Mn/FePt сприяє перебігу процесів впорядкування і формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

4. Початок процесу формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt, якій характерні тетрагональні спотворення кристалічної будови, в плівкових композиціях зафіксовано в результаті термічної обробки за температури 550 °C.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Важливою частиною організації виробничого процесу на підприємствах є охорона праці.

Основним завданням охорони праці є розробка методів і засобів захисту робітників від можливих загроз та небезпек на робочому місці, а також запобігання аваріям та ліквідації їх наслідків на виробництві.

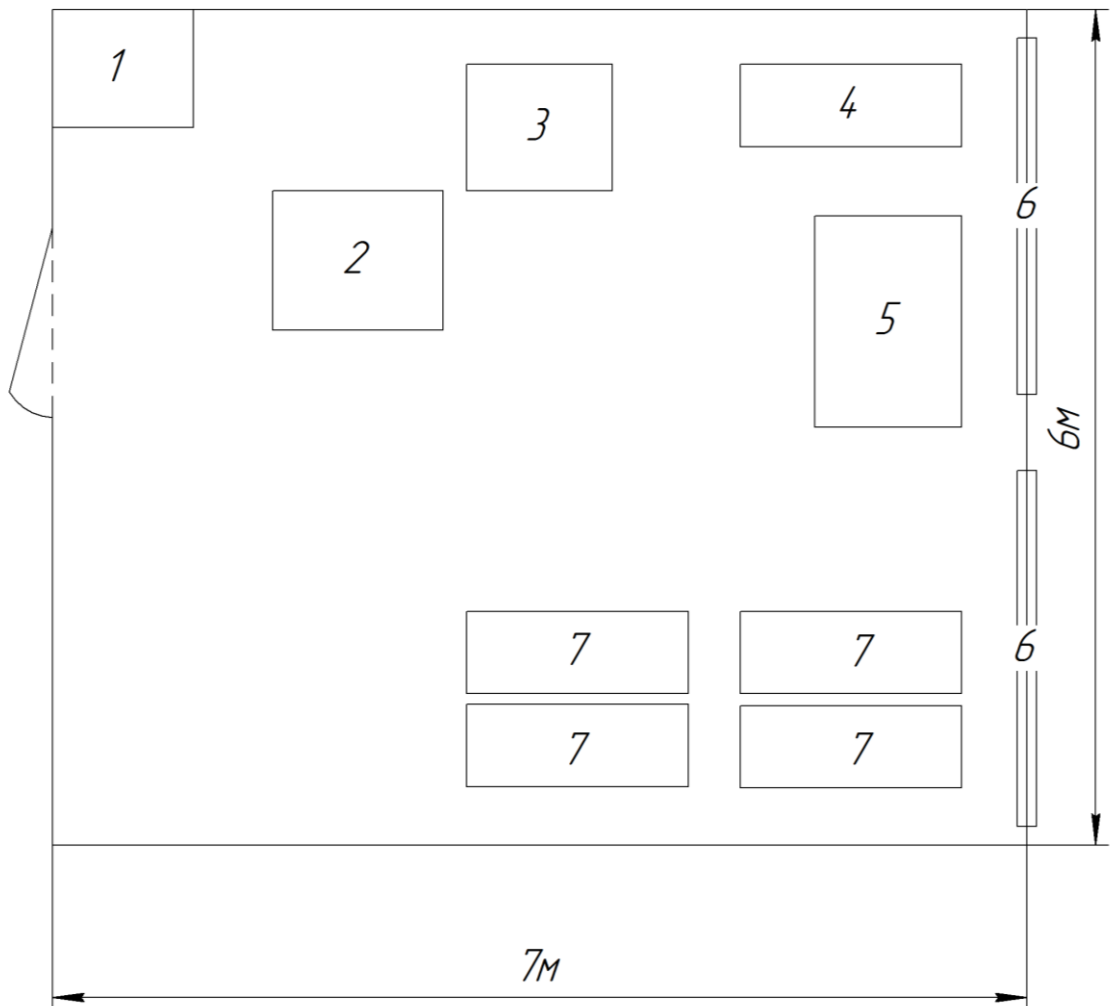
В Україні право людей на безпечні умови праці гарантує Конституція, Закон України «Про охорону праці» та законодавчі і нормативно-технічні акти. В Національному Технічному Університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за дотримання норм охорони праці відповідає відділ охорони праці, яким керує Е.Г. Луцик. На інженерно-фізичному факультеті відповідальним є П.І. Лобода.

Метою даного розділу є аналіз умов праці при виконанні науково-дослідної роботи, визначення можливих загроз та шкідливих чинників, а також розробка способів їх ліквідації та нейтралізації.

У даній науково-дослідній роботі вивчається вплив параметрів термічної обробки на властивості тонкоплівкових композицій FePt, FePt/Mn/FePt, FePt/Tb/FePt. Термічна обробка проводилась у вакуумному універсальному пості типу ВУП-5М в температурному інтервалі 300 °С - 550 °С.

4.1 Аналіз параметрів приміщення

Науково-дослідна робота виконувалась в лабораторії вакуумно-термічної обробки (кімната 506, 9 корпус рис. 4.1).



1 – шафа; 2 – установка ВУП-5М (робоче місце); 3 – комп'ютер; 4 – шафа для зразків; 5 – стіл для підготовки зразків; 6 – вікно; 7 – робочий стіл

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії вакуумно-термічної обробки

Приміщення лабораторії має наступні параметри: розміри кімнати 6×7 метрів, висота стелі – 2,7 метрів, площа приміщення складає 42 м², об'єм приміщення складає 113,4 м³. У лабораторії працює дві людини, тож на кожного працівника припадає 21 м² площі та 56,7 м³ об'єму, що відповідає санітарним нормам згідно ДсанПіН 3.32-007-98 [31].

4.2 Мікроклімат робочої зони

Важливою частиною робочого середовища, від якої залежить самопочуття та продуктивність праці робітників є повітря робочої зони. Саме якість повітря може стати головною причиною захворювань та значною мірою впливати на здоров'я. Тому стан повітря в робочому просторі постійно контролюється та перевіряється. Для цього визначають мікрокліматичні умови та вміст шкідливих речовин.

Мікрокліматичні умови – це сукупність певних параметрів, за якими визначають стан повітря робочої зони. До параметрів мікроклімату відносять [32]:

- температуру повітря ($^{\circ}\text{C}$),
- відносну вологість повітря (%),
- швидкість руху повітря (м/с),
- інтенсивність теплового (інфрачервоного) опромінювання ($\text{Вт}/\text{м}^2$) від поверхонь обладнання та активних зон технологічних процесів.

Всі роботи, які виконуються на підприємствах чи у лабораторіях поділяють на категорії залежно від енерговитрат організму для виконання даної роботи. Для кожної категорії встановлено свої допустимі мікрокліматичні вимоги згідно ДСН 3.3.6.042-99 [33].

Роботу, що проводилася у приміщенні даної лабораторії можна віднести до категорії робіт середньої важкості – Па. Ця робота пов'язана з ходінням, переміщенням невеликих (до 1 кг) виробів, предметів у положенні стоячи або сидячи, які потребують незначного фізичного напруження. За такого навантаження енерговитрати організму людини становлять 160 ккал/год - 210 ккал/год [33].

Параметри мікроклімату лабораторії наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату [33]

Категорія робіт середньої важкості Па			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18 - 20	40 - 60	0,2
Данні вимірювань	18	60	0,2
Теплий	21 - 23	40 - 60	0,3
Данні вимірювань	22	60	0,2
Висновки	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам

Згідно результатів вимірювання мікроклімату, лабораторія відповідає оптимальним санітарним нормам та є безпечною для виконання робіт.

4.3 Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії

Освітлення робочого приміщення є важливим чинником для забезпечення комфортних умов праці. Правильно розміщене освітлення позитивно впливає на нервову систему робітників, дозволяє бути більш сконцентрованим та уважним.

У лабораторії застосовано суміщене освітлення, за якого природне освітлення доповнюється штучним. Природне освітлення забезпечується бічними віконними прорізами, а штучне освітлення створюють люмінесцентні лампи ЛБ-40. Категорія робіт, які виконуються у лабораторії, відноситься до середньої точності (четвертий розряд зорових робіт).

4.3.1 Розрахунок характеристик природнього освітлення

Природнє освітлення характеризується коефіцієнтом природнього освітлення (КПО). КПО для виробничих та лабораторних приміщень визначається найменшим розміром об'єкта розрізнення, характеристикою зорової роботи та розрядом зорової роботи.

Нормоване значення КПО (e_n) для нашого приміщення можна розрахувати за формулою:

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

де e_n – значення КПО для робіт середньої точності,

m_n – коефіцієнт світлового клімату [34].

Природнє світло потрапляє в приміщення через вікна, які розташовані на південній стороні кімнати. Для південної орієнтації m_n становить 0,85, а значення КПО для робіт середньої точності складає 1,5 %. Підставляючи коефіцієнти у формулу 4.1, отримуємо значення КПО для лабораторії:

$$e_n = 1,5 \cdot 0,85 = 1,275.$$

Із розрахунків можна зробити висновок, що тривала робота при такій освітленості може стати причиною зниження зору робітників, головного болю та інших професійних захворювань. Тому природнє освітлення варто доповнювати штучним.

4.3.2 Розрахунок параметрів штучного освітлення

Штучне освітлення створюється в лабораторії за допомогою 12 люмінесцентних ламп типу ЛБ-40. Для розрахунку параметрів освітлення існує декілька методів: метод питомої потужності, розрахунок коефіцієнта

використання світлового потоку та точковий метод. В даній роботі розрахуємо коефіцієнт використання світлового потоку.

Розрахункове рівняння для визначення нормованої освітленості має наступний вигляд [35]:

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

де F – світловий потік;

E – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

K – коефіцієнт запасу,

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Світловий потік F для ламп типу ЛБ-40 становить 3200 лм, коефіцієнт запасу складає 1,5, коефіцієнт нерівномірності – 1,1. В лабораторії знаходиться 6 світильників, у кожному по дві лампи, коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,56$. Підставивши необхідні значення у формулу 4.2, отримаємо наступне значення нормованої освітленості:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z} = \frac{3200 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,56}{1,5 \cdot 42 \cdot 1,1} = 310 \text{ лк}$$

За даними ДБН В.2.5–28–2006 норма освітленості робочого приміщення становить 300 лк. Розрахована нормована освітленість відповідає нормі, тож штучне освітлення є достатнім для даної лабораторії

4.4 Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії

В ході виконання науково-дослідної роботи в приміщенні лабораторії виявлені такі фактори, які можуть становити загрозу:

- шум та вібрації,
- небезпека ураження електричним струмом,
- небезпека при роботі з вакуумною установкою.

Для запобігання нещасних випадків і ситуацій, які можуть призвести до травматизму, кожен працівник лабораторії проходить інструктаж з техніки безпеки.

Шкідливі фактори та можливі небезпеки, які можуть бути на місці виконання науково-дослідної роботи представлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Шкідливі фактори при виконанні НДР

Операція	Устаткування	Потенційні небезпеки
Підготовка зразків	Алмазний різак	Травмування
Відпал зразків	Установка ВУП-5М	Ураження електричним струмом, опіки, шум, вібрації
Обробка результатів	Комп'ютер ЕОМ	Ураження електричним струмом

4.4.1 Аналіз шуму та вібрацій

Під час роботи вакуумної установки вакуум в ній підтримується завдяки роботі дифузійного та форвакуумного насосів. Саме робота цих

насосів створює основний шум та вібрації. Тривалий шум чинить негативний вплив на нервову систему та може бути причиною зниження слуху, емоційного та психологічного виснаження. В залежності від рівня шуму (поріг больової чутливості $I = 120$ дБА) людина може отримати фізичні пошкодження та втратити слух.

У лабораторії вакуумно-термічної обробки рівень шуму складає 52 дБА, що є допустимим згідно ДСН 3.3.6.037-99 [36].

При роботі установки також присутні вібрації – механічні коливання обладнання, а саме дифузійного та форвакуумного насосів. Задля мінімізації цих коливань насоси установлені на гумових підставках – віброізоляторах та окремому фундаменті. Такі заходи забезпечують допустимий рівень вібрації згідно санітарним нормам мікроклімату [33].

4.4.2 Аналіз небезпек при роботі з установкою ВУП-5М

Робота з установкою для відпалу у вакуумі потребує певних знань та навичок. Установка має індикатори для інформування лаборанта про відсутність водопостачання, недостатню герметичність камери, датчик температури в камері та ін.

Пошкодження системи водного охолодження може призвести до перегрівання дифузійного насосу та його згорання, до витікання масла, короткого замикання та ураження електричним струмом. Тому при відсутності або відключенні водопостачання слід негайно вимкнути установку та охолодити дифузійний насос ззовні.

При початку роботи з установкою необхідно звертати увагу на цілісність кабелів живлення, після чого можна приступати до роботи. Категорично забороняється заходити та торкатися задньої сторони установки при її роботі.

Вимкнення установки відбувається в наступній послідовності:

- відключення струму, завдяки якому відбувається нагрів,

- вимкнення форвакуумного насосу за температури зразка близько 80 °С,
- вимкнення дифузійного насосу, після його охолодження,
- вимкнення установки,
- відключення подачі води.

При відключенні в камері установки має залишатися вакуум для того, щоб робочі елементи не взаємодіяли з киснем повітря.

4.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами

Електробезпека – це сукупність технічних та організаційних заходів для забезпечення захисту робітників від небезпеки ураження електричним струмом.

Електротравма – травма, яка є наслідком ураження електричним струмом від неізольованих дротів, підключених до мережі чи від ураження блискавкою. Внаслідок такої травми в організмі людини відбуваються важкі зміни, які часто можуть приводити до смерті [37].

Існує три категорії приміщень в залежності від можливості ураженні електричним струмом [37]:

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

Для особливо небезпечних приміщень характерні такі умови: висока відносна вологість повітря (близько 100 %), хімічно або біологічно активне середовище. Такі фактори негативно впливають на частини устаткування, які проводять струм та на ізолюючі конструкції.

Приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки за однієї з наступних умов: протягом тривалого часу відносна вологість є вищою за 75 % або температура робочої зони вище за 35 °С, в приміщенні струмопровідна підлога або є можливість випадково доторкнутися до

металевих частин устаткування, які заземлені і частин, що можуть бути під напругою [37].

В лабораторії вакуумно-термічної обробки небезпеку ураження електричним струмом несуть комп'ютери для обробки результатів експериментів та установка ВУП-5М. Дана лабораторія є приміщенням підвищеної небезпеки, оскільки є можливість одночасно торкнутися металевих частин конструкції будівлі, які з'єднанні з землею та до тильної сторони установки. При вході в лабораторію знаходиться щиток для відключення електрики у разі нещасного випадку.

Всі електричні прилади та установка ВУП-5М у нормальному робочому режимі ізольовані, що забезпечує захист від ураження електричним струмом. Робочі місця в лабораторії розташовані таким чином, щоб запобігти одночасному доторканню до корпусу установки та інших електричних приладів.

4.4.4 Виробничі випромінювання

Дані про виробничі випромінювання нормуються документом: "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" [38].

Вакуумно-термічна обробка зразків передбачає обробку результатів досліджень за допомогою комп'ютера. При роботі з електронно-обчислювальною технікою на організм людини може впливати ультрафіолетове випромінювання, електростатичне поле та рентгенівське випромінювання. Робота за комп'ютером передбачає також велике навантаження на очі.

Для запобігання наслідків впливу випромінювання від побутової апаратури встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання – не більше ніж 100 мкР/год згідно з ДСП 6.177 - 2005- 09 - 02 [39].

Оскільки обробка даних з експериментів передбачає тривалий час роботи за комп'ютером, бажано, щоб загальний час роботи за монітором не перевищував 4 годин за зміну.

4.5 Організація робочого місця

Організація праці на робочому місці – це система заходів, які забезпечують ефективне використання знарядь та предметів праці для трудового процесу [32].

Робоче місце – це простір, в якому відбувається трудова діяльність працівників. Для максимальної ефективності роботи працівників та збереження їх здоров'я на виробництвах дотримуються норм організації праці на робочому місці згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10.

За цими нормами обирається робоча поза (вільна, стоячи або сидячи). Відповідно до обраної робочої пози складається оптимальний графік праці та відпочинку робітників, організовується робочий простір.

Для виконання даної науково-дослідної роботи обрана робоча поза сидячи, оскільки основна частина роботи виконується за допомогою комп'ютера. Під час роботи з ПК робоче місце повинно мати наступні характеристики (рис. 4.2):

- 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 [40].

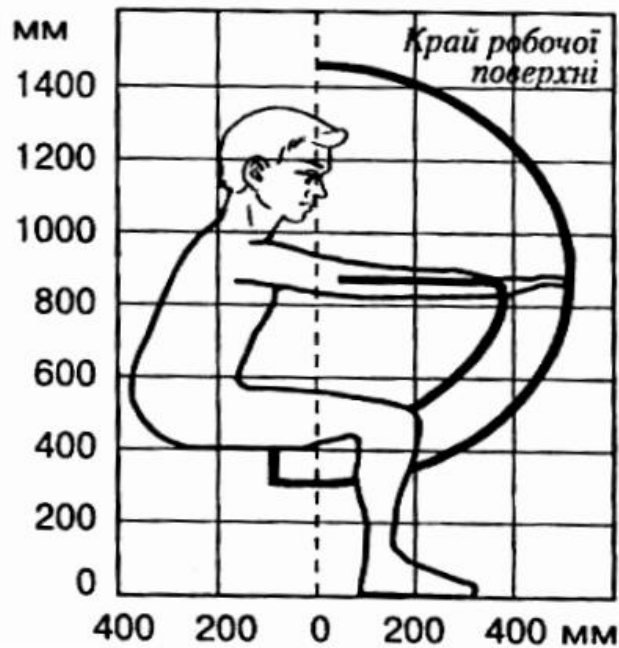


Рисунок 4.2 – Робоча зона працівника [40]

Організація робочих місць у лабораторії вакуумно-термічної обробки відповідає санітарним нормам і забезпечує комфортні умови для працівників.

4.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях

На виробництві завжди існує ризик виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, вибух, пошкодження обладнання, витік шкідливих речовин, тощо. Тому перед початком роботи на виробництві проводиться аналіз потенційно можливих надзвичайних ситуацій та розробляються плани їхньої ліквідації. Під час аналізу враховуються особливості обладнання та технологічних блоків, властивості речовин і матеріалів, які використовуються на виробництві та особливості виробничих процесів [41].

Найбільш імовірна надзвичайна ситуація, яка може статися в лабораторії вакуумно-термічної обробки – це пожежа.

4.6.1 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [42] лабораторія належить до категорії «Г», в лабораторії присутні негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному стані, при обробці яких виділяється теплота. Виникнення пожежі в лабораторії може відбутися лише на електроустановці. Пожежі, які виникають на електроустановках відносяться до класу «Е». При виникненні на працюючій установці пожежі, її необхідно гасити галоїдовуглеводним або вуглекислотним вогнегасником.

Для забезпечення пожежної безпеки у лабораторії є система пожежної сигналізації, а співробітників можна оповістити скориставшись внутрішнім зв'язком, всі небезпечні частини обладнання ізолювані, а горючі речовини знаходяться у герметичних ємностях.

У разі виникнення пожежі всі співробітники мають покинути приміщення шляхами, визначеними планом евакуації (рис. 4.3).

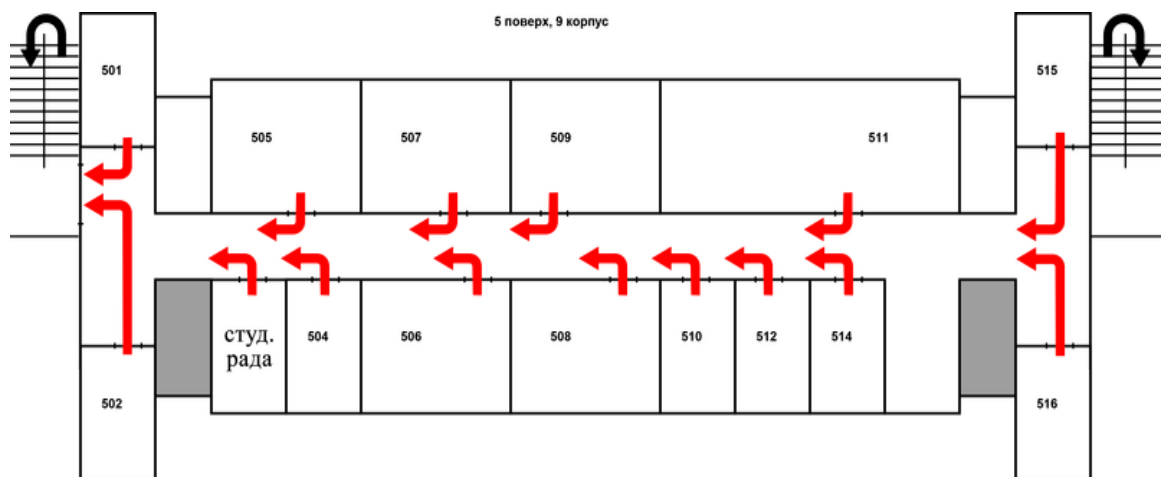


Рисунок 4.3 – План евакуації

Для попередження виникнення пожеж необхідно проводити регулярні перевірки засобів гасіння та перевірки обладнання, перевіряти справність

електричної проводки та системи пожежної сигналізації, а також проводити навчання для співробітників, як поводитися у надзвичайних ситуаціях.

4.6.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Якщо відбудеться пробій електричної напруги на корпус установки, необхідно відключити подачу струму за допомогою вимикача при вході в лабораторію та повідомити відповідального майстра. При ураженні працівника струмом слід викликати швидку та надати першу допомогу потерпілому.

При займанні установки необхідно відключити струм в лабораторії та почати ліквідацію пожежі за допомогою вуглекислотного вогнегасника або піску, викликати пожежників та повідомити відповідального за охорону праці на кафедрі. У випадку травмування співробітників слід звернутися до лікарні, за необхідності надати першу допомогу та викликати швидку.

4.7 Висновки до розділу 4

1. Проведено аналіз потенційних небезпек, які можуть виникнути під час роботи в лабораторії вакуумно-термічної обробки. Робота з установкою ВУП-5М потребує належної підготовки працівників та знань щодо уникнення можливих аварійних ситуацій та наслідків від них.

2. Визначено, що рівень природного освітлення не є достатнім для створення комфортних умов праці, тому додатково застосовано штучне освітлення.

3. Виявлено, що рівень шуму та вібрацій, мікроклімат та організація робочого місця при проведенні досліджень плівкових композицій на основі FePt відповідають санітарним нормам.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї проекту

В основі проекту лежить ідея створення нових плівкових матеріалів для магнітного запису інформації та для використання їх в якості матеріалів для приладів спінтроніки.

Товаром для даного стартап проекту є тонкоплівкові композиції FePt(15 нм)/Mn(10 нм)/FePt(15 нм) та FePt(15 нм)/Tb(10 нм)/FePt(15 нм), які були осаджені методом магнетронного розпорощення на кремнієві підкладки SiO₂(100 нм)/Si(001) та піддані відпалу у вакуумі (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд тонких плівок

Оскільки фазовий склад та властивості плівок досі вивчаються, оцінка ринкової спроможності продукту проведена не в повному обсязі. У перспективі використання даних плівок, як складових елементів носіїв для запису інформації може знизити їх собівартість, шляхом збільшення щільності магнітного запису (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка тонкоплівкових композицій для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю та приладів спінтроники	1. Інформаційно-комп'ютерні технології	Зменшення розмірів носіїв запису інформації. Збільшення об'єму інформації, яка зберігається.
	2. Технології магнітного запису	
	3. Прилади спінтроники	Збільшення стабільності та терміну зберігання.

В таблиці 5.2 представлено визначення сильних, слабких та нейтральних сторін проекту розробки нових тонкоплівкових матеріалів для магнітного запису інформації в порівнянні з основними конкурентами. В якості основних конкурентів обрано провідні компанії, які виготовляють носії запису та зберігання інформації: Seagate, Western Digital, Hitachi.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

№	Техніко- економічні характеристики ідеї	Наш проект	Seagate Technology	Western Digital	Hitachi
1	Собівартість плівкової композиції	дешевший	дорожчий	дорожчий	дорожчий
		S	W	W	W
2	Вартість обслуговування установки для осадження	Висока	Висока	Висока	Висока
		N	N	N	W

Продовження таблиці 5.2

№	Техніко- економічні характеристики ідеї	Наш проект	Seagate Technology	Western Digital	Hitachi
3	Витратні матеріали під час осадження	Необхідні	Необхідні	Необхідні	Необхідні
		N	N	N	N
4	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N
5	Екологічність (обсяг відходів)	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали
		W	W	W	W

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

5.2 Розрахунок витрат на проведення досліджень

Собівартість проведення досліджень для розробки і вивчення властивостей тонкоплівкових композицій визначається за наступними видатковими статтями:

- витрати на оплату праці,
- відрахування на соціальні заходи,
- витрати на матеріали для проведення досліджень,
- інші прями невраховані витрати,
- накладні витрати.

5.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати на оплату праці залежать від трудомісткості окремих робіт та посадових окладів робітників, задіяних для виконання досліджень.

Під час виконання науково-дослідної роботи було залучено три працівника: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник та інженер дослідник. У КПІ ім. Ігоря Сікорського посадові оклади заробітної плати, з розрахунку на один робочий день, становлять:

- провідного наукового співробітника – 455 грн,
- старшого наукового співробітника – 255 грн,
- інженера-дослідника – 195 грн.

Врахувавши трудомісткість кожного учасника та його заробітну плату, отримуємо фонд заробітної плати для даних досліджень. Фонд заробітної плати (ФЗП) даної науково-дослідної роботи складає 17 235 грн.

5.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску

Згідно законодавству України єдиний соціальний внесок (ЄСВ) складає 22 % від фонду заробітної плати:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \cdot 0,22 = 17\,235 \cdot 0,22 = 3791,7 \text{ грн.}$$

5.2.3 Витрати на матеріали для досліджень

Для проведення досліджень було використано три типи тонкоплівкових зразків: FePt, FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt. Кількість зразків кожного типу – 10 шт. Повна сума витрачених коштів на матеріали та транспортно-заготівельні витрати складає 3574 грн.

5.2.4 Розрахунок інших прямих неврахованих витрат

Інші прямі невраховані витрати складають 10 % від врахованих, а саме – 2460 грн.

5.2.5 Визначення накладних витрат

У КПІ ім. Ігоря Сікорського норматив відрахувань на накладні витрати складає 16 % від планової суми прямих витрат. Для даної наукової роботи це – 4329,7 грн.

5.2.6 Визначення кошторису науково-дослідної роботи

Детальний розрахунок вартості науково-дослідної роботи представлено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Планова кошторисна вартість НДР

Назва витратної статті	Сума, грн	Відсоток від загальної суми, %
Оплата праці	17 235	54
Соціальні заходи	3791,7	12
Матеріали досліджень	3574	11
Інші прямі невраховані витрати	2460	10
Накладні витрати	4329,7	13
Всього	31 390,4	100

Загальні витрати на науково-дослідну роботу складають 31 390,4 грн.

5.3 Технологічний аудит ідеї проекту

При розробці нової ідеї та втіленні її у промисловості необхідно проаналізувати існуючі технології для реалізації та доступність цих технологій (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Аналіз технологій для реалізації проекту

Технологія	Наявність технології	Доступність технології
Магнетронне осадження плівок	Технологія існує	Доступна
Відпал у вакуумі	Технологія існує	Доступна
Визначення фазового складу зразків	Технологія існує	Доступна
Перпендикулярний магнітний запис інформації	Технологія існує	Доступна

За результатами аналізу технологій можна зробити висновок, що для реалізації проекту доступні всі необхідні технології. Проте, об'єкт дослідження – це тільки частина носія для запису інформації, тому необхідно провести додаткові дослідження, а саме спробувати записати інформацію на прототип, виготовлений на основі плівкових композицій FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt.

5.4 Ринкові можливості запуску проекту

Для планування напрямків розвитку проекту необхідно враховувати ринкове середовище, визначити ринкові можливості та загрози реалізації проекту. Сьогодні основні гравці на ринку носіїв запису інформації це Seagate, Western Digital та Hitachi. Проте за даними аналітичної компанії Trendfocus попит на жорсткі диски значно зменшився, вони поступаються місцем SSD-дискам.

Нові матеріали для запису інформації можна буде застосувати як в жорстких дисках для збільшення щільності запису інформації, так і в SSD-дисках.

Оцінка потенційного ринкового середовища та інформація про основних гравців представлена в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Оцінка потенційного ринкового середовища

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1)Seagate Technology, 2)Western Digital, 3) Hitachi
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2019 рік	310 млн. од. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В 2020 році випуск комп'ютерних жорстких дисків впаде до 260 млн/штук.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485

Характеристика та аналіз потенційних клієнтів наведено у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Характеристика потенційних клієнтів

Характеристика	Опис
Потреби, що формують ринок	Стабільність та довговічність зберігання даних Збільшення щільності запису інформації
Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Юридичні особи (компанії), які виготовляють жорсткі диски: Western digital technologies inc; Seagate; Hitachi; Toshiba; Silicon Power; Adata; Sony Computer, HP; Transcend; Samsung.
Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Стандарти, технічні характеристики, специфікації, обсяги закупок, умови експлуатації
Вимоги споживачів до товару	Розміри продукту, ємність зберігання даних, вартість, термін експлуатації, ліцензія

Окрім оцінки ринкового середовища та потенційних клієнтів, слід також враховувати фактори загроз та нових можливостей (табл. 5.7-5.8). При аналізі цих факторів одразу визначають реакцію компанії в потенційно можливій ситуації.

Таблиця 5.7 – Фактори можливих загроз проекту

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільна ситуація на ринку (політичні або економічні кризи)	Зменшення попиту та втрата фінансування	Вдосконалення технології для зменшення собівартості, колаборація з компаніями-партнерами
		Зменшення ресурсів для роботи виробництва	Перехід на альтернативні види енергії

Таблиця 5.8 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів та оптимізація технології виготовлення	Збільшення обсягів виробництва
2	Зменшення розміру	Можливість виготовлення приладів нового покоління, збільшення продуктивності вже існуючих моделей	Збільшення обсягів продажу
3	Збільшення щільності запису інформації		

Комплексний аналіз (SWOT-аналіз) сильних та слабких сторін, можливостей та потенційних загроз проекту представлено у таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 SWOT-аналіз проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - висока щільність запису інформації, - зменшення розміру носіїв для запису інформації, - збільшення терміну зберігання інформації, - збільшення термічної стабільності носія інформації. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - проведення додаткових досліджень для створення прототипу, - необхідність корекції технології для різних моделей обладнання.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - участь у наукових проектах, - співпраця з компаніями, які займаються виготовленням носіїв інформації. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - стартовий капітал для початку виробництва, - складність реалізації технології в промислових масштабах.

Дослідження плівкових композицій FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt досі тривають, тому створення маркетингової моделі товару та аналіз ринкової спроможності продукту поки що неможливий. Науково-дослідна робота мала на меті виявити температурні інтервали існування фаз в тонких плівках.

Сьогодні тонкі плівки на основі FePt з проміжними шарами Tb та Mn використовуються лише у дослідницьких цілях, але вони є перспективними матеріалами для використання в носіях запису інформації.

5.10 Висновки до розділу 5

1. Проведено технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринку, потенційних клієнтів та визначено можливості і загрози проекту.

2. Тонкоплівкові композиції FePt/Tb/FePt та FePt/Mn/FePt є перспективними для використання в якості середовища магнітного запису. Їх використання обумовлює такі переваги: збільшення терміну експлуатації, стабільність зберігання інформації, збільшення ємності носіїв інформації.

ВИСНОВКИ

1. Тонкоплівкові композиції на основі FePt є найбільш перспективним матеріалом для використання в якості елементів носіїв інформації та пристроїв спінтроники завдяки високим значенням енергії магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили, які притаманні впорядкованій фазі $L1_0$ -FePt.

2. Вивчено закономірності впливу введення додаткових шарів Mn та Tb, а також фізико-технологічних параметрів термічної обробки у вакуумі на формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt: в плівковому матеріалі FePt без додаткового проміжного шару та в плівковій композиції з додатковим шаром Mn початок термічно-індукованого процесу впорядкування зафіксовано за температури відпалу 550 °C; введення шару Tb приводить до утворення інтерметалідної фази Pt_2Tb ; прикладання зовнішнього магнітного поля в процесі термічної обробки сприяє перебігу процесу впорядкування кристалічної будови плівкового матеріалу.

3. Проведено аналіз мікроклімату, освітлення, рівня шуму та вібрацій, проаналізовано також організацію робочого місця. Лабораторія вакуумно-термічної обробки відповідає санітарним нормам. Запропоновано ряд заходів для покращення умов праці та збільшення продуктивності.

4. Розроблено стартап-проект за темою науково-дослідної роботи. Даний проект є перспективним для світового ринку засобів запису та зберігання інформації. Нові матеріали дадуть змогу зменшити розмір носіїв інформації, збільшити швидкість запису та обробки інформації.

CONCLUSIONS

1. FePt-based thin film compositions are the most promising material for use as media elements and spintronics devices due to the high values of magnetocrystalline anisotropy energy and coercive force that are inherent in the ordered $L1_0$ -FePt phase.

2. The regularities of the influence of the introduction of additional Mn and Tb layers, as well as the physical and technological parameters of thermal treatment in vacuum on the formation of the ordered $L1_0$ -FePt phase have been studied. In the FePt film material without an additional intermediate layer and in the film composition with an additional Mn layer, the beginning of the thermally-induced ordering process was recorded at an annealing temperature of 550 °C. The introduction of the Tb layer leads to the formation of the intermetallic phase of Pt₂Tb. The application of an external magnetic field in the heat treatment process facilitates the process of streamlining the crystal structure of the film material.

3. The microclimate, lighting, noise and vibration levels were analyzed and the workplace organization was also analyzed. The laboratory of vacuum-heat treatment meets the sanitary standards. Measures to avoid injury in the research process were proposed.

4. A startup project on the topic of research has been developed. This project is promising for the global market for recording and storage of information. New materials will help reduce the size of storage media, increase the speed of recording and processing information.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карпенков С.Х. Технические средства информационных технологий: учебное пособие / С.Х. Карпенков. – 3-е изд., испр. и доп. – М.–Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 376 с.
2. Wang J. Structural and magnetic properties of $L1_0$ -FePt/Fe exchange coupled nano-composite thin films with high energy product / J. Wang – J. Magn. Mater., vol. 345, pp. 165–170, Nov. 2013.
3. Review article: FePt hear assisted magnetic recording media / D. Weller, G. Parker, O. Mosendz et al. // J. Vac. Sci. Technol. B 34 (2016) 060801.
4. Hsiao S.N. FePt thinfilms: fundamentals and applications / S.N. Hsiao – Reference Module in Materials Science and Materials Engineering – Elsevier, Amsterdam Netherlands, 2016.
5. Elimination of impurity phase formation in FePt magnetic thin films prepared by pulsed laser deposition / Y. Wang, R. Medwal, N. Sehdev, et al. // Appl. Surf. Sci., 2014. – V. 288. – P. 381 – 391.
6. Promotion of [001]-oriented $L1_0$ -FePt by rapid thermal annealing with light absorption layer / L.W. Wang, W.C. Shih, Y.C. Wu, C.-H. Lai // Appl. Phys. Lett., 2012. – V. 101. – 252403 p.
7. Interplay between structural and magnetic properties of $L1_0$ -FePt(001) thin films directly grown on MgO(001) / B. Laenens, F. M. Almeida, N. Planckaert, et al. // J. Appl. Phys., 2009. – V. 105. – P. 073 913 – 073 919.
8. Magnetic anisotropy and order structure of $L1_0$ -FePt (001) single-crystal films grown epitaxially on (001) planes of MgO, SrTiO₃, and MgAl₂O₄ substrates / A. Hotta, T. Ono, M. Hatayama, et al. // J. Appl. Phys., 2014. – V. 115. – 712 p.
9. High coercivity $L1_0$ -FePt films with perpendicular anisotropy deposited on glass substrate at reduced temperature / J.S. Chen, B.C. Lim, J.F. Hu, et al. // Appl. Phys. Lett., 2007. – V. 90. –42 508 p.

10. Granz S.D. Granular $L1_0$ -FePt (001) thin films for heat assisted magnetic recording / S.D. Granz, M.H. Kryder // J. Magn. Mater., 2012. – V. 324. – P. 287.
11. Quantitative Kinetic Models of the A1 to $L1_0$ Transformation in FePt and Related Ternary Alloy Films /K. Barmak, B. Wang, A. Jesanis, et al. // IEEE Trans. Magn., 2013 – 49, No. 7: 3284 (2013).
12. Wang B. Tuning magnetic anisotropy in (001) oriented $L1_0$ ($Fe_{1-x}Cu_x$) $_{55}Pt_{45}$ films / B. Wang and K. Barmak // J. Appl. Phys., – 109, No. 12: 123916 (2011).
13. Wang B The impact of deposition temperature on $L1_0$ formation in FePt films / B. Wang and K. Barmak // J. Appl. Phys.– 111, No. 7: 07b718 (2012).
14. Effect of Pt and FePt Layer Thickness on Microstructure and Magnetic Properties of $L1_0$ FePt Films With Perpendicular Anisotropy / Jee-Hwan Bae, Tae Kyoung Kim, Hyeon Min Kim, et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. – №99. – C. 1–6.
15. Influence of pressure on (0 0 1)-preferred orientation and in-plane residual stress in rapidly annealed FePt thin films / S.N. Hsiao, C.L. Chou, S.H. Liu, et al.// – Applied Surface Science 509 (2020)
16. The Effect of Heat Treatment to FePt/ Fe_2O_3 and FePt/Cu / N.Seetala, D. Henderson, L. Chou et al.// Materials Processing Fundamentals – 2019 – pp 241-250.
17. Enhancement in ordering of FePt films by magnetic field annealing / H.Y. Wang, X.K. Ma, L. Lu, et al. // Appl. Phys. Lett.– 85: 2304 (2004).
18. Advanced Nanomaterials for Electrochemical-Based Energy Conversion and storage / M. Liu, M. Lu, L. Wang, et.al. // Supercond. Nov. Magn., 28, No. 8: 2491 (2015).
19. Salahpour M. The Growth and Annealing of FePt Nanoparticles in the Presence of Magnetic Field / M. Salahpour, S. A. Sebt, A. Khajehnezhad. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2019

20. Sheikhi M. Comparing the structural and magnetic properties of FePt/MgO/Si and FePt/Ag/Si granular nanolayers / M. Sheikhi, A. Khajehnezhad, S. A. Sebt. // *Journal of Theoretical and Applied Physics*. – 2019. – №13. – С. 101–106.

21. Hamouda H. Enhanced Magnetization at the Interface in Fe₈₃Tb₁₇/Pt Multilayers / H. Hamouda, R. Moubah, R. Abid. // Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature. – 2019.

22. Low temperature ordering and high (001) orientation of [Fe/Pt/Cu] 18 multilayer films / Y. Yu, X.Z. Li, U. Yu et al. // *Thin Solid Films*, 531: 460 (2013).

23. Fabrication of highly L10-ordered FePt thin films by low-temperature rapid thermal annealing / Y.S. Yu, W.D. Fei, X.Z. Li, et al. // *J. Magn. Magn. Mater.*, 320 – No. 19 – 125 (2008).

24. Amorphous Ni–Al underlayer-accelerated L10 ordering transition of FePt thin films / X. Li, F. Wang, Y. Yu, et al. // *Appl. Surf. Sci.*, 256, No. 12: 3822 (2010).

25. Transparent megahertz circuits from solution-processed composite thin films / M. Liu, T. Jin, L. Hao, et.al. // *Nanoscale Res. Lett.*, 10: 161 (2015).

26. Magnetic and structural properties of RTA processed L10 FePt-Mn thin films / N. Y. Safonova, M. Riepp, O. Klein, and M. Albrecht // 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 903 012023

27. Ивановский Г.Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров // . – М.: Радио и связь, 1986.

28. Вдовичев С.Н. Современные методы высоковакуумного напыления и плазменной обработки тонкопленочных металлических структур / С.Н. Вдовичев// Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 60 с.

29. Боуэн Д. К. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д. К. Боуэн, Б. К. Таннер // Перевод с англ. И. Л. Шульпиной и Т. С. Аргуновой. — СПб.: Наука, 2002. — 274 с., 147 ил.

30. Herbert C.G. Mass spectrometry basics / C.G. Herbert // R.A.W. Johnstone – CRC Press, 2003. – 474 p. – ISBN 0-84931-354-6.

31. ДСанПіН 3.3.2.007-98 – Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин.

32. 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.

33. ДСН 3.3.6.042-99. – Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

34. ДБН В.2.5-28 2006 – Інженерне обладнання будинків і споруд // Природне і штучне освітлення, затверджені наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від. – 2006. – Т. 15.

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

36. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

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

38. НРБУ-97 – Норми радіаційної безпеки України. Розробник: Міністерство охорони здоров'я України, Комітет з питань гігієнічного регламентування, Національна комісія з радіаційного захисту населення України. Затверджено: Міністерство охорони здоров'я України, наказ від 14.07.1997 р. № 208. Введені в дію Постановою Головного державного санітарного лікаря України Першого заступника міністра охорони здоров'я

України від 01.12.1997 р. № 62 з доповненням: ДГН 6.6.1- 6.5.061-2000
Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000).

39. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки
України ДСП 6.177-2005-09-02 – [Чинний від 2005-02-02].

40. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації
ЕОМ.

41. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації
аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.

42. НАПБ Б.03.002-2007 – Норми визначення категорій приміщень,
будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною
небезпекою.