

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра фізики металів**

До захисту допущено:
в.о. завідувача кафедри
Світлана ВОЛОШКО _____
«__» _____ 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Металофізичні процеси та їх
комп'ютерне моделювання»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt у
плівкових композиціях Pt/Ag/Fe та Fe/Ag/Pt на підкладці $SiO_2/Si(001)$ »**

Виконав:

студент IV курсу, групи ФМ-71-1

Новік Андрій Олександрович _____

Керівник:

проф., д. т. н. Макогон Юрій Миколайович _____

Консультант з питань нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н. А. _____

Консультант з економічно-організаційної частини:

к. е. н., доцент Нараєвський С. В. _____

Консультант з охорони праці:

д. т. н., професор Левченко О. Г. _____

Рецензент:

д. т. н., професор Михаленков К.В. _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. завідувача кафедри

Світлана ВОЛОШКО

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Новіку Андрію Олександровичу

1. Тема роботи «Формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях Pt/Ag/Fe та Fe/Ag/Pt на підкладці $SiO_2/Si(001)$ », керівник роботи проф., д.т.н. Макогон Юрій Миколайович, затверджені наказом по університету від «27» травня 2021р. № 1355-с

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: літературні дані, результати особистих експериментів

4. Зміст роботи: дослідити процеси формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt у плівкових композиціях Pt/Ag/Fe та Fe/Ag/Pt на підкладці $SiO_2/Si(001)$

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): дифрактограми, графіки пошарового хімічного складу плівок

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С. В. доцент		
Охорона праці	Левченко О. Г., професор		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання	12.04.2021	
2	Проведення та написання літературного огляду	19.04.2021	
3	Освоєння методик досліджень	26.04.2021	
4	Виконання експериментальних досліджень	05.05.2021	
5	Отримання результатів	28.05.2021	
6	Написання висновків	03.06.2021	
7	Оформлення роботи	08.06.2021	
8	Оформлення презентації та написання доповіді	09.06.2021	
9	Попередній захист	10.06.2021	
10	Захист на засіданні ЕК	15.06.2021	

Студент

Андрій НОВІК

Керівник

Юрій МАКОГОН

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 76 с., 37 рис., 5 табл., 38 джерела

ВІДПАЛ У ВАКУУМІ; ВПОРЯДКОВАНА ФАЗА; КОНЦЕНТРАЦІЙНИЙ РОЗПОДІЛ; ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ

Метою роботи є дослідження формування структури і фазового складу нанорозмірних плівкових композицій Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe при термічній обробці у вакуумі.

Об'єкт дослідження: дифузійно індуковані процеси фазоутворення у нанорозмірних плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) після осадження та термічної обробки у вакуумі.

Предмет дослідження: структура, фазовий склад концентраційний розподіл у нанорозмірних плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) після осадження та термічної обробки у вакуумі

Методи дослідження: рентгеноструктурний фазовий аналіз, масспектрометрія вторинних нейтральних частинок (MCBH), SQUID-магнітометрія

Результати досліджень та їх новизна: отримані нові знання про закономірності фазоутворення під час термічної обробки у вакуумі в плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм).

ABSTRACT

Diplom work: 76 pages, 37 figures, 5 tables, 38 sources

CONCENTRATION DISTRIBUTION; ORDERED PHASE; PHASE TRANSFORMATIONS; VACUUM ANNEALING

The aim of the work is to study the formation of the structure and phase composition of nanosized Fe/Ag/Pt and Pt/Ag/Fe film compositions during heat treatment in vacuum.

Object of study: diffusion-induced phase formation processes in nanosized Fe(15 nm)/Ag(10 nm)/Pt(15 nm) and Pt(15 nm)/Ag(10 nm)/Fe(15 nm) film compositions after deposition and heat treatment in vacuum.

Subject of research: structure, phase composition, concentration distribution in nanosized Fe(15 nm)/Ag(10 nm)/Pt(15 nm) and Pt(15 nm)/Ag(10 nm)/Fe(15 nm) film compositions on SiO₂ (100 nm)/Si (001) substrates after deposition and heat treatment in vacuum

Research methods: X-ray diffraction phase analysis, mass spectrometry of secondary neutral particles (SNMS), SQUID magnetometry

Research results and their novelty: new knowledge about the regularity of phase formation during heat treatment in vacuum in Fe(15 nm)/Ag(10 nm)/Pt(15 nm) and Pt(15 nm)/Ag(10 nm)/Fe(15 nm) film compositions were received.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Магнітний запис інформації	12
1.1.1 Перпендикулярний магнітний запис.....	13
1.1.2 Термічно активований магнітний запис	14
1.2 Особливості структури та властивостей тонкоплівкових композицій....	15
1.3 Фазові перетворення у системах Fe-Pt, Fe-Ag та Pt-Ag.....	16
1.4 Перспективи FePt як матеріалу для надщільного магнітного запису.....	19
1.5 Процеси впорядкування у плівках FePt.....	20
1.6 Вплив напруженого стану на формування фази $L1_0$ FePt.....	23
1.7 Висновки до розділу 1	25
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	28
2.1 Матеріали	28
2.2 Термічна обробка зразків	28
2.3 Методика дослідження	28
2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	28
2.3.2 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток	30
2.3.3 SQUID магнітометрія	32
2.5 Висновки до розділу 2	33
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	34
3.1 Процеси фазоутворення у композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) при відпадах у вакуумі	34
3.1.1 Фазоутворення у композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/ Pt(15 нм).....	34
3.1.2 Перерозподіли хімічних елементів за товщиною плівкових композицій	40
3.2 Процеси фазоутворення у композиції Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)....	42
3.2.1 Фазоутворення у композиції Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм).....	42

3.2.2 Перерозподіли хімічних елементів за товщиною плівкових композицій	46
3.3 Зміна магнітних властивостей у плівках Fe(15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)	47
3.4 Висновки до розділу 3.....	51
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	52
4.1 Науково-технічна актуальність дипломної роботи (ДР)	53
4.2 Мета і завдання дипломної роботи	53
4.3 Розрахунок планових витрат на проведення дипломної роботи.....	54
4.3.1 Витрати на оплату праці	56
4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску	56
4.3.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень	56
4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання	57
4.3.5 Вартість послуг сторонніх організацій	57
4.3.6 Витрати на службові відрядження	57
4.3.7 Інші прямі невраховані витрати по темі	57
4.3.8 Накладні витрати	57
4.3.9 Визначення планової коштовної вартості теми	58
4.4 Науково-технічна ефективність	59
4.5 Висновки до розділу 4	62
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	63
5.1 Вступ	63
5.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення.....	63
5.2.2 Засоби індивідуального захисту при виконанні дипломної роботи	65
5.2.2.1 Засоби індивідуального захисту при роботі з рентгенівським випромінюванням.....	65
5.2.2.2 Засоби індивідуального захисту при роботі в умовах шуму та вібрації.....	67
5.2.3 Електробезпека	67

5.2.4 Пожежна безпека	68
5.3 Висновок до розділу 5	69
ВИСНОВКИ	70
CONCLUSION.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	72

ВСТУП

Технологія термічно активованого магнітного запису (Heat Assisted Magnetic Recording) – гібридна технологія запису інформації, що комбінує магнітне читання і магнітооптичний запис. Для магнітного запису актуально створювати шари з відмінною магнітною твердістю. Посередні шари необхідні для проектування носіїв запису, адже вони індукують ріст текстури в шарі запису та змінюють магнітну взаємодію поміж зернами.

У роботі було досліджено дифузійне формування впорядкованої фази $L1_0$, FePt у тришарових плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag/Fe(15 нм). Вивчено, як впливає верхній шар (Fe або Pt) та прошарок Ag товщиною 10 нм на термічно активовані процеси упорядкування. Плівки одержано магнетронним напиленням на підкладку SiO_2 (100 нм)/Si (001) та відпалено у вакуумі $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па в інтервалі температур 400 °C – 900 °C тривалістю 30 с. Додатково був проведений ізотермічний відпал за температури 700 °C протягом 2 хв, 5 хв, 15 хв і 30 хв.

Фазовий склад та структура осаджених і відпалених плівок визначався за допомогою метода рентгеноструктурного аналізу. Хімічний склад по товщині плівок досліджувався методом маспектрометрії вторинних нейтралей. Показано, що в тришаровій композиції Fe/Ag/Pt при відпалі у вакуумі при температурі 700 °C протягом 30 с утворюються неупорядкована фаза A1 і впорядкована фаза $L1_0$. Збільшення температури відпалу до 900 °C та тривалості відпалу за 700 °C до 30 хв призводить до формування практично гомогенного сплаву FePt еквіатомного складу і збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$.

Метою роботи є дослідження формування структури і фазового складу нанорозмірних плівкових композицій Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe при термічній обробці у вакуумі.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Магнітний запис інформації

У магнітних носіях інформації цифровий запис проводиться на магніточутливий матеріал. До таких матеріалів відносяться нікель, кобальт, сплави, деякі різновиди оксидів заліза, магнітопласти, магнітоеластичні, мікропорошкові магнітні матеріали [1].

Зазвичай магнітне покриття має товщину в кілька мікрометрів. Для отримання магнітних стрічок і гнучких дисків магнітне покриття наносять на немагнітну основу, а для отримання жорстких дисків використовують алюмінієві сплави та композиційні матеріали підкладки. Магнітне покриття диска має безліч намагнічених зерен, тобто доменну структуру.

Магнітний домен – просторова область, в якій магнітні моменти окремих частинок орієнтовані однаково і досягається максимальне намагнічування. Суміжні магнітні домени відділені один від одного доменними стінками. Розміри доменів можуть досягати 100 мкм.

В зовнішньому магнітному полі відбувається як переорієнтація магнітних моментів окремих доменів, так і зміна розмірів цих доменів за рахунок руху доменних стінок. Це призводить до намагнічування зразка, яке зберігається при зменшенні зовнішнього магнітного поля до нуля [2].

На рисунку 1.1 наведена схема запису і зчитування з магнітного диску. Двійкова одиниця – це зміна напрямку електрорушійної сили за певний проміжок часу, а нуль – відсутність зміни.

Поверхня магнітного носія розглядається як послідовність точкових позицій, при цьому кожна така послідовна позиція асоціюється з бітом інформації. Для запису заздалегідь наносяться мітки, які допомагають знаходити позиції запису, тому, що розташування позицій визначається неточно. Для нанесення цих міток робиться роздрібнення диска на доріжки, що називається форматкуванням [3].

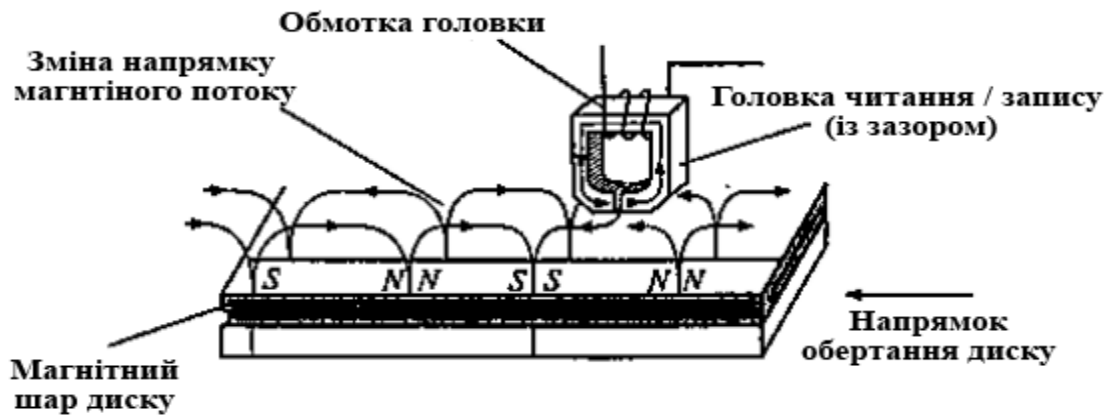


Рисунок 1.1 – Запис та зчитування даних з магнітного диску [1]

Завдяки надання диску швидкого обертання та переміщенню магнітної голівки по радіусу диска можна отримати швидкий доступ до будь-якої частини його поверхні.

1.1.1 Перпендикулярний магнітний запис

Довгоочікуваною технологією запису є спосіб перпендикулярного магнітного запису на жорстких дисках, який використовується для стаціонарних комп'ютерів та ноутбуків [4].

Технологія перпендикулярного запису формується шляхом розташування магнітних частинок під кутом 90° до площини магнітного диску. Це сприяє тому, що домени, які зберігають різні значення, не відштовхуються один від одного, що свідчить про те, що намагнічені частинки повернуті один до одного різними полюсами. Також збільшення щільності більше не вимагає зменшення товщини шару. Це забезпечує стабільність магнітного матеріалу.

При перпендикулярному записі використовується набагато складніша структура магнітного носія. Записуючий шар, який складається із окисненого шару хрому, платини і кобальту, знаходиться прямо під тонким захисним шаром. Підкладка містить 2 антиферомагнітні шари, які знімають внутрішні напруження магнітного поля [5].

На рисунку 1.2 представлено типову схему технології перпендикулярного магнітного запису. При перпендикулярному записі використовується поле, яке генерується між магнітним підшаром та між зрізом полюса головки запису. Завдяки цьому частинки, які входять до складу магнітного шару, намагнічуються вертикально, а магнітного підшару – горизонтально.

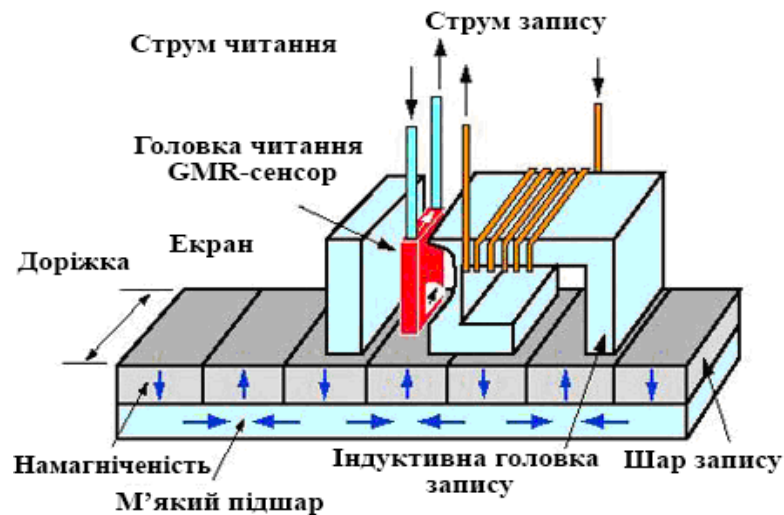


Рисунок 1.2 – Схема технології перпендикулярного магнітного запису [5]

1.1.2 Термічно активований магнітний запис

З рисунку 1.3 можна побачити різницю між перпендикулярним записом та термічно активованим записом, яка полягає в тому, що перед термічно активованим магнітним записом домени піддаються термічній обробці.

За допомогою дуже точного нагрівання доменів можна забезпечити високу щільність зберігання даних [6]. Енергію термічного бар'єру можна розрахувати за формулою:

$$E_B = K_u V \left(1 - \frac{4\pi M_s}{H_k}\right)^2, \quad (1.1)$$

де E_B – енергія термічного бар'єру, Дж;

K_u – енергія магнітокристалічної анізотропії, Дж/см³;

V – об'єм, см³ ;

M_s – намагніченість насичення, А/м;

H_k – коерцитивна сила, Е .

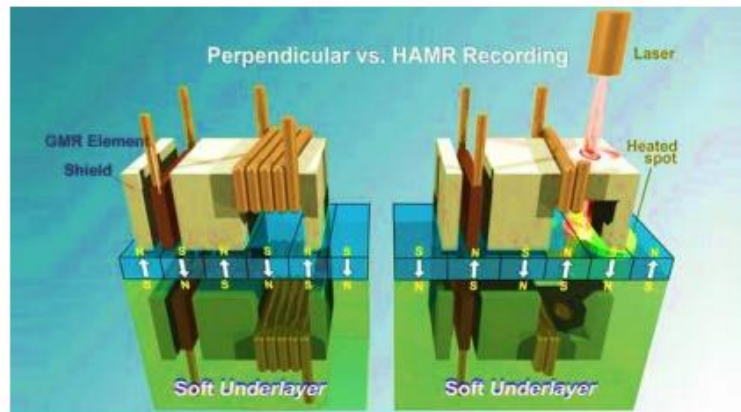


Рисунок 1.3 – Різниця між термічно активованим магнітним записом та перпендикулярним записом [4]

Технологія, за оцінками експертів, дозволяє збільшити щільність запису в 10 разів порівняно з використанням перпендикулярного методу. Також прогнозується, що термічно активований магнітний запис забезпечить швидке зростання щільності запису.

1.2 Особливості структури та властивостей тонкоплівкових композицій

Прийнято вважати, що тонкою магнітною плівкою називається шар магнітного матеріалу товщиною від кількох до 10^4 Å. До сьогодні ці зразки являються об'єктом інтенсивних досліджень в багатьох країнах, описанню їх кристалічної структури та властивостей присвячуються багаточисленні статті, обзори, монографії [7]. Дослідження плівок дозволяє отримувати нову та цінну інформацію про магнітні властивості феромагнетиків. Наприклад, вивчення тонких плівок істотно розширило уявлення про фізичну природу анізотропії феромагнетиків, дозволило виявити та дослідити різноманітні процеси перемагнічування, нові фізичні явища. Одне з таких явищ – гігантський

магнітоопір, який привернув особливо велику увагу та в останні декілька років став предметом всебічного дослідження. Також дуже важливо, що плівках можна реалізувати структурні стани, які важко або неможливо отримати в звичайних (масивних або об'ємних) магнітних зразках. Вивчення фізичних властивостей тонких феромагнітних плівок також актуальне з точки зору їх практичного застосування в мікроелектроніці та обчислювальній техніці. Найважливішим застосуванням плівок являється їх використання в якості магнітного середовища для запису та зберігання інформації в запам'ятовуючих пристроях [7]. Магнітні плівки володіють особливими властивостями, завдяки яким їх використання сприяє підвищенню щільності запису інформації та швидкодії запам'ятовуючих пристроїв.

Запам'ятовуючі пристрої повинні забезпечувати надійне та тривале зберігання інформації, малий час доступу, низьку вартість зберігання одиниці інформації, високу щільність та швидкість запису. Для того, щоб відповідати цим вимогам, плівки повинні володіти певним набором структурних та магнітних характеристик. Отримати такі плівки можна тільки знаючи механізми формування структури та її властивостей. Тому й до сьогодні не послаблюється інтерес до досліджень в цій області [8].

1.3 Фазові перетворення у системах Fe-Pt, Fe-Ag та Pt-Ag

Між γ -Fe і Pt існує широка область твердих розчинів (рис. 1.4).

Діаграма стану системи FePt має відкриту область γ -фази, на якій виділяється три зони впорядкованих розчинів: $\text{Fe}_3\text{Pt}(\gamma_1)$, $\text{FePt}(\gamma_2)$, $\text{FePt}_3(\gamma_3)$. Границя фази Fe_3Pt встановлена за даними дилатометричних, рентгенівських і магнітних досліджень. Область гомогенності Fe_3Pt (19-33) ат.% Pt, що свідчить про стабільну область в інтервалі температур 600 °C – 740 °C [9]. Припускається, що між (α -Fe) і Fe_3Pt відбувається евтектоїдна реакція при температурі ~ 550 °C і вмісті 15 ат.% Pt [9].

Упорядкування при 50 ат.% Pt, яке було вперше виявлене термічним і мікроскопічним аналізом, підтверджено потім вимірюванням твердості, рентгенівським, магнітними, резистометричним, ділатометричними методами дослідженнями. Крива точки Кюрі феромагнітного впорядкованої фази FePt має максимум біля 50 ат.% і 480 °С.

Перетворення $(\gamma\text{-Fe, Pt}) \leftrightarrow (\text{FePt}_3)$ відбувається за температури 1350 °С. Діаграма стану FePt в області існування проміжних фаз FePt і FePt₃ має евтектоїдний характер [10].

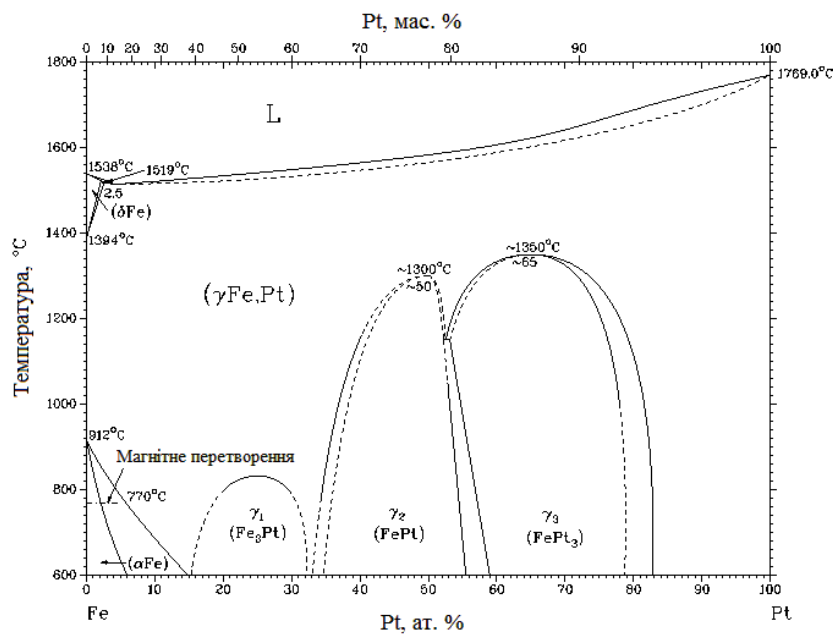


Рисунок 1.4 — Діаграма фазового стану Fe-Pt [10]

На рисунку 1.5 наведено фазові діаграми розчинності систем Ag-Fe. З діаграми фазового стану бачимо що срібло не розчиняється в залізі.

В той же час воно має необмежену розчинність в платині в інтервалі температур, який досліджувався в дипломній роботі.

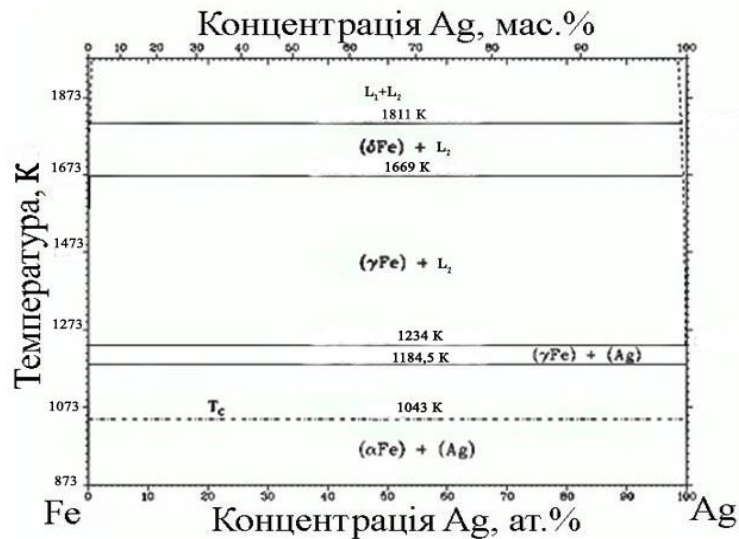


Рисунок 1.5 – Фазова діаграма системи Ag-Fe [11]

В системі Pt-Ag формується велика кількість інтерметалідних сполук (рис. 1.6).

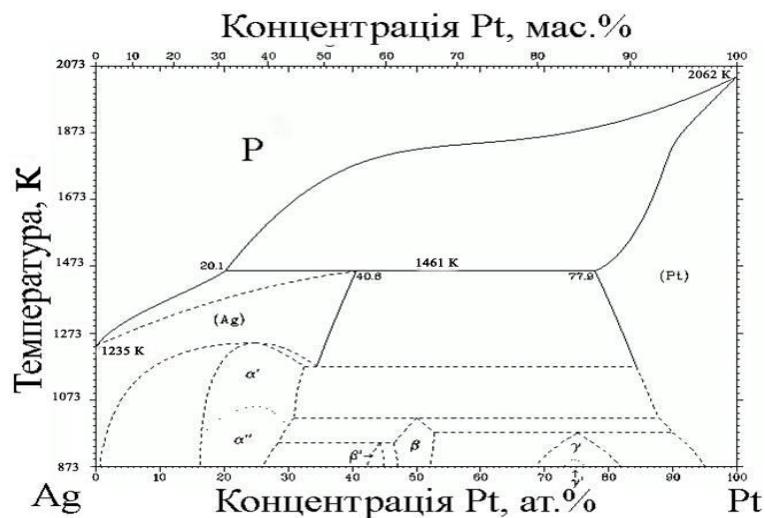


Рисунок 1.6 – Фазова діаграма системи Ag-Pt [12]

Срібло також не розчиняється у кристалічній решітці фази $L1_0$ -FePt і має порівняно невелике значення поверхневої енергії (Ag – 1,12 Дж/м², Pt – 2,35 Дж/м², Fe – 2,66 Дж/м² [13]). Всі ці чинники можуть забезпечити дифузію Ag по границях зерен у напрямку вільної поверхні плівкових композицій при термічній обробці. Зерногранична дифузія Ag може сприяти збільшенню коерцитивної сили плівкових композицій через зменшення магнітної взаємодії

між зернами фази $L1_0$ -FePt (магнітну ізоляцію зерен), а напруження, що виникають на границі поділу між шарами – прискоренню дифузійних процесів.

1.4 Перспективи FePt як матеріалу для надщільного магнітного запису

Феромагнітні сплави з впорядкованою $L1_0$ фазою, такі як CoPt, FePt, FePd та MnAl, є перспективними матеріалами в якості середовища магнітного запису, в таблиці 1.1 представлені головні параметри їх магнітних властивостей. Тетрагональна впорядкована $L1_0$ [14] структура цих сплавів проявляє магнітнотверді властивості, а енергія магнітокристалічної анізотропії K_u перевищує 10^6 Дж/м³[15]. Висока магнітна анізотропія частинок дозволяє їм зберігати термічну стабільність при дуже малих розмірах. Магнітна анізотропія матеріалу залежить від ступеню впорядкованості, який залежить від складу сплаву та умов термічної обробки.

Таблиця 1.1 – Магнітні властивості матеріалів перспективних для надщільного магнітного запису [15]

Матеріал	Структура	K_u (кДж/м ³)	M_s (кА/м)	H_A (кА/м)	T_c (К)
Co	ГЦП	540	1440	597	1404
Co ₃ Pt	ГЦП	2000	1100	2890	1200
CoCrPt	ГЦП	100–500	200–700	500–1600	~500
FePt	$L1_0$	7000	1140	9770	750
FePd	$L1_0$	1800	1100	2626	760
CoPt	$L1_0$	4900	800	9750	840
SmCo ₅	ГЦП	14000	910	24000	1000

На відміну від впорядкованих структур, вихідні FePt, FePd та CoPt сплави являють собою неупорядковані тверді розчини з малою магнітною анізотропією. Наступна термічна обробка за температур вище 650 °C необхідна для утворення впорядкованої $L1_0$ структури з високою коерцитивністю, при цьому відбувається

ріст частинок. До того ж така висока температура не є прийнятною для промисловості, тому проводяться дослідження спрямовані на зниження температури впорядкування. Встановлено, що легування додатковим елементом має позитивний ефект.

В роботі [16] встановлено, що легування сплаву FePd міддю позитивно впливає на процес впорядкування. Плівки з вмістом Cu 7 ат.% після відпалу у вакуумі за температури 550 °C проявляли магнітно анізотропні властивості та мали перпендикулярну коерцитивну порядку 3 кЕ.

В роботі [17] було досліджено вплив швидкого термічного відпалу на структуру та магнітні властивості нанорозмірних плівок FePt та FePd. Було встановлено, що в сплаві FePd впорядкування йде набагато повільніше ніж у сплаві FePt. Це пояснюється тим, що під час ШТВ в плівках FePt створюються значні розтягуючі напруження (до 1,7 ГПа при 800 °C) що є важливим фактором при впорядкуванні та формуванні текстури (001).

1.5 Процеси впорядкування у плівках FePt

На сьогодні сплав FePt з упорядкованою структурою $L1_0$ є найбільш досліджений завдяки великій енергії магнітно-кристалічної анізотропії ($\sim 7 \cdot 10^6$ Дж/м³) [14-24].

Однак, не зважаючи на досить високий потенціал матеріалів з упорядкованою фазою $L1_0$ як середовище магнітного запису з високою щільністю, існують певні перешкоди для їх практичної реалізації [16, 18].

У нанорозмірних плівках FePt після осадження за кімнатної температури формується неупорядкована фаза A1. Ця фаза має ГЦК ґратку, у якій довільне розташування атомів Fe та Pt (рис. 1.7). Упорядкована фаза $L1_0$ стабільна при кімнатній температурі. Для її утворення необхідно провести відпал для надання атомам додаткової енергії, для зайняття певного положення у кристалічній ґратці (рис. 1.7). Під час упорядкування кристалічна ґратка зазнає тетрагональних викривлень: період ґратки вздовж вісі c зменшується, що призводить до зміни

властивостей сплаву, зокрема магнітних (фаза $A1$ є магнітно-м'якою, а фаза $L1_0$ магнітно-твердою) [19].

Високотемпературний процес, який забезпечує формування упорядкованої фази $L1_0$ ускладнює використання традиційних підкладок та отримання необхідного розміру зерен, текстури (001) та досягнення магнітної ізоляції зерен відносно одне одного. Однією з головних технологічних задач, що стоїть перед вченими – це зниження температури фазового перетворення $A1 \rightarrow L1_0$. Зниження температури фазового перетворення можна досягнути застосуванням різних методів: використанням напружено-деформованого стану; почерговим осадженням моношарів Fe і Pt та використанням багатошарових структур; додаванням третього елементу з низькою поверхневою енергією, наприклад, Ag, Au, Sb, Bi, для перегрупування атомів Fe і Pt за рахунок дифузії легуючих домішок; використанням іонного опромінення; проведенням відпалу у газовому середовищі [19-23].

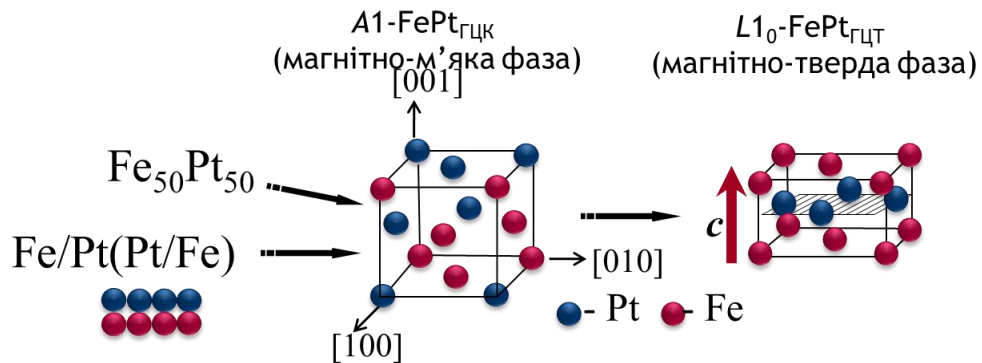


Рисунок 1.7 – Зображення елементарної комірки з упорядкованою та неупорядкованою фазами $A1$ та $L1_0$ FePt

У роботі [14] досліджували ріст кристалів упорядкованої фази $L1_0$ у тонких плівках еквіатомних сплавів FePd та FePt різної товщини. Плівки осаджували на нагріту ($T_s = 200^\circ\text{C}$) підкладку MgO (001) методом магнетронного розпилення з наступним відпалом у вакуумі за температури 600°C тривалістю 1 год. Після осадження в плівках формувалася фаза $A1$. Кристалічна ґратка фази $A1$

розширюється уздовж площини підкладки, що пов'язано з невідповідністю ґраток на межі плівка-підкладка. Кристалічна ґратка у плівках FePd розширена вбільшій мірі ніж у плівках FePt, та зменшується зі збільшенням товщини плівки. Також з'ясовано, що переважна орієнтація зерен упорядкованої фази $L1_0$ у напрямку (001) краща в плівках FePd з товщиною до 40 нм. Це є наслідком поперечної деформації ґратки, що присутня у плівках після осадження. Також вченими запропонована модель зародження та росту фази $L1_0$ [18, 23]. Однак інша група вчених, що також порівнювала формування упорядкованої фази $L1_0$ у сплавах FePd та FePt, осаджених на скляну підкладку, отримала інші результати. При проведенні швидкого відпалу сплаву FePd не вдалося досягнути орієнтацій зерен у напрямку (001), на відміну від сплаву FePt. Це пояснюється різним рівнем напруженого стану в площині підкладки у осаджених плівках (~ 2 ГПа у плівках сплаву FePt і $\sim 0,5$ ГПа у плівках сплаву FePd) [21]. Така різниця в отриманих даних вказує також на великий вплив підкладки, адже саме від цього може залежати рівень напруженого стану у осаджених плівках.

Вплив додаткового шару срібла товщиною 20 нм на фазоутворення в багатошаровій плівці [Fe (1 нм)/Pd (1,2 нм)] досліджували В. Лю та ін. Багатошарові плівкові композиції було осаджено методом магнетронного розпилення на скляну підкладку за кімнатної температури. Після осадження зразки піддавали відпалу у вакуумі ($P = 5 \cdot 10^{-5}$ Па) в інтервалі температур 500 °C–600 °C впродовж 20 хв. Було встановлено, що додавання шару срібла зменшує температуру фазового переходу $A1 \rightarrow L1_0$ на 100 °C. Дослідження структури показало, що під час відпалу сильна дифузія срібла сприяє упорядкуванню атомів Fe і Pd. Обмінна взаємодія магнітних моментів зерен FePd пригнічується в результаті присутності Ag на границях зерен FePd [24].

1.6 Вплив напруженого стану на формування фази $L1_0$ FePt

Напружений стан плівки впливає на процеси термічно активованого формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt і їх магнітні властивості.

У роботі [21] в плівці $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) після осадження формується невідпорядкована фаза $A1\text{-FePt}$ з гранецентрованою кубічною ґраткою (рис. 1.8) та присутні розтягуючі залишкові напруження $\sim 4,5$ ГПа (рис. 1.9).

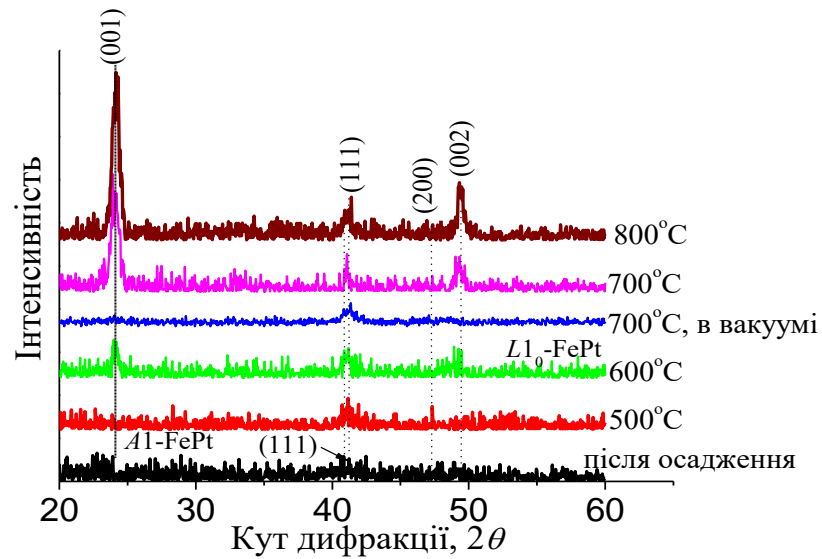


Рисунок 1.8 — Дифрактограми плівок $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) після осадження і швидкого відпалу в азоті в температурному інтервалі 500 °С – 800 °С та у вакуумі при 700 °С [21]

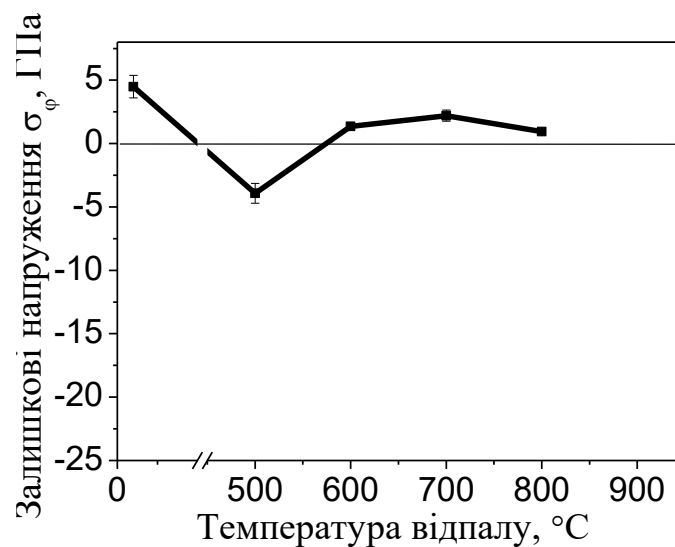


Рисунок — 1.9 Залежність залишкових напружень в плівці $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) від температури швидкого відпалу в азоті [21]

Швидкий відпал в азоті за температури 500 °С призводить до зсуву структурного рефлексу (111) FePt в бік великих кутів, що означає початок

процесу упорядкування, появу спотворень ґратки та різкої зміни рівня і знаку напруженого стану. Знак напружень змінюються в процесі упорядкування з розтягуючих на стискаючі, а їх значення $\sim -3,9$ ГПа. Згідно з принципом Ле Шательє-Брауна, стискаючі напруження сприяють фазовому перетворенню $A1\text{-FePt} \rightarrow L1_0\text{-FePt}$, при цьому значна кількість впорядкованої фази формується вже при відпалі за температури 600°C (рис. 1.8). На дифрактограмі з'являються надструктурний рефлекс (001) та структурний рефлекс (002), характерні для впорядкованої фази $L1_0\text{-FePt}$.

Підвищення температури відпалу до 700°C індукує процес упорядкування, який є наслідком впливу напруженого стану в плівці та супроводжується зменшенням об'єму, що віддзеркалюється в релаксації рівня механічних напружень (рис. 1.9). Проте, після відпалу у вакуумі за температури 700°C процес упорядкування практично не спостерігається. Це можна пояснити низьким рівнем напруженого стану в плівці, що пов'язано зі значно меншою швидкістю нагріву ($5^\circ\text{C}/\text{c}$) (рис. 1.8). Автори [21] повідомляють, що швидкий термічний відпал не тільки призводить до упорядкування, але також сприяє формуванню переважної текстури (001) на аморфних підкладках, що в майбутньому може забезпечити виробництво приладів на основі FePt.

Відпали в азоті в температурному інтервалі $600^\circ\text{C} - 800^\circ\text{C}$ супроводжуються збільшенням інтенсивностей надструктурного рефлексу (001) і рефлексу (002), що є наслідком збільшення кількості фази $L1_0\text{-FePt}$ та ступеня її впорядкування (рис. 1.8).

При підвищенні збільшується відношення інтегральних інтенсивностей $I(002)/I(111)$, що вказує на збільшення кількості зерен орієнтованих у напрямку [001] з віссю c легкого намагнічування, перпендикулярною до площини плівки (рис. 1.10). Автори пов'язують це явище зменшенням рівня стискаючих напружень [21].

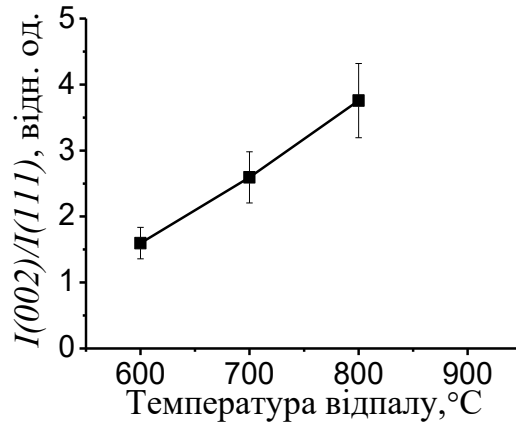


Рисунок 1.10 — Залежність відношення інтенсивностей структурних рефлексів $I(002)/I(111)$ фази $L1_0$ -FePt у плівці $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) від температури швидкого відпалу в азоті [21]

Фазове перетворення $A1$ -FePt \rightarrow $L1_0$ -FePt супроводжується зміною магнітних властивостей матеріалу (рис. 1.11).

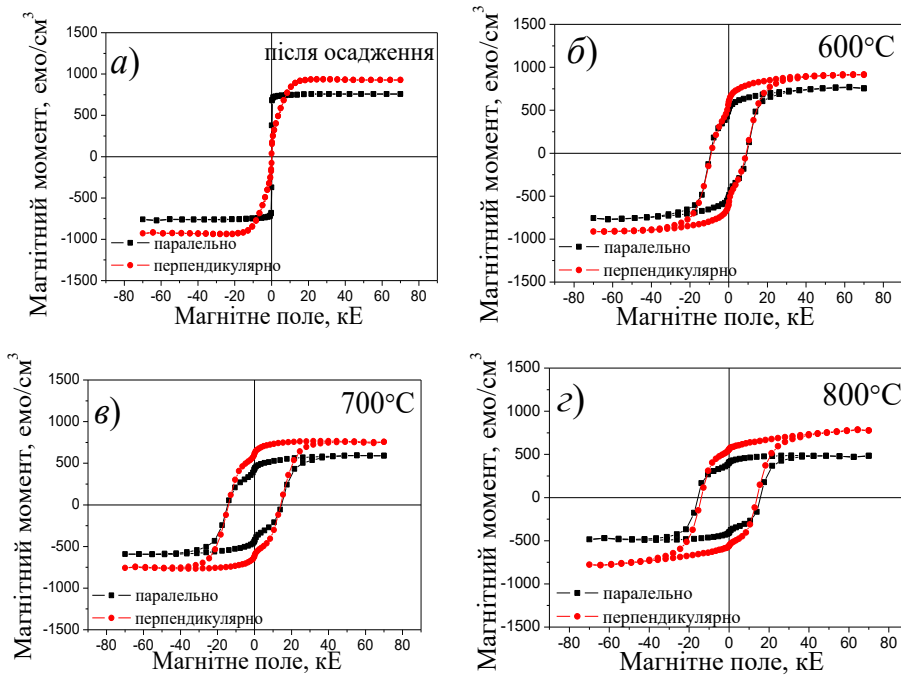


Рисунок 1.11 — Петлі гістерезису плівки $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) після осадження (а) та після швидкого відпалу в азоті при 600 °C (б), 700 °C (в), 800 °C (г) [21]

Плівка $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) після осадження, яка має в своїй структурі магнітно-м'яку фазу $A1\text{-FePt}$, володіє малою коерцитивною силою (рис. 1.11 а). Подальше підвищення температури відпалу від 600 °С до 800 °С призводить до значного зростання коерцитивної сили, як в паралельно, так і в перпендикулярно прикладеному до площини плівки магнітному полі (рис. 1.11 з) і формуванню магнітно-твердої фази $L1_0\text{ FePt}$ [21].

Після осадження та відпалу за температури 500 °С поверхня плівки гладка та має незначну шорсткість (рис. 1.12).

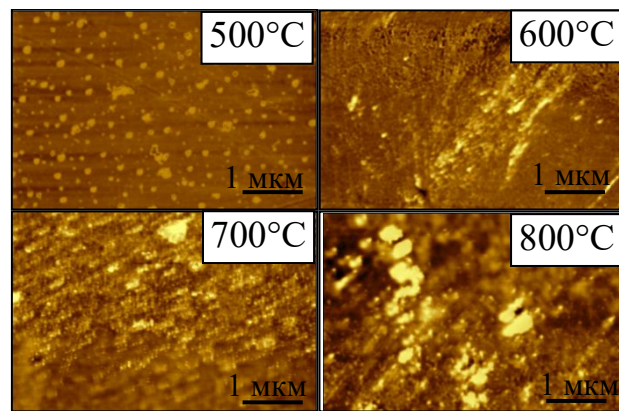


Рисунок 1.12 — АСМ-зображення морфології поверхні плівки $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$ (15 нм) після осадження та відпалів в азоті в інтервалі температур 500 °С – 800 °С

З підвищенням температури відпалу і розвитком дифузійних процесів і фазових перетворень істотно змінюється морфологія поверхні. Поверхня плівки стає більш неоднорідною та її шорсткість змінюється від 0,12 нм до 1,22 нм [21].

1.7 Висновки до розділу 1

У наші часи використовується технологія перпендикулярного магнітного запису інформації. Але, для збільшення щільності магнітного запису потрібно переходити на термічно-активований метод магнітного запису.

Впорядкована фаза $L1_0$ FePt перспективна для використання як матеріал для магнітного запису інформації. Для отримання впорядкованої фази $L1_0$ необхідно провести відпал вище за 400 °C.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали

В роботі досліджується формування впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt в тришарових нанорозмірних плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) на підкладках SiO_2 (100 нм)/Si (001) під час відпалу у вакуумі.

2.2 Термічна обробка зразків

Відпал у вакуумі не нижче $1,39 \cdot 10^{-3}$ Па проводили на приладі ВУП-5М (вакуумний універсальний пост). Зразки відпалювали в інтервалі температур 400 °С – 900 °С. Зразки нагрівалися протягом 1 хвилини – 5 хвилин, витримувались при відповідній температурі відпалу на протязі 30 секунд, а потім охолоджувалися до температури приблизно 70 °С. При температурі 700 °С проводився тривалий відпал протягом 30 с, 2 хв, 5 хв, 15 хв, 30 хв.

2.3 Методика дослідження

2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгеноструктурний фазовий аналіз зразків проводився на дифрактометрі ULTIMA IV (Rigaku). Для зйомки використовувалось випромінювання мідного аноду Cu K_α ($\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$), прискорююча напруга – 40 кВ, анодний струм – 40 мА [26].

Рентгеноструктурний аналіз є прямим методом визначення фазового та структурного складу матеріалу. Суть методу полягає у прецизійному визначенні міжплощинних відстаней кристалічної структури зразка, що дає достатньо інформації для визначення фазового складу. Перевагами цього методу є висока достовірність результатів та швидкість їх отримання, відносна дешевизна експерименту без руйнування зразку [27].

Кожна кристалічна фаза характеризується певним унікальним набором міжплощинних відстаней d/n . З рівняння Вульфа-Брегга (формула 2.1) витікає, що кожному значенню міжплощинної відстані на дифрактограмі від полікристалічного зразку відповідає максимум під певним кутом Θ (при постійній довжині хвилі випромінювання λ).

$$2d \sin \Theta = \frac{n}{\lambda} \quad (2.1)$$

Структурні особливості фази впливають на відносну інтенсивність ліній на дифрактограмі. Отже, знаючи довжину хвилі рентгенівського випромінювання та визначивши положення дифракційних максимумів на дифрактограмі можна розрахувати відповідні міжплощинні відстані. Знаючи міжплощинні відстані та відносні інтенсивності відповідних рефлексів за допомогою бази даних ASTM, або подібних, однозначно визначаємо фазовий склад зразку [28]. Розрахунок параметру гранецентрованої кубічної комірки проводився за формулою:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{H^2 + K^2 + L^2}{a^2}, \quad (2.2)$$

де d – міжплощинна відстань, Å;

H, K, L – індекси площин;

a – параметр ґратки, Å.

Параметри гранецентрованої тетрагональної комірки розраховувалися за наступною формулою:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{H^2 + K^2}{a^2} + \frac{L^2}{c^2}, \quad (2.3)$$

де a, c – параметри ґратки, Å.

Розрахунок параметрів елементарних комірок гранецентрованої кубічної та гранецентрованої тетрагональної сингоній проводиться за наступними формулами [27]:

Розміри областей когерентного розсіювання були розраховані для оцінки розмірів кристалітів у плівці. Розрахунок проводився за формулою Дебая-Шеррера із величини уширення дифракційного максимуму.

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (2.4)$$

де d – середній розмір кристалітів;

$k = 0,9$ – коефіцієнт;

λ – довжина хвилі випромінення, що використовується, Å;

β – ширина піка на половині висоти, рад.;

θ – кут дифракції, град.

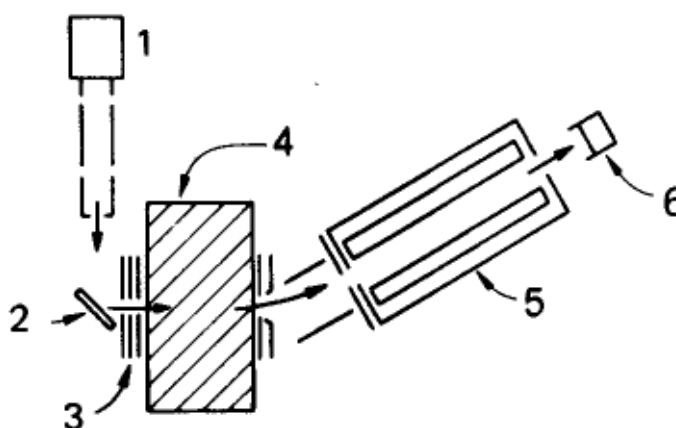
Рентгеноструктурний фазовий аналіз тонких полікристалічних плівок має декілька особливостей в порівнянні з аналізом масивних об'єктів. На дифрактограмі можуть бути присутні максимуми від підкладинки, а у випадку багатошарових композицій – відбиття від декількох кристалічних шарів. В плівках часто присутня текстура, яка має значний вплив на відносну інтенсивність дифракційних рефлексів. Також рентгеноструктурний аналіз тонких плівок може не виявити фазу, кількість якої мала за абсолютним значенням, хоча відсотковий вміст може бути досить високим. Ці фактори є джерелами неоднозначностей при визначенні фазового складу плівок [28].

2.3.2 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток

Видалення атомів і молекул з поверхні твердих тіл та їх наступний мас-спектрометричний аналіз є основою методу безпосереднього визначення поверхневого складу твердих тіл. Мас-спектрометрія вторинних нейтральних

частинок (МСВН) є високочутливим методом аналізу поверхні твердого тіла, котрий широко застосовується в напівпровідниковій техніці, біології, геології [29]. Застосування МСВН для аналізу складу забезпечує швидкий кількісний метод для визначення поверхні і характеристики матеріалів.

На рисунку 2.1 зображено приклад системи МСВН, головна відмінність якої від стандартної системи ВІМС полягає у встановленні іонізаційної плазменної камери перед мас-спектрометром. Сітки між зразком та камерою діють як електричні діафрагми, не дозволяючи іонам обох знаків входити в камеру чи покидати її. Ось чому в іонізаційну камеру потрапляють тільки нейтральні частинки, а іонізаційні в камері атоми не можуть повернутися на зразок.



1 – іонна гармата, 2 – зразок, 3 – сітки, 4 – плазма, 5 – квадрупольний мас-спектрометр, 6 – детектор

Рисунок 2.1 – Установка для мас-спектроскопії вторинних нейтралей (МСВН), в якій розпорошені нейтральні частинки потрапляють в плазмове середовище для постіонізації [30]

Мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток (МСВН) проводилась на пристрої Balzers QMG 422. Іонізація нейтральних частинок в камері може проводитися з використанням високоякісної розрідженої плазми. Чутливість методу МСВН до низьких концентрацій домішок порівнюється з чутливістю методу ВІМС і складає близько 10^{-6} . Роздільна здатність по глибині –

порядку ≤ 2 нм. Похибка методу – 1 %. Для іонізації нейтральних частинок можна замість плазми використовувати потужні лазери [30].

При розрахунку концентрації елементів в залежності від тривалості іонного бомбардування використано лінійну залежність концентрації від визначеної у досліді інтенсивності.

Профілі концентрацій вимірювали методом мас-спектроскопії вторинних нейтралей на спектрометрі SPECS INA-X, який працює з плазмою благородного газу. Бомбардуючий іонний струм в цьому пристрої має надзвичайно високу бічну однорідність. Низькі енергії бомбардування (близько 100 eV) і однорідний плазмовий профіль призводить до роздільної здатності (< 2 нм). Деталі пристрою SNMS та профілю оцінку можна знайти [29,30].

2.3.3 SQUID магнітометрія

Оцінка магнітних властивостей плівок проводилась за допомогою магнетометру Quantum Design MPMS SQUID VSM. Вимірювання проводились за стабільної температури 300 К в магнітному полі від -7 кЕ до +7 кЕ. Для пришвидшення процесу дослідження записувалась лише половина петлі магнітного гістерезису з 70 точок [31].

На рисунку 2.2 зображена спрощена схема реєструючої SQUID системи. Три надпровідні реєструючі котушки утворюють градіометр другого порядку. Зовнішні котушки обернені в іншу сторону, завдяки цьому система є нечутливою до зовнішнього магнітного поля. Струм у реєструючих котушках утворюється лише під дією локального збуджуючого магнітного поля.

Струм у реєструючих котушках індуктивно взаємодіє з SQUID, який працює як надзвичайно чутливий перетворювач струм-напруга. Необхідно відмітити, що зворотній струм від SQUID компенсує струм у реєструючих котушках, тому фактичного струму там немає, цей же зворотній струм створює напругу для аналізу. Ця напруга підсилюється, оцифровується та оброблюється цифровими інструментами [32].

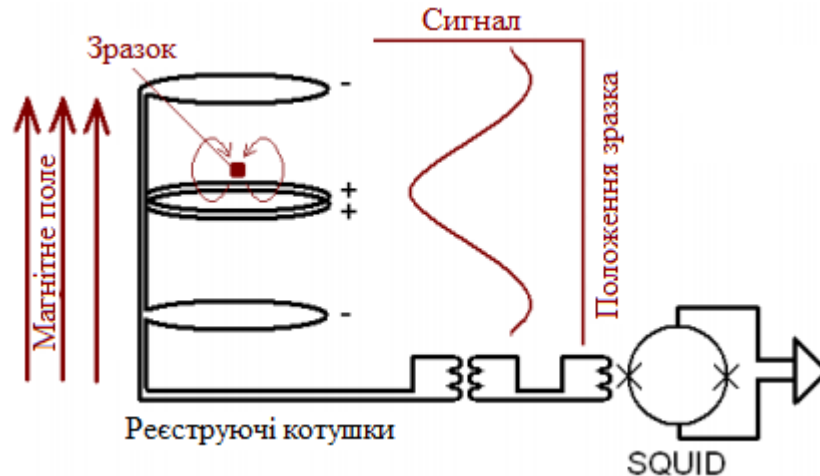


Рисунок 2.2 – Спрощена схема реєструючої системи приладу MRMS SQUID VSM[32]

Техніка вимірювання дозволяє швидко та точно виділяє сигнал зразка від інших джерел шуму, включаючи блукаючі SQUID сигнали та механічні шуми від коливання зразка.

2.5 Висновки до розділу 2

Використано методи сучасного фізичного матеріалознавства: рентгеноструктурний фазовий аналіз, метод мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток та SQUID-магнітометрія. Ці методи дозволяють отримати інформацію про структуру, фазовий склад, хімічний склад та магнітні властивості у тришарових плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм).

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дана робота присвячена дослідженню дифузійних процесів та магнітних властивостей у нанорозмірних плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм).

Було проведено два типи термічної обробки: відпал у вакуумі за температур 400 °C – 900 °C тривалістю 30 с та ізотермічний відпал за температури 700 °C з різною тривалістю (2 хв, 5 хв, 15 хв, 30 хв).

3.1 Процеси фазоутворення у композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) при відпалах у вакуумі

3.1.1 Фазоутворення у композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм)

Дифрактограми, отримані після осадження та відпалів у вакуумі при різних температурах в плівковій композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) зображені на рисунку 3.1. На дифрактограмі після осадження присутні рефлекси від Fe, Ag, Pt, що свідчить про відсутність дифузії між шарами металів.

Під час відпалу при температури 700 °C внаслідок дифузії між шарами починає формуватися неупорядкована фаза $A1$, але ще залишається значна кількість платини. Після відпалу за температури 800 °C фаза $A1$ переходить у упорядкований стан. При збільшенні температури відпалу до 900 °C переважна орієнтація зерен $L1_0$ FePt в напрямку $[001]$ не формується.

Дифрактограми плівки Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt(15 нм) після осадження і відпалу в вакуумі при температурі 700 °C протягом 30 с, 2 хвилини, 5 хвилин, 15 хвилин і 30 хвилин показані на рисунку 3.2. Видно, що після осадження на дифрактограмі плівок Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм) присутні піки – інтенсивний Pt (111), слабкі Ag (111), Fe (110) і від підкладки.

Відпал при 700 °C протягом 30 с призводить до зменшення інтенсивностей рефлексів Ag (111) і Pt (111) в плівці внаслідок початку взаємної дифузії між шарами.

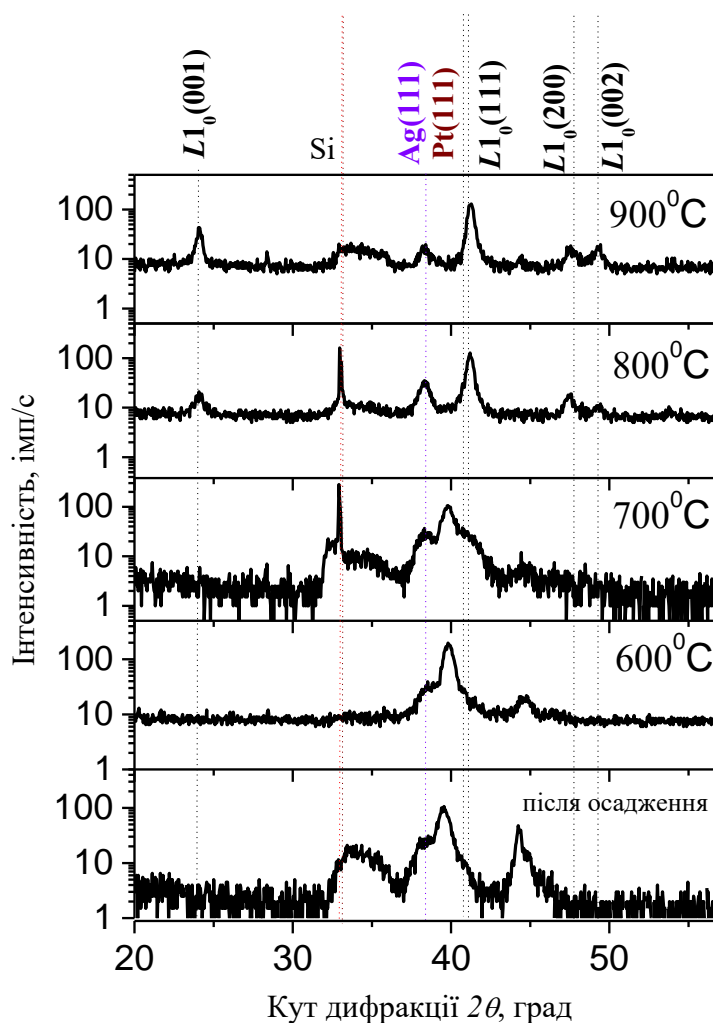


Рисунок 3.1 – Дифрактограми плівкової композиції Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм) після осадження і відпалу у вакуумі в інтервалі температур 400 °С – 900 °С

На дифрактограмах плівки Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) можна побачити, що після відпалу протягом 2 хвилин пік (111) зміщується в бік більших кутів, що свідчить про формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt. Зменшення інтенсивності піків Ag (111) і Ag (200) говорить про розчинність частини шару (рис. 3.2).

Істотні зміни фазового складу в плівкових композиціях спостерігаються після відпалу протягом 2 хвилин. На дифрактограмах з'являються базові рефлекси (111), від неупорядкованою Al і впорядкованої фази $L1_0$ FePt. У плівках залишається ще Pt, але інтенсивності її рефлексів (111) і (200) значно зменшуються.

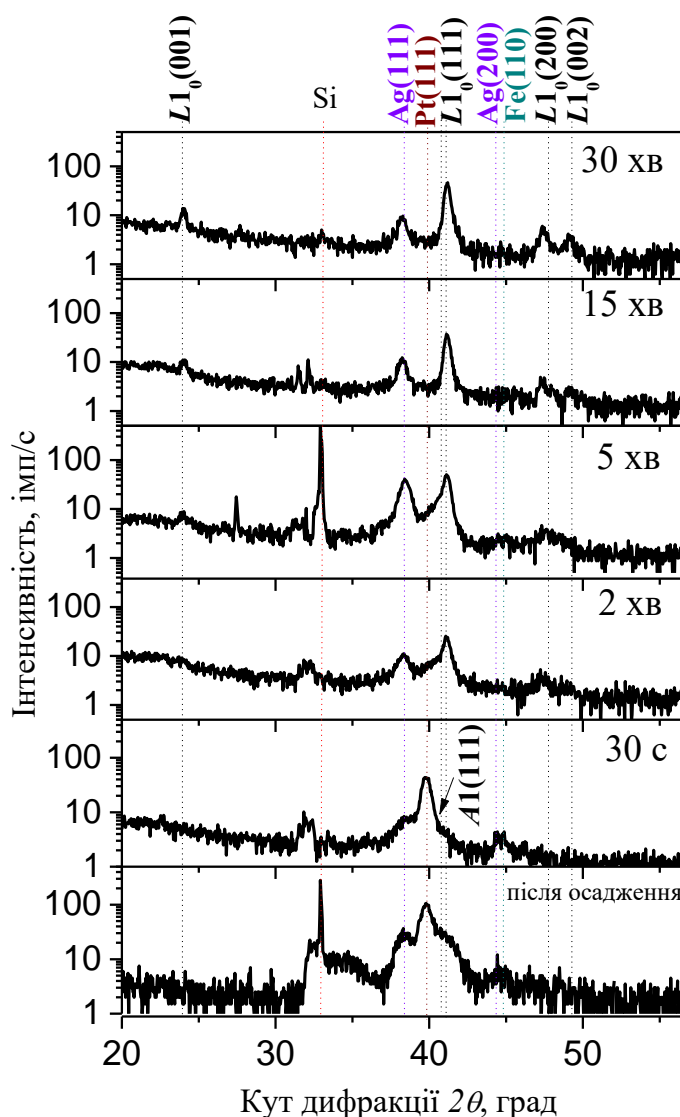


Рисунок 3.2 – Дифрактограми осаджених плівок Fe (15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та відпалених у вакуумі за температурою 700 °C протягом 30 с, 2 хв, 5 хв, 15 хв та 30 хв

Поява рефлексу (111) від впорядкованої фази $L1_0$ -FePt і розщеплення базового рефлексу (200) на (200) і (002), свідчать про тетрагональну кристалічну решітку на початку процесів упорядкування в плівках Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt (15 нм) (рис. 3.2). Надструктурний рефлекс (001) $L1_0$ -FePt на дифрактограмах обох плівок з'являється після відпалу протягом 5 хвилин. Деяке збільшення його інтенсивності після відпалу при 15 хв. і 30 хв. пояснюється продовженням процесу впорядкування. Срібло не розчиняється у кристалічній ґратці, як неупорядкованої фази Al-FePt, так і впорядкованої фази $L1_0$ -FePt. Про

збереження якоїсь кількості срібла у вигляді шару по межах зерен свідчить про присутність рефлексів Ag (111) і Ag (200) після кінцевого відпалу.

На рисунку 3.3 представлено залежність параметру ґратки a фаз Pt та $L1_0$ FePt від температури відпалу у плівках Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм). Зі збільшенням температури відпалу параметр ґратки Pt зменшується внаслідок розчинення у ній Fe. При збільшенні кількості впорядкованої фази параметр a також зменшується.

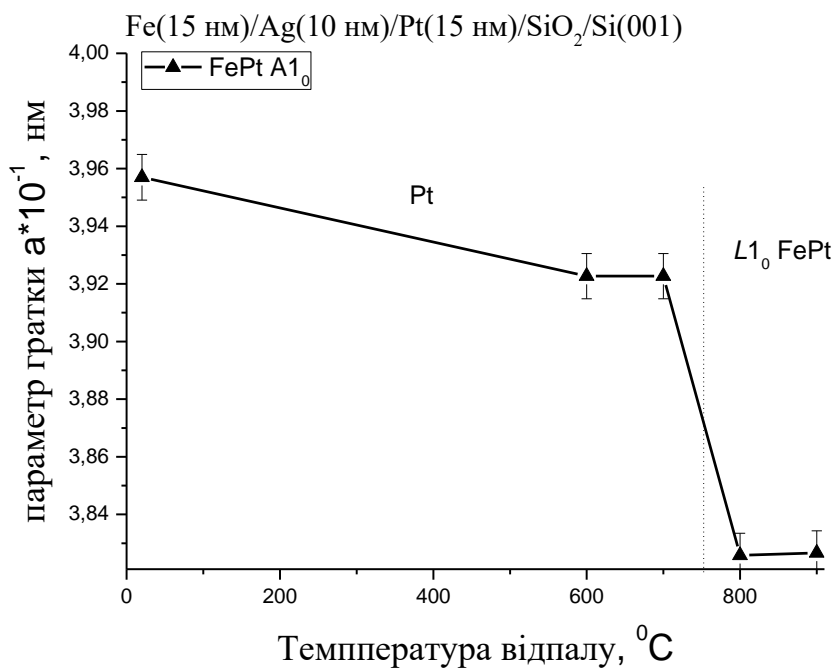


Рисунок 3.3 – Залежність параметру ґратки a фаз Pt та $L1_0$ FePt від температури відпалу у плівках Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм)

Параметр ґратки c фази $L1_0$ FePt майже не змінюється в інтервалі температур 800 °C – 900 °C (рис. 3.4).

Відношення параметрів ґратки c/a з температурою відпалу змінюється в межах похибки, як показано на рисунку 3.5.

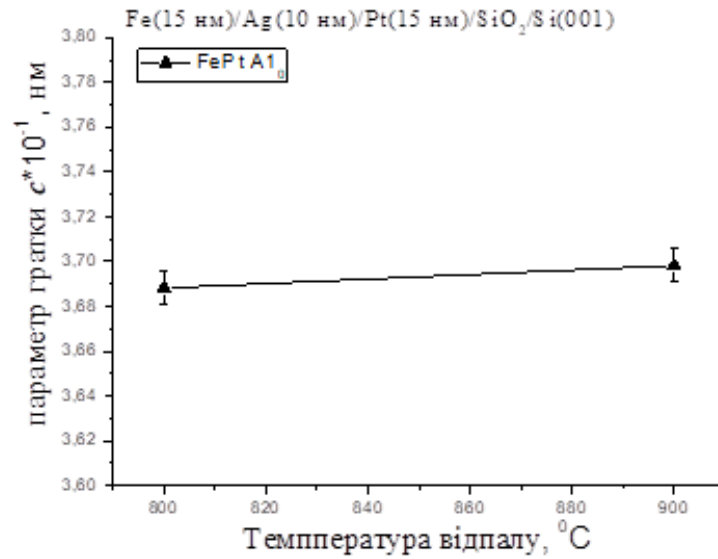


Рисунок 3.4 – Залежність параметру ґратки c фази $L1_0$ FePt від температури відпалу у плівках Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм)

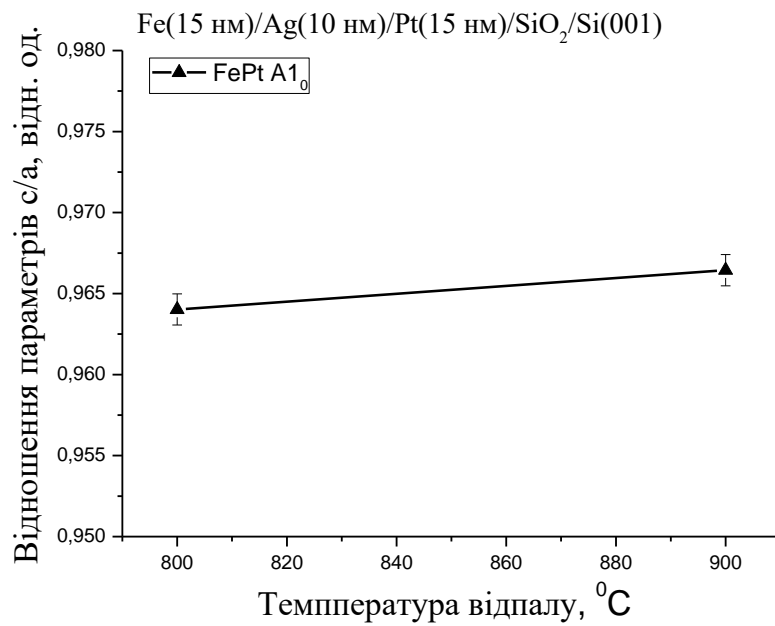


Рисунок 3.5 – Залежність відношення параметрів ґратки c/a від температури відпалу в плівці Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм)

Ступінь упорядкування фази $L1_0$ зростає зі збільшенням тривалості відпалу (рис. 3.6).

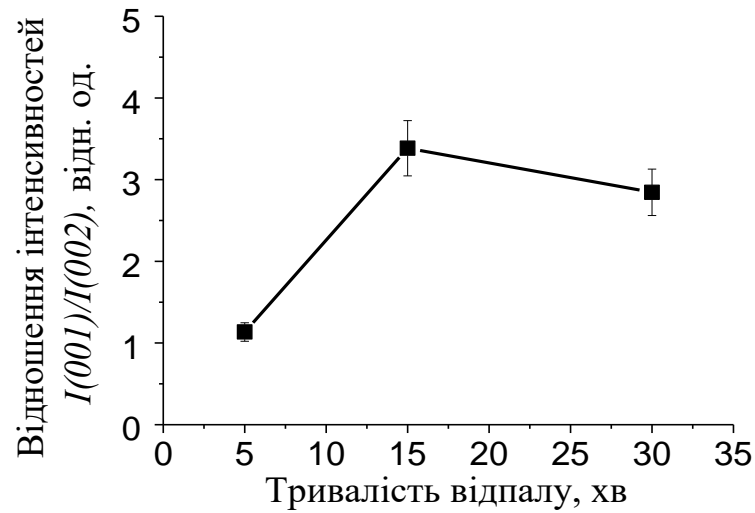


Рисунок 3.6 – Відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$, впорядкованої фази $L1_0$ в плівці Fe (15 м)/Ag (10 м)/Pt (15 нм)

Кількість зерен фази $L1_0$ з віссю легкого намагнічування c перпендикулярної площині плівки зменшується зі збільшенням часу відпалу (рис. 3.7).

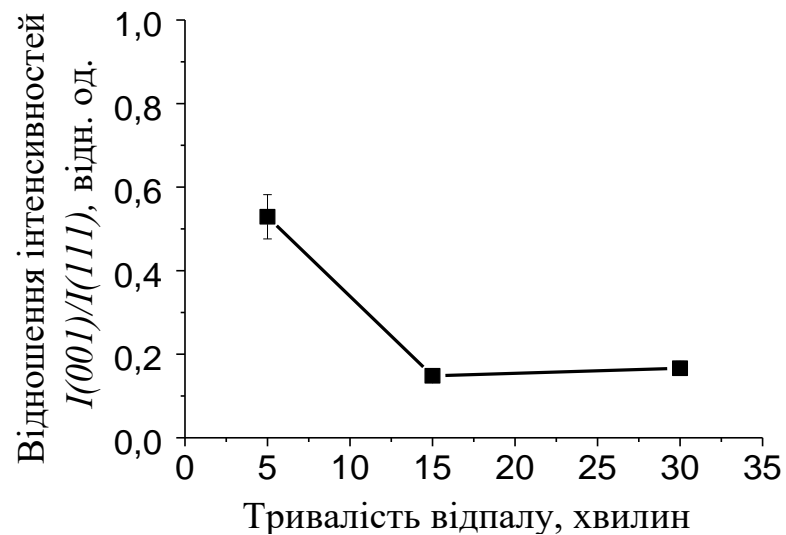


Рисунок 3.7 – Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$, впорядкованої фази $L1_0$ в плівці Fe (15 м)/Ag (10 м)/Pt (15 нм)

3.1.2 Перерозподіли хімічних елементів за товщиною плівкових композицій

Можна помітити, що в осаджених плівках видно шарувату структуру і побачити, що дифузія між шарами відсутня (рис. 3.8). У процесі відпалу при 700 °С протягом 30 с, починається дифузійне перемішування між шарами Ag і Pt в плівках Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) (рис. 3.9). При цьому профіль розподілу срібла стає асиметричним.

Чітко видно в плівці Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм), що шари Ag і Pt почали змішуватися, в той час як шар Fe непошкоджений (рис. 3.8). Середній вміст Ag в шарі Pt становить приблизно (19-22) ат.%, а Pt в шарі Ag – (20-30) ат.%.

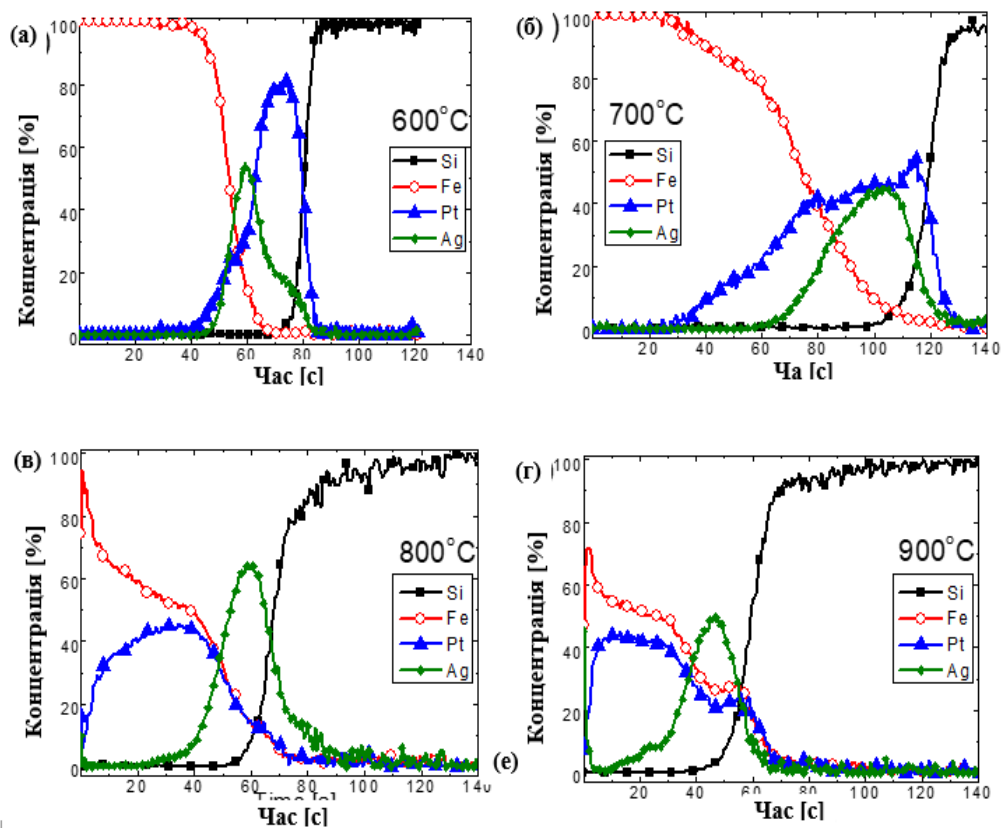


Рисунок 3.8 – Показує профілі залежності складу від часу травлення осаджених плівок Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм), після відпалу в вакуумі за температурою 700 °С тривалістю 30 с – 30 хвилин

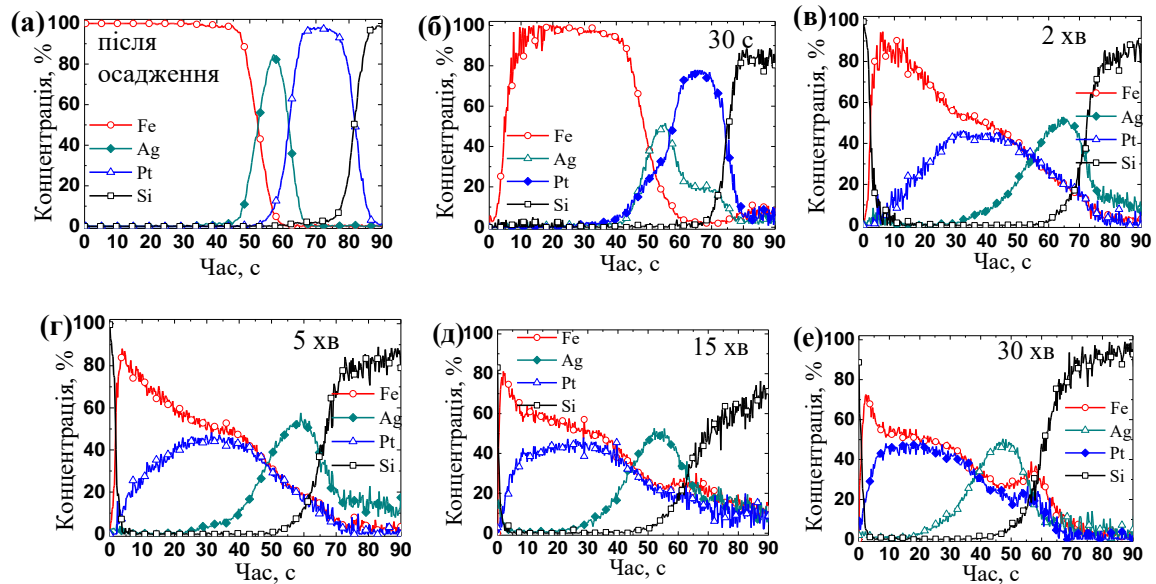


Рисунок 3.9 – Залежність профілю складу від часу травлення осаджених плівок Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) та після відпалу в вакуумі при 700 °C протягом 30 с - 30 хв

На профілі складу по глибині плівки Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм), можна побачити значні зміни: шар Ag перемістився до підкладки (на місце шару Pt), в той час як в напрямку до поверхні плівки утворилася FePt зі змінним складом.

Таким чином, після відпалу, в композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм), в результаті протікання термічно активованих процесів дифузійного фазоутворення срібло розташовується біля підкладки, при цьому спостерігається гомогенізація шару FePt.

Більш швидкий дифузійний процес відбувається завдяки різним температурам плавлення Pt і Ag, а відповідно і силам зв'язку між атомами.

Оскільки у Ag менша температура плавлення і нижче енергія активації процесів дифузії, ніж у Fe або Pt, то всі процеси швидше відбуваються в шарі Ag: атоми Pt швидше дифундують в шар Ag, ніж Ag в шар Pt. Про це свідчить асиметрія концентраційних розподілів елементів Ag і Pt у відповідних шарах (рис. 3.9)

3.2 Процеси фазоутворення у композиції Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм)

3.2.1 Фазоутворення у композиції Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

Дифрактограми плівок Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) після осадження і відпалу в вакуумі при температурі 700 °C протягом 30 с, 2 хв, 5 хв, 15 хв і 30 хв, показані на рисунку 3.10.

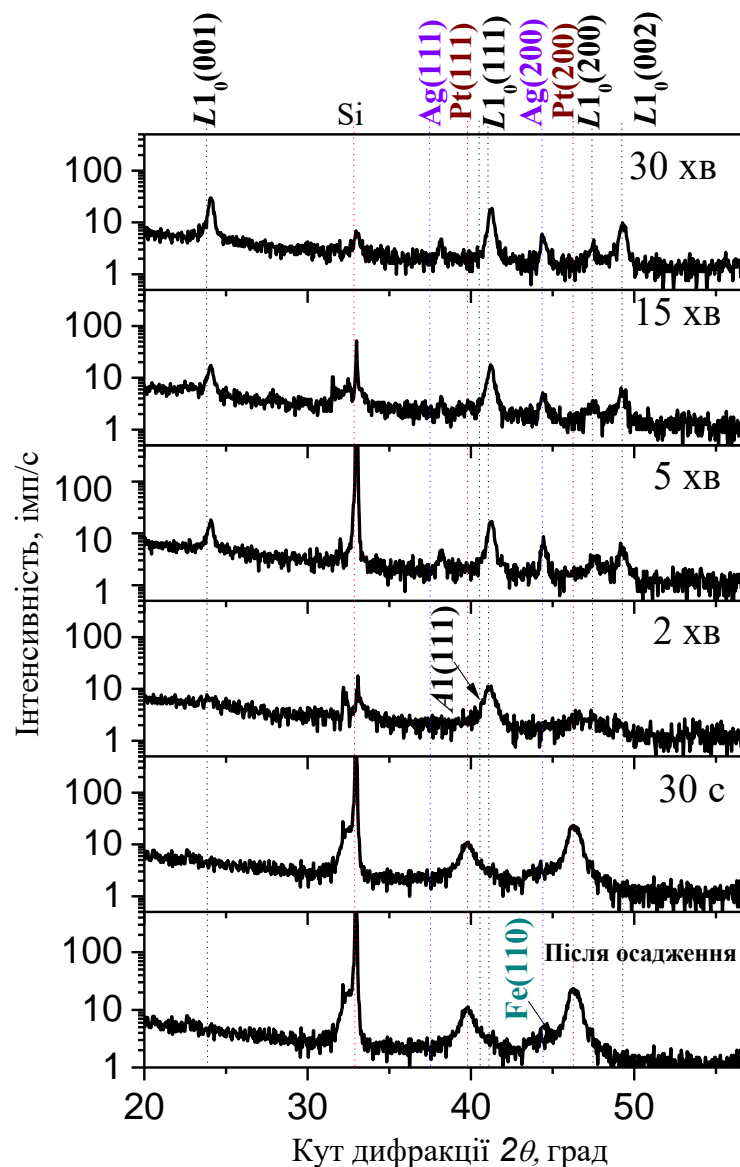


Рисунок 3.10 – Дифрактограми плівок Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм) після осадження та відпалів у вакуумі при 700 °C протягом 30 с, 2 хвилини, 5 хвилин, 15 хвилин і 30 хв. Випромінювання міді Cu K_α

На дифрактограмі після осадження присутні рефлекси Pt (111), Pt (200) і Fe (110), Ag (200) (рис. 3.10). Після відпалу протягом 30 с дифракційна картина не змінюється.

На дифрактограмах плівок Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) після відпалу протягом 2 хвилин рефлекси від Pt зникають і у плівці формується хімічно-невпорядкована фаза A1. Істотні зміни фазового складу в плівкових композиціях спостерігаються після відпалу протягом 5 хвилин. Утворюються впорядкована фаза $L1_0$ -FePt, про що свідчить поява надструктурного рефлексу (001), який ми можемо побачити на рис. 3.10. Поява рефлексу (111) від впорядкованої фази $L1_0$ -FePt і розщеплення базового рефлексу (200) на (200) і (002), свідчать про упорядкування в плівках Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) (рис. 3.10).

На дифрактограмах плівок Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) також з'являються рефлекси (111) від срібла. Причому в плівці Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм) спостерігається більший зсув рефлексу $L1_0$ -FePt (111) в сторону великих кутів (41,04 проти 41,24), це нам показує надструктурний рефлекс (001) $L1_0$ -FePt на дифрактограмах обох плівок. При подальшому збільшенні тривалості відпалу до 30 хв, дифракційна картина майже не змінюється.

Параметр ґратки a фаз Pt та $L1_0$ FePt спочатку падає, а потім змінюється в межах похибки від часу відпалу (рис. 3.11).

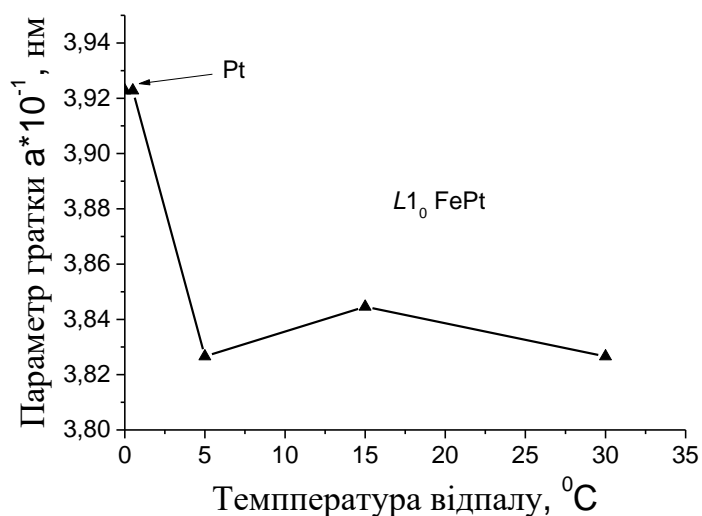


Рисунок 3.11 – Залежність параметру ґратки a фаз Pt та $L1_0$ FePt від часу відпалу у плівках Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм)

На рисунку 3.12 параметр ґратки c фази $L1_0$ FePt змінюється в межах похибки від часу відпалу у плівковій композиції.

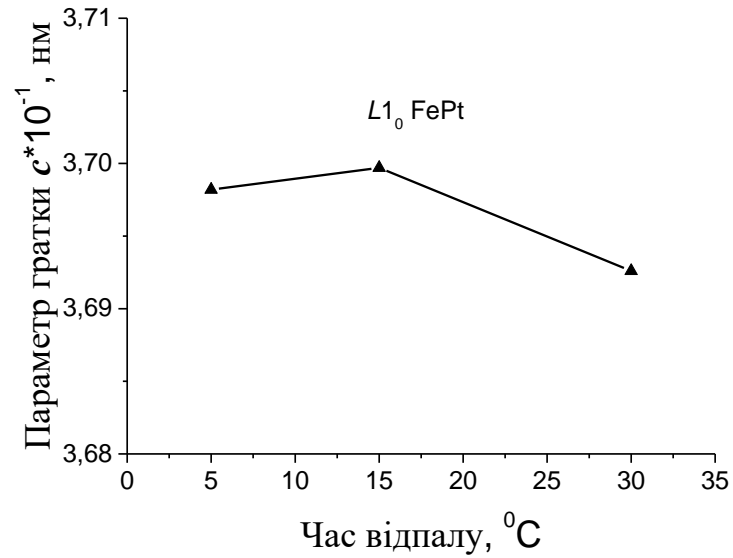


Рисунок 3.12 – Залежність параметру ґратки c фази $L1_0$ FePt від часу відпалу у плівках Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

Відношення параметрів ґратки c/a з температурою відпалу змінюється в межах похибки, як показано на рисунку 3.13.

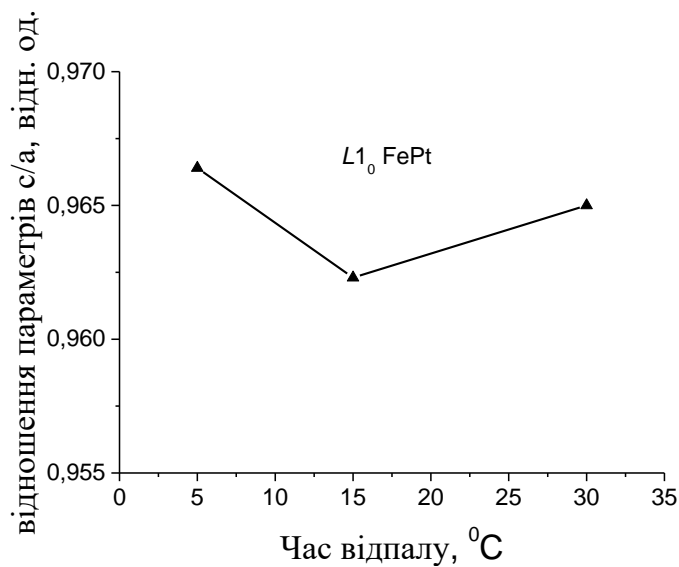


Рисунок 3.13 – Залежність відношення параметрів ґратки c/a від температури відпалу в плівці Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

Ступінь упорядкування фази $L1_0$ зростає зі збільшенням тривалості відпалу (рис. 3.14).

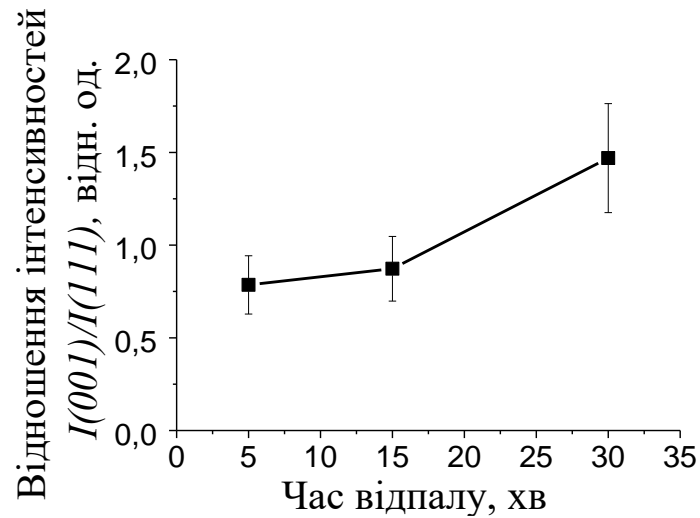


Рисунок 3.14 – Відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$, впорядкованої фази $L1_0$ в плівці Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

Кількість зерен фази $L1_0$ з віссю легкого намагнічування c перпендикулярної площині плівки змінюється в межах похибки зі збільшенням часу відпалу (рис. 3.15).

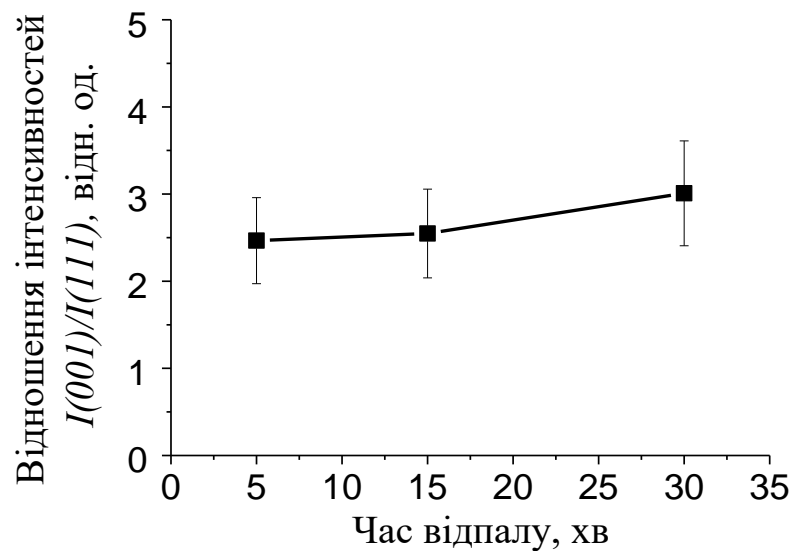


Рисунок 3.15 – Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$, впорядкованої фази $L1_0$ в плівці Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

3.2.2 Перерозподіли хімічних елементів за товщиною плівкових композицій

На рисунку 3.16 представлено залежність профіля состава від часу травлення в осаджених плівках. Можна помітити шарувату структуру, що свідчить про відсутність дифузії між шарами металів.

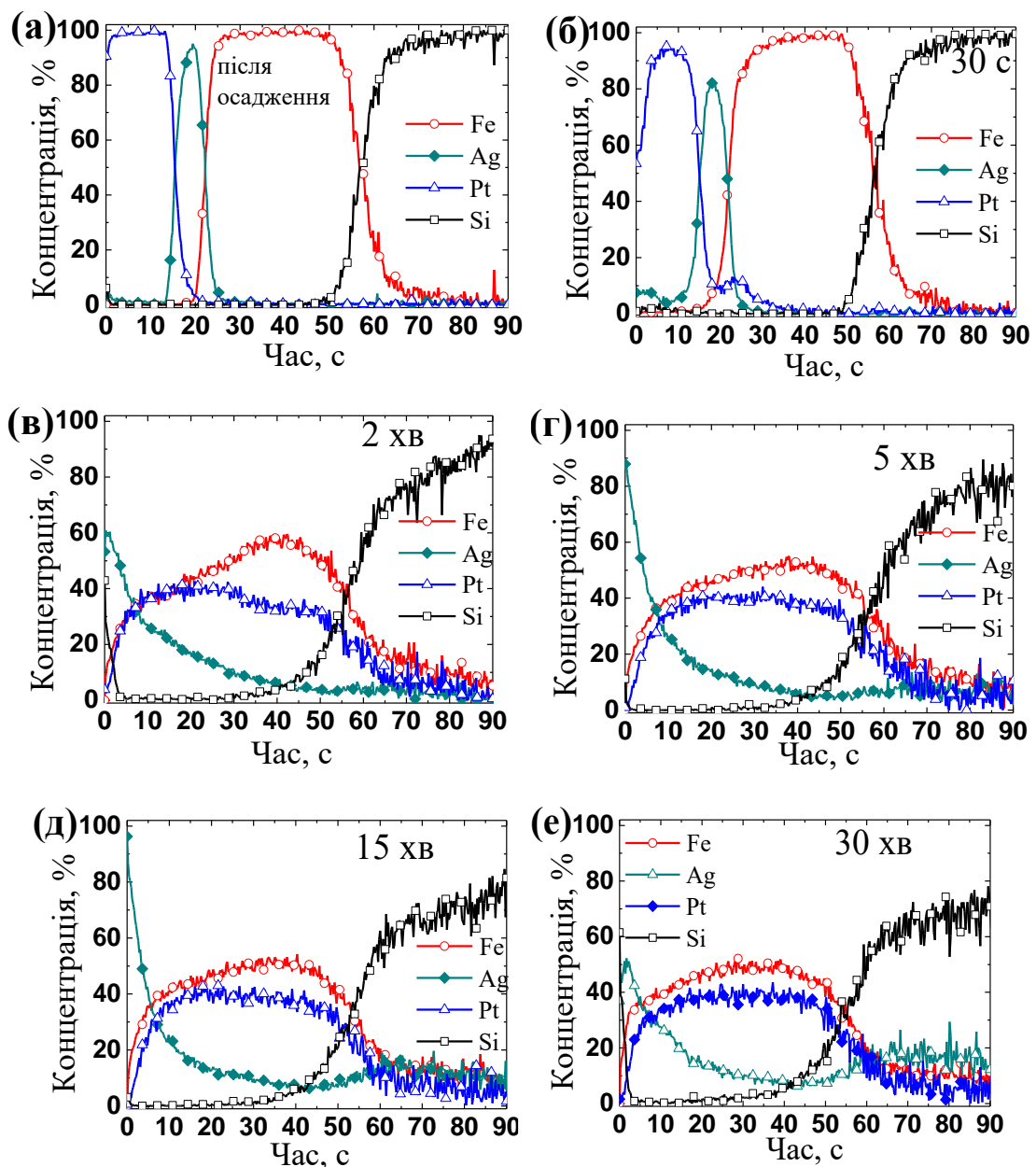


Рисунок 3.16 – Залежність профілю складу від часу травлення осаджених плівок Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe (15 нм) та після відпалу у вакуумі за температури 700 °С протягом 30 с – 30 хв

У процесі відпалу за температури 700 °С протягом 30 с, видно незначне переміщення між шарами Pt та Ag.

У процесі відпалу при 700 °С протягом 30 с, починається дифузійне переміщення між шарами Ag і Pt в плівках Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) (рис. 3.16 б). Профіль розподілу срібла стає асиметричним.

При цьому в плівці Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) середній вміст Ag в шарі Pt і Pt в шарі Ag приблизно (6-8) % і (10-12) %, відповідно (рис. 3.16 б) .

Після двох хвилин відпалу Pt дифундує через шар Ag і починає розчинятися в Fe, в той час, як Ag розчиняється в шарі Pt.

Срібло при розвитку процесів дифузійного фазоутворення не вбудовується в кристалічну решітку, як неупорядкованою фази $A1\text{-FePt}$, так і впорядкованої фази $L1_0\text{ FePt}$, а витісняється до поверхні плівки.

Зі збільшенням часу відпалу до 5 хв утворюється більш рівномірний розподіл Pt в Fe. А Ag нерівномірно розподілене по товщині плівки. Можна припустити, що Fe розчиняється в твердому розчині Ag - Pt. При цьому срібло виходить на поверхню плівки (рис. 3.16 г-е).

При подальшому збільшенні часу відпалу до 30 хв формується гомогенний шар FePt. Срібло розподіляється не рівномірно за товщиною плівки.

На профілі складу по глибині плівки, можна побачити значні зміни, те що шар Ag в основному перемістився до поверхні плівки.

Таким чином, після відпалу, в композиції Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм), в результаті протікання термічно активованих процесів дифузійного фазоутворення срібло розташовується біля поверхні плівки, при цьому спостерігається гомогенізація шару FePt.

3.3 Зміна магнітних властивостей у плівках Fe (15 нм)/Ag (10 нм)/Pt (15 нм) и Pt (15 нм)/Ag (10 нм)/Fe (15 нм)

На рисунках 3.17-3.18 показані петлі гістерезису $M(H)$ тришарових плівок Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) відпалених у вакуумі.

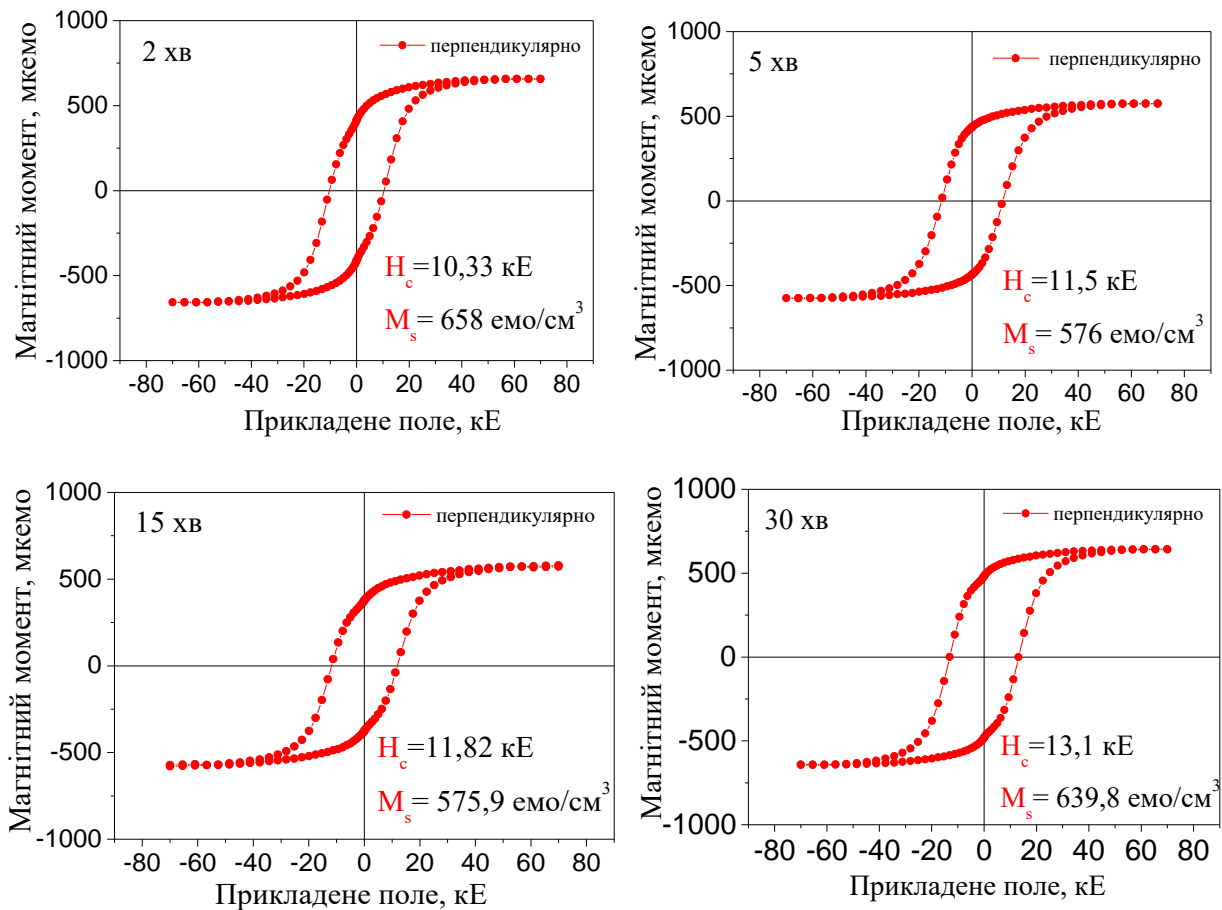


Рисунок 3.17 — Петлі гістерезису $M(H)$ тришарових плівок
 $\text{Fe}(15 \text{ нм})/\text{Au}(10 \text{ нм})/\text{Pt}(15 \text{ нм})$

Магнітні властивості плівки $\text{Fe}(15 \text{ нм})/\text{Ag}(10 \text{ нм})/\text{Pt}(15 \text{ нм})$ свідчать про те, що вже після ізотермічного відпалу за температури 700°C протягом 30 с починає формуватися упорядкована фаза $L1_0$ (рис. 3.17). Коерцитивна сила при цьому маленька 0,55 кЕ (рис. 3.19). При збільшенні часу відпалу до 30 хвилин коерцитивна сила зростає до 13,1 кЕ (рис. 3.17, 3.19).

Після відпалу 800°C коерцитивна сила плівки 11,6 кЕ. При збільшенні температури до 900°C магнітні властивості плівки майже не змінюються (рис. 3.18).

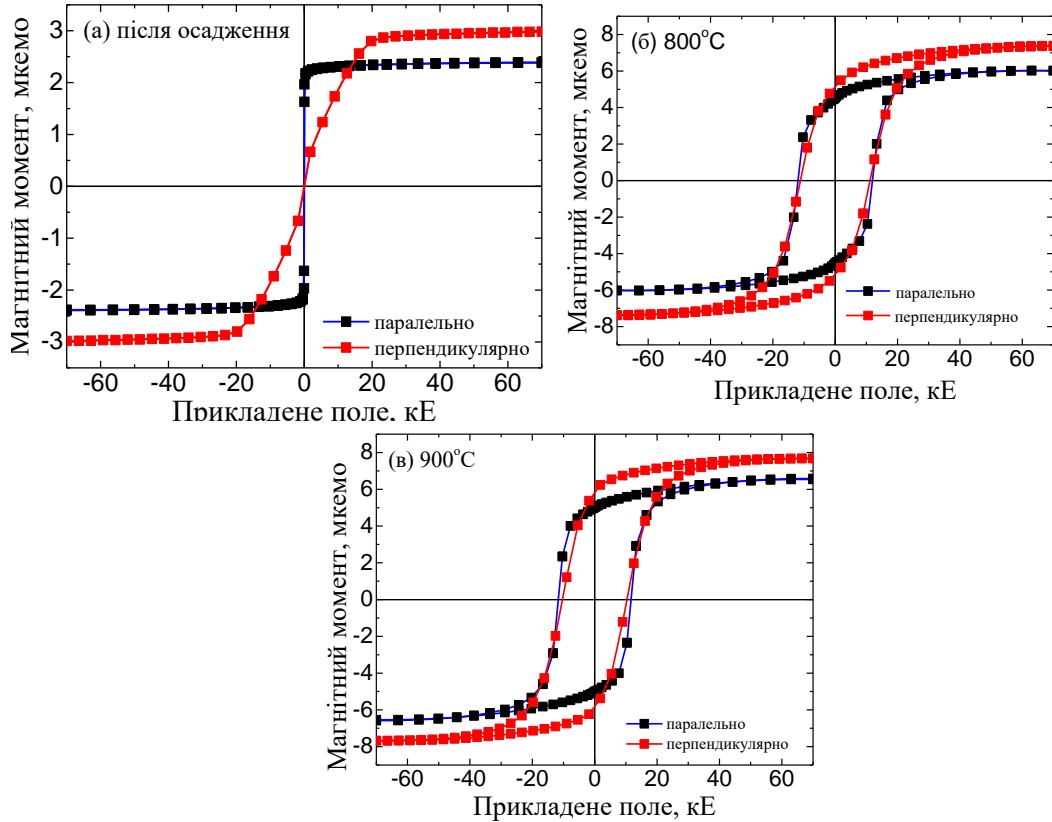


Рисунок 3.18 — Петлі гістерезису $M(H)$ плівок Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм), відпалених у вакуумі після осадження і відпалу у вакуумі при температурах 800 °C і 900 °C

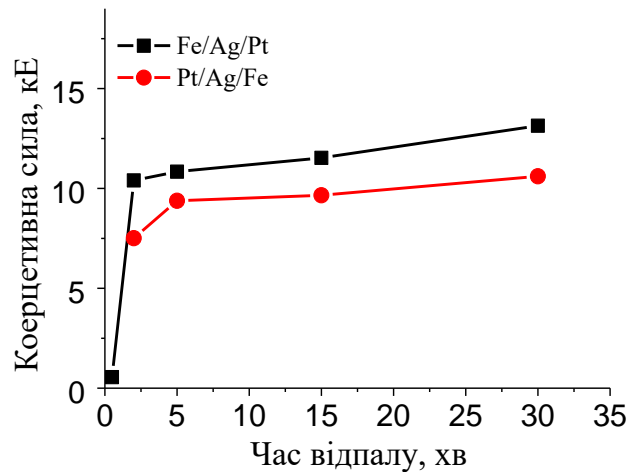


Рисунок 3.19 — Залежність коерцитивної сили в плівках Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) і Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм), від часу відпалу в вакуумі при 700 °C

На рисунку 3.20 показані петлі гістерезису $M(H)$ тришарових плівок Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм), відпалених у вакуумі протягом 2 хв, 5 хв, 15 хв і 30 хв, зняті при кімнатній температурі в перпендикулярно прикладеному магнітному полі. Відпал при 700 °С протягом 30 хв тришарових композицій Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) призводить до збільшення коерцитивної сили до 10,64 кЕ. (рис. 3.20).

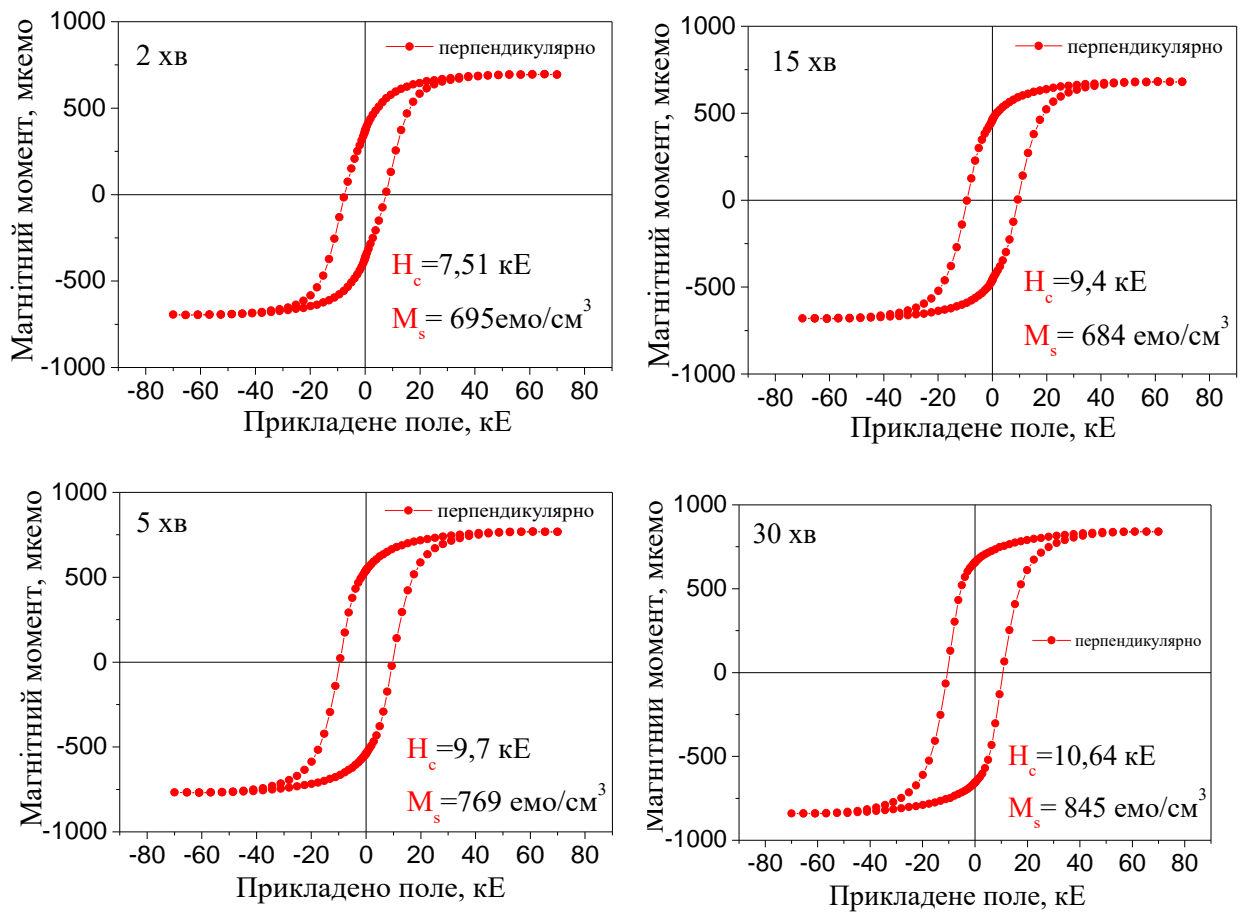


Рисунок 3.20 — Петлі гістерезису $M(H)$ плівки Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм)

Відношення M_r/M_s збільшується зі збільшенням тривалості відпалу (рис. 3.21), що свідчить про збільшення магнітно-твердих властивостей плівки.

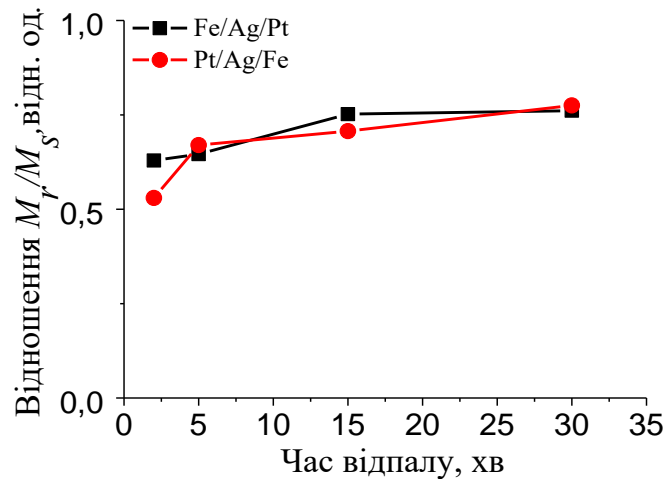


Рисунок 3.21 — Залежність відношення M_r/M_s від тривалості відпалу у вакуумі при 700 °C

Таким чином, з наведених результатів випливає те, що різна послідовність осадження Fe і Pt в плівковій композиції з проміжним шаром Ag дозволяє сформувати структуру плівки з різним розташуванням магнітно-м'якого Ag(Fe, Pt) і магнітно-твердого $L1_0$ FePt(Ag) шарів. Це пояснюється активізацією при відпалі спочатку переважної взаємодифузії Pt і Ag з утворенням твердого розчину Pt - Ag, потім дифузії Fe в цей твердий розчин з утворенням фази $L1_0$ FePt. Так як срібло не розчиняється в фазі $L1_0$ FePt, то воно витісняється до поверхні плівки, або до межі поділу з підкладкою. Таким чином, магнітно-м'який шар Ag(Fe, Pt) замінює шар Pt.

3.4 Висновки до розділу 3

В роботі вивчено дифузійне формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt в тришарових плівкових композиціях Fe(15 нм)/Ag/Pt(15 нм) і Pt(15 нм)/Ag/Fe(15 нм) з проміжним шаром Ag товщиною 10 нм.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність дипломної роботи (ДР)

Неперервний розвиток комп'ютерних технологій потребує розробки нових носіїв інформації, з більшою густиною та стабільністю інформації. Найбільш розповсюдженим методом збереження цифрової інформації є запис її на жорсткі магнітні диски. Диски складаються з немагнітної основи, на яку нанесений магнітний записуючий шар (від 50 нм до 150 нм) на якому відбувається збереження інформації. Магнітний шар складається з феромагнітного матеріалу (оксиди або сплави на основі Co чи Fe). На сьогодні один біт інформації займає досить значну площу: ширина магнітної «доріжки» складає приблизно 0,75 мкм, довжина області, відведеної на один біт, дорівнює (50 – 70) нм, а отже щільність запису інформації становить не більше 100 Гбіт/дюйм². Збільшення щільності запису потребує зменшення розмірів магнітного домену. Проблемою на цьому шляху є те, що при зменшенні розмірів частинок, відбувається їх перехід у суперпарамагнітний стан. Це дестабілізує частинки та не дозволяє використовувати таку структуру в якості носія магнітного запису. Рішенням цієї задачі є розробка магнітних матеріалів з високою енергією магнітно-кристалічної анізотропії. В якості такого матеріалу себе добре зарекомендувала система FePt через її впорядковану структуру $L1_0$.

Під час осадження за кімнатної в плівках FePt формується невпорядкована фаза $A1$ -FePt, яка проявляє магнітно-м'які властивості та не може використовуватись в якості носія магнітного запису. Для отримання впорядкованої фази необхідно проводити наступну термічну обробку (відпал) або осаджувати на нагріту підкладку $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$.

4.2 Мета і завдання дипломної роботи

Метою роботи є дослідження формування структури і фазового складу нанорозмірних плівкових композицій Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe при термічній обробці у вакуумі.

Завданням даної роботи було:

- опрацювання наукових публікацій за обраною тематикою;
- розробка методики дослідження;
- виготовлення зразків та проведення відпалу;
- проведення рентгеноструктурного дослідження;
- дослідження магнітних властивостей методом ЕПР;
- дослідження морфології поверхні методом АСМ;
- встановлення залежності властивостей та структури плівки від температури відпалу;
- формування висновків та подання рекомендацій для подальшого дослідження

4.3 Розрахунок планових витрат на проведення дипломної роботи

Робота виконувалася на кафедрі Фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Планова кошторисна вартість (собівартість) ДР розраховувалась наступних статтях витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість матеріалів, необхідних для виконання ДР;
- вартість спеціального обладнання для проведення експерименту;
- службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати;

4.3.1 Витрати на оплату праці

Розрахунок заробітної плати науково-виробничого персоналу базується на визначенні трудомісткості робіт окремих виконавців та їхньої денної заробітної плати (враховуючи кількість виконавців, їхню кваліфікацію і завантаженість роботою на різних етапах ДР).

У виконанні нашої ДР приймали участь п'ять виконавців: професор (доктор технічних наук), науковий співробітник, молодший науковий співробітник, провідний інженер та інженер 2 кат. Для КПІ ім. Ігоря Сікорського тарифні ставки сумарної місячної заробітної плати складають:

- професора – 19438 грн.;
- науковий співробітника – 9956 грн,
- провідного інженера – 8552 грн,
- та інженер 2 кат. – 8233 грн,
- молодшого наукового співробітника – 6324 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, що при п'ятиденному робочому тижні становить 21,2. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає:

- професора – 916,88 грн.;
- науковий співробітник – 469,62 грн.;
- провідного інженера – 403,39 грн.;
- інженера 2 кат. – 388,35 грн.;
- молодшого наукового співробітника – 298,3 грн.;

У випадку відсутності відповідних розрахункових методик трудомісткості різних етапів виконання ДР встановлюється на базі експертних оцінок, які дають провідні фахівці. При цьому ДР розглядається як сукупність макроетапів, аналіз кожної окремої операції не проводиться[34].

Результати експертної оцінки трудомісткості етапів ДР наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання ДР [34]

Макростапи НДР	Трудомісткість за виконавцями , люд.-дні				
	Провідний інженер	Науковий співробітник	Інженер 2 кат	Професор	М.н.с.
1. Аналіз фахових публікацій за теми	—	15	—	15	—
2. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	-	2	—	—
3. Розробка методики проведення досліджень за темою	2	6	6	2	2
4. Проведення експерименту 4.1 Виготовлення зразків 4.2 Проведення термічної обробки 4.3 Електронографічний аналіз 4.4 ЕПР 4.5 АСМ	—	30	60	—	—
5. Обговорення результатів НДР	6	15	—	20	4
Всього	10	66	68	37	6

Величина фонду заробітної плати виконавців (ФЗП) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з них:

$$\PhiЗП = 37 \cdot 916,88 + 66 \cdot 469,62 + 68 \cdot 388,35 + 403,39 \cdot 10 + 298,3 \cdot 6 = 97\,150,98 \text{ грн.}$$

4.3.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок складає 22 % від заробітної плати.

$$B_C = 0,22 \cdot 67\,238,77 = 21\,373,21 \text{ грн.}$$

4.3.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень

Для проведення необхідних досліджень було виготовлено 8 зразків, проведення досліджень не потребувало додаткових матеріалів. Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в таблиці 4.2. Транспортно-заготівельні витрати приймаємо у розмірі 10 % від вартості матеріалів:

$$2980 \cdot 0,1 = 298 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Плівки FePt(5 нм)	шт.	8	500	2 080
Папір	пачка	1	100	100
Картидж для принтера	шт.	1	800	800
Всього				2 980

Повна сума витрат на матеріали складає: $2\,980 + 298 = 3\,278$ грн.

4.3.4 Витрати на спеціальне обладнання

При виконанні ДР усі роботи проводилися з використанням наявного обладнання в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4.3.5 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної ДР сторонні організації участі не приймали.

4.3.6 Витрати на службові відрядження

Усі роботи, пов'язані з виконанням ДР за даною темою, проведені в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського. Окремі службові відрядження не планувались.

4.3.7 Інші прямі невраховані витрати по темі

Інші прямі невраховані витрати плануються у розмірі 10 % від врахованих.

$$C_{\text{інші}} = 0,1 \cdot (97\,150,98 + 21\,373,21 + 3\,278) = 12\,180,22 \text{ грн.}$$

4.3.8 Накладні витрати

До накладних витрат відносяться витрати на заробітну плату адміністративно-управлінського, господарчого та допоміжного персоналу (разом з єдиним соціальним внеском), витрати на допоміжні виробництва, витрати на утримання та експлуатацію виробничих площ, наукових приладів та установок, витрати на охорону праці, техніку безпеки та екологію, фінансування підготовки кадрів, воєнізованої охорони і деякі інші [34].

Норматив відрахувань на накладні витрати для КПП ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 20 % планової сумарної вартості виконання ДР. Розраховуємо величину накладних витрат наступним чином:

$$H_B = 0,2 \cdot (97\,150,98 + 21\,373,21 + 3\,278 + 12\,180,22) = 26\,796,48 \text{ грн.}$$

4.3.9 Визначення планової коштовної вартості теми

Планова кошторисна вартість ДР визначається як сума витрат за окремими статтями калькуляції. Результати визначення вартості наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція коштовної вартості ДР [34]

Найменування калькуляційних статей	Позначення	Сума	
		грн.	%
1. Фонд заробітної плати	ФЗП	97 150,98	60,4
2. Єдиний соціальний внесок	В _с	21 373,21	13,29
3. Матеріали необхідні для виконання теми	С _м	3 278	2,07
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	С _{об}	—	—
5. Робота і послуги сторонніх організацій	С _{стор}	—	—
6. Витрати службові відрядження	С _{від}	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	С _{інш}	12 180,22	7,57
8. Накладні витрати	Н _в	26 796,48	16,67
Всього		160 778,89	100

Згідно з таблицею 4.3 загальна планова кошторисна вартість ДР складає:
 $V_{\text{др}} = 160\,778,89 \text{ грн.}$

4.4 Науково-технічна ефективність

Дослідження, що проводяться в даній роботі, мають пошуковий та теоретичний характер. Відповідно з цим прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту надзвичайно складний, оскільки відсутні повні дані відносно сфери використання результатів роботи, а також вихідні дані для розрахунку єдиновременних та поточних витрат. У такому випадку слід використовувати бальну систему оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки;
- можливість використання результатів;
- теоретичне значення та рівень новизни дослідження;
- складність виконання теми.

Частку сумарного річного економічного ефекту, що утвориться за кожною з перелічених шкал, позначають умовно відповідним номеру шкали коефіцієнтом (K_1 , K_2 , K_3 , K_4). Наведемо докладніше систему оцінки за кожною шкалою. Першою розглянемо шкалу важливості розробки.

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;

- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;

- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями – 5 балів.

- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;

- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

- внаслідок виконання ДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне – 6 балів;

- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів;

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень - 1 бал;

- роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

- роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

- робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень - 7 балів;

- робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 гривень - 9 балів.

Бальна оцінка економічної ефективності даної науково-дослідної роботи згідно табл. 4.4 становить: $B = 3 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5 = 450$.

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності ДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів	K_2	результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни	K_3	під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про	3
4. Складність проведення дослідження	K_4	роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний річний економічний ефект науково-дослідної роботи визначається :

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot B - E_{\text{Н}} \cdot V_{\text{ДР}}, \quad (4.1)$$

де 500 - умовна вартість одного балу, грн.;

$E_{\text{Н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_{\text{Н}} = 0,1 \div 0,5$, для нашого розрахунку обираємо $E_{\text{Н}} = 0,2$);

$V_{\text{ДР}}$ – витрати на виконання ДР (планова річна кошторисна вартість виконання ДР, для нашого розрахунку $V_{\text{НДР}} = 160\,778,89$ грн.).

Таким чином, умовний економічний ефект становить:

$$E_{\text{ДР}} = 500 \cdot 450 - 0,2 \cdot 160\,778,89 = 192\,844,22 \text{ грн.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності :

$$K_{\text{ДР}} = 192\,844,22 / 160\,778,89 = 1,2.$$

Отримана розрахункова величина коефіцієнта економічної ефективності НДР ($K_{\text{ДР}} = 1,2$) свідчить про доцільність виконання даної роботи.

4.5 Висновки до розділу 4

Розраховали планову кошторисну вартість (собівартість) ДР, яка склала 160 778,89 грн. Провели економічний аналіз доцільності даної науково-дослідницької роботи та виявили, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Вступ

Метою цього розділу є аналіз шкідливих та небезпечних факторів, при яких виникає небезпека ураження організму, тобто умов, що можуть привести до захворювання та травмування в процесі отримання та дослідження формування структури і фазового складу нанорозмірних плівкових композицій при термічній обробці у вакуумі, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та безпеку у надзвичайних ситуаціях. Нанорозмірні плівкові композиції Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe отримано магнетронним методом осадження з використанням мішеней з металів Fe, Pt та Ag високої чистоти (99,99 %) у пристрої В55. Для проведення термічної обробки у вакуумі було використано установку ВУП-5М.

При виконанні цієї дипломної роботи необхідно проаналізувати умову праці, тобто розглянути: мікроклімат лабораторії; склад повітря робочої зони; шум; вібрації; електрична та пожежна безпека.

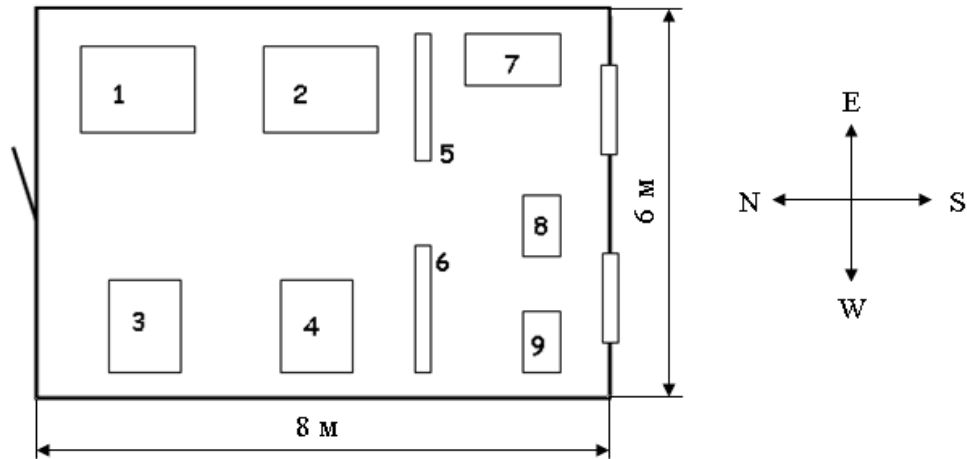
5.2 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні ДР

Науково-дослідницька робота виконувалась на кафедрі фізики металів КПП ім. Ігоря Сікорського в лабораторії електронографії №403, корпусу №19. Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів представлено на рис. 5.1. Було проведено вимірювання приміщення лабораторії та вікон, які наведені:

- розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 8 м, висота – 3,8 м.
- розміри вікон: ширина – 2,7 м, висота – 2,5 м.

Лабораторія, в якій працює п'ять чоловік має площу – 48 м^2 , об'єм – $182,4 \text{ м}^3$. Площа, яка приходить на одну людину – $9,6 \text{ м}^2$, об'єм – $36,48 \text{ м}^3$.

Приміщення, в якому виконувалася НДР, має наступні установки:



1 – електронограф EMP – 100; 2 – електронний мікроскоп ЕМВ – 100Л;
 3 – вакуумний універсальний пост ВУП–5М; 4 – вакуумний універсальний
 пост ВУП–5М; 5 – шафа для інструментів; 6 – книжкова шафа;
 7 – стіл письмовий; 8 – комп'ютер; 9 – комп'ютер

Рисунок 5.1 – Схема лабораторії в якій виконувалася НДР

Таким чином, площа та об'єм лабораторії, згідно з ДСанПІН 3.32-007-98, де на одну людину повинно приходиться не менше 6 м² площі та 20 м³ об'єму, відповідають нормам [33-39].

5.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення

Дуже важливою складовою для нормальної та комфортної працездатності людини – чисте повітря з оптимальною температурою, необхідною вологістю та швидкістю повітря.

Для забезпечення оптимального мікроклімату «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальні і допустимі температури, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт [36, 37].

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [36, 37] проведене дослідження відповідає категорії І б. Дана категорія передбачає легкі фізичні роботи до 150 ккал/год, які виконуються сидячи або стоячи та можуть супроводжуватись незначною фізичною напругою, а також роботи пов'язані з ходьбою. Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії № 403-19 показали, що при водяному опаленні в холодному періоді року температура становить приблизно 21 °С, фактична швидкість руху повітря – 0,1 м/с та відносна вологість – 70 %. В теплий період року при природньому повітря-обміну фактична температура становить 22 °С, швидкість руху повітря – 0,2 м/с та відносна вологість – 55 % (допустима – 60 % при 27 °С).

На основі вище написаного можна зробити висновок, що мікроклімат в лабораторії відповідає вимогам санітарних норм.

5.2.2 Засоби індивідуального захисту при виконанні дипломної роботи

5.2.2.1 Засоби індивідуального захисту при роботі з рентгенівським випромінюванням

Дослідження фазових та структурних перетворень в нанорозмірних плівках Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe проводилось методами рентгеноструктурного фазового аналізу на рентгенівському дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV, що знаходиться в лабораторії 103 інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона.

Рентгенівське випромінювання відноситься до електромагнітного випромінювання (фотонного), яке випромінюється при різкій зміні швидкості електрону. Рентгенівське випромінювання – короткохвильове електромагнітне випромінювання, довжина хвилі якого знаходиться в межах від 0,01 нм до 10 нм.

Джерелом рентгенівського випромінювання в лабораторних пристроях є рентгенівська трубка. Випромінювання створюється при зіткненні електронів, що летять від вольфрамового катоду, з анодом. Прискорююча напруга в трубці складала 50 кВ.

Рентгенівський дифрактометр є джерелом іонізуючого випромінювання. При закритих шторках вікон та без напруги на рентгенівській трубці дифрактометр є радіаційно-безпечним для обслуговуючого персоналу. Дифрактометр оснащений захисним склом, що містить солі свинцю, яке поглинає рентгенівське випромінювання. Радіаційний захист персоналу повинен бути організований таким чином, що між працівником та вихідним вікном рентгенівської трубки завжди знаходився захисний екран. Усі працюючі на дифрактометрі, повинні в обов'язковому порядку пройти інструктаж з техніки безпеки. Важливим вражаючим фактором іонізуючого випромінювання є іонізація молекул повітря, мікрочастинок та пилу. Потрапляння іонізованих 69 частинок в організм людини може завдати шкоду здоров'ю. Забезпечення безпечних умов праці досягається шляхом використання захисних пристроїв, організацією необхідних організаційно-технічних заходів та суворим виконанням правил техніки безпеки. Організаційно-технічні заходи включають раціональне розташування апаратури та допоміжних пристроїв.

Для забезпечення належного захисту працівників від опромінення в залежності від конструкції апаратури та особливостей досліджуваних зразків необхідно наступні заходи:

- визначення за допомогою дозиметрів безпечних зон і зон підвищеної небезпеки біля апарату;
- дозиметричний контроль;
- складання робочих інструкцій і правил техніки безпеки;
- мати індивідуальний фартух зі свинцем;
- мати індивідуальний дозиметр;
- захисні окуляри від рентгенівського випромінювання;
- екран, який зроблено із скла з кристалами свинцю встановленого на установці;
- заходи щодо ліквідації аварійної обстановки, спеціальне навчання і профогляди.

5.2.2.2 Засоби індивідуального захисту при роботі в умовах шуму та вібрації

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають в результаті ковалентного руху частинок у пружному середовищі. Науково-дослідницька робота виконувалась на установці ВУП–5М, під час роботи якої спостерігається деякий шум.

Під дією шуму відбувається зниження слухової чутливості, а отже й суттєве зниження продуктивності на робочому місці. Тому працівникам необхідно мати індивідуальні засоби захисту від шуму та вібрації:

- вкладки для вух та аналогічні засоби (протишумові вкладки);
- екрани та окуляри від механічних ушкоджень;
- рукавиці від механічних ушкоджень;
- захисні чоботи;

Робота на апаратах з відключеними або знятими захисними засобами суворо заборонена [34, 35].

5.2.3 Електробезпека

Відповідно до діючих правил побудови електричних пристроїв ПУЕ - 2017 приміщення лабораторії за небезпекою електротравм відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки [38]. Це сухі приміщення з оптимальною температурою повітря та струмонепровідною підлогою. Електричні пристрої, використані для виконання даної науково-дослідної роботи живляться напругою 220 В (вакуумний універсальний пост ВУП-5М) та 380 В (електронограф ЕМР – 100) з частотою 50 Гц.

Причинами ураження електричним струмом є :

- пошкодження ізоляції (наприклад, розплавлений метал) та, як наслідок, доступність до струмоведучих частин обладнання;

- поява напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки;

- невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неуважність при роботі.

Дія електричного струму на організм людини може мати небезпечні для здоров'я людини наслідки та призвести до смерті. При проходженні через тіло людини струм здійснює:

- термічний (опіки, пошкодження судин) вплив;
- електролітичний (розкладення органічних сполук) вплив;
- біологічний вплив.

Напруга доторкання і токи, які протікають через тіло людини при нормальному (неаварійному) режимі електроустановки, для струму з частотою 50 Гц не повинні перевищувати значення: $U_{\text{дот}} = 2,0 \text{ В}$ та $I = 0,3 \text{ мА}$.

У лабораторії захисне заземлення електроустаткування і приладів проведено правильно. Причиною можливого ураження електричним струмом можуть стати пробій на корпусі установки або пошкодження кабелів ізоляції.

5.2.4 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.07.005-86 [39] лабораторія за пожежною безпекою належить до категорії В, тому що в ній знаходяться тверді та важкогорючі матеріали та вона не належить до категорій А,Б.

У випадку пожежі у лабораторії може горіти:

- електроустановки та їхня проводка;
- паркет та штори;
- шафи та паперові документи, що знаходяться в них.

Виникнення пожеж у лабораторії можливо за наступними причинами:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електроустаткування;
- необережне звертання з вогнем;

- ремонт устаткування на ходу;
- неправильне користування устаткуванням.

Наприклад, якщо пожежа розпочнеться, то в лабораторії є водопровід, вогнегасник вуглекислотоброметиловий ОУБ-3, а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б, пожежні крани. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (оповісник КИ-1). Також в корпусі, на кожному поверсі є план евакуації (рис. 5.2).

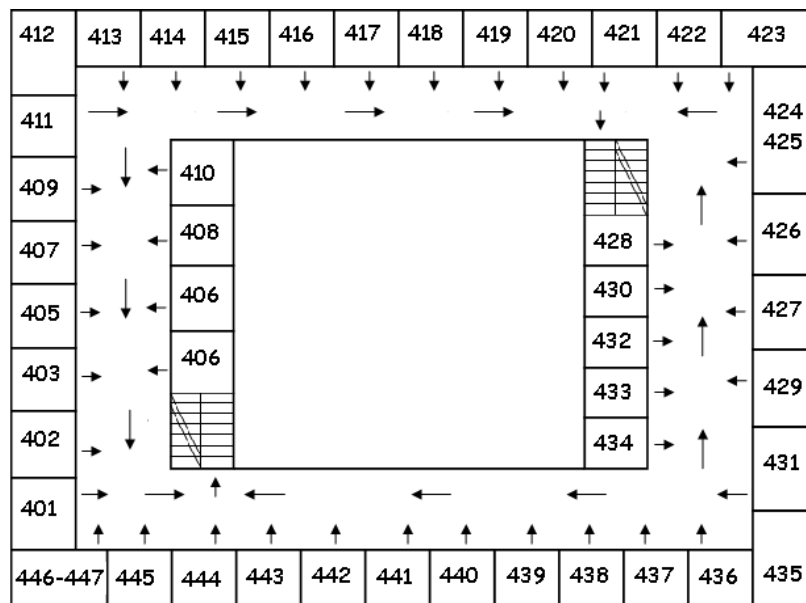


Рисунок 5.2 – План евакуації під час пожежі

5.3 Висновок до розділу 5

Проаналізовано параметри робочого приміщення: мікроклімату лабораторії, складу повітря робочої зони, електричної та пожежної безпеки. Все зафіксоване знаходиться в межах допустимих норм.

Встановлено, що при дотриманні встановлених санітарних норм в технологічних приміщеннях проведення ДР не порушує правил та заходів щодо охорони праці.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що у тришаровій плівковій композиції Fe/Ag/Pt/SiO₂(100 нм)/Si(001) впорядкована фаза L1₀ з коерцитивною силою 11,2 кЕ утворюється при відпалі у вакуумі за температури 800 °С протягом 30 с, що пов'язано з взаємною нерозчинністю Fe та Ag.

2. Показано, що у тришарових плівкових композиціях Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) при ізотермічному відпалі за температури 700 °С протягом 2 хв утворюється, як неупорядкована фаза A1, так і впорядкована фаза L1₀. Збільшення тривалості відпалу до 30 хв призводить до формування практично гомогенного сплаву FePt еквіатомного складу і збільшення кількості впорядкованої фази L1₀. Коерцитивна сила плівкових композицій Fe/Ag/Pt та Pt/Ag/Fe складає 13,2 кЕ та 10,6 кЕ, відповідно.

3. Визначено, що у тришаровій плівковій композиції Fe(15 нм)/Ag(10 нм)/Pt(15 нм) переважно ростуть зерна впорядкованої фази L1₀ з текстурою (111) та віссю легкого намагнічування *c*, розташованою в площині плівки.

4. Встановлено, що при зміні послідовності осадження шарів Fe і Pt срібло в процесі відпалу дифундує до межі поділу з підкладкою, або до поверхні плівки. Це пов'язано з направленою дифузією металів.

5. Проведено економічний аналіз доцільності науково-дослідницької роботи та виявлено, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

6. Визначено, що при дотриманні встановлених санітарних норм в технологічних приміщеннях проведення ДР не порушує правил та заходів щодо охорони праці.

CONCLUSION

1. It is established that in the three-layer Fe/Ag/Pt/SiO₂/Si film composition the ordered L1₀ phase with coercivity of 11.2 kE by annealing in vacuum at a temperature of 800 °C for 30 s is formed, which associated with mutual insolubility of Fe and Ag.
2. It is shown that in three-layer film compositions Fe/Ag/Pt and Pt/Ag/Fe on SiO₂(100 nm)/Si(001) substrates at isothermal annealing at a temperature of 700 °C for 2 min both disordered *A1* phase and ordered L1₀ phase are formed. Increasing the annealing duration to 30 min leads to the formation of a virtually homogeneous FePt alloy of equiatomic composition and increase the amount of ordered phase L1₀. The coercivity of the Fe/Ag/Pt and Pt/Ag/Fe film compositions is 13.2 kE and 10.6 kE, respectively.
3. It is determined that in the three-layer Fe(15 nm) Ag(10 nm)/Pt(15 nm) film composition mainly grow grains of the ordered L1₀ phase with a (111) texture and the *c*-axis of easy magnetization the located in the film plane.
4. It is established that when the sequence of deposition of Fe and Pt layers changes, silver diffuses in the annealing process to the interface with the substrate or to the film surface. This is due to the directed diffusion of metals.
5. The economic analysis of expediency of research work is carried out and it is found out that this research is expedient from the economic point of view.
6. It is determined that in compliance with the established sanitary norms in the technological premises of the DR does not violate the rules and measures for labor protection.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Piramanayagam S. N. Development in Data Storage: Materials Perspective [Text] / S. N. Piramanayagam, T. C. Chong. – New York : John Wiley and Sons, 2011. – 352 p.
2. Prevention of dewetting during annealing of FePt films for bit patterned media applications [Text] / A. T. McCallum, P. Krone, F. Springer [et. al.] // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 101, Is. 9. – 5 p.
3. L1₀ FePtX–Y media for heat-assisted magnetic recording / D. Weller, O. Mosendz, G. Parker, S. Pisana [et al.] [Text] / Physica status solidi. – 2013. – Vol. 210, Is. 7. – P: 1237 – 1460.
4. Review Article: FePt heat assisted magnetic recording media / D. Weller, G. Parker, O. Mosendz [et al.] [Text] / Journal of Vacuum Science & Technology. – 2016. – Vol. 34. – 11 p.
5. Piramanayagam S. N. Perpendicular recording media for hard disk drives / S. N. Piramanayagam [Text] // Journal of applied physics. – 2007. – № 102. – 23 p.
6. Weller D. Extremely high-density longitudinal magnetic recording media [Text] / D. Weller, M.F. Doerner // Annual review of materials science. – 2000. – №. 30. – P. 611– 644.
7. Structural Characterization of FePd, FePt, and CoPt Alloy Thin Films Epitaxially Grown on (001) Surface of Different Single-Crystal Materials [Text] / Y. Numata, A. Itabashi, M. Ohtake [et al.] // Magnetism, IEEE Transactions on. – 2014. – Vol. 50, No. 1. – P. 1 – 4.
8. A comparison of rapid-annealed FePt and FePd thin films: Internal stress, L1₀ ordering, and texture [Text] / S. N. Hsiao, S. H. Liu, C. C. Chen [et al.] // Vacuum. – 2016. – Vol. 125. – P. 1 – 5.
9. Эллиот Р. П. Структура двойных сплавов / Р. П. Эллиот. – М. : Металлургия, 1970. – 498 с.

10. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Н. П. Лякишев. – М. : Металлургия. – Т. 2, 1997. – 1050 с.
11. Фазова діаграма системи Ag-Fe [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://resource.npl.co.uk /mtdata/phdiagrams/agfe.htm](http://resource.npl.co.uk/mtdata/phdiagrams/agfe.htm) – Назва з екрану. – Дата перегляду: 5.06.2021.
12. Фазовая диаграмма системы Ag-Pt [Электронный ресурс].– Режим доступу: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Ag-Pt.php> – Назва з екрану. – Дата перегляду: 5.06.2021.
13. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справочник [Текст] / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова и др.– М. : Металлургия. – 1986. – 440 с.
14. Binary Alloy Phase Diagrams [Text] / Т. В. Massalski, Н. Okamoto, Р. R. Subramanian [et al.]. – ASM international, 1990. – 3589 p.
15. Magnetic anisotropy and order structure of L10-FePt (001) single-crystal films grown epitaxially on (001) planes of MgO, SrTiO₃, and MgAl₂O₄ substrates [Text] / A. Hotta, T. Ono, M. Hatayama [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115, № 17. – 712 p.
16. Ohtake M. L1₀ ordered phase formation in FePt, FePd, CoPt, and CoPd alloy thin films epitaxially grown on MgO (001) single-crystal substrates [Text] / M. Ohtake, S. Ouchi, F. Kirino, M. Futamoto // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111. – № 7. – 708 p.
17. Tokuoka Y. Effect of Ag addition to L10 FePt and L10 FePd films grown by molecular beam epitaxy [Text] / Y. Tokuoka, Y. Seto, T. Kato, S. Iwata // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115, No. 17. – 716 p.
18. Формування хемічно впорядкованої фази L10(FePt) в нанорозмірній плівковій композиції Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Au(30 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) при відпалі в вакуумі [Текст] / Ю. М. Макогон, О. П. Павлова, С. І. Сидоренко [та ін.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2014. – Т. 36.- № 11. – С. 1513 – 1522
19. Вплив товщини проміжного шару Ag на фазові перетворення в тонкоплівкових композиціях FePt/Ag/FePt [Текст] / І. А. Владимирський,

I. О. Круглов, М. Ю. Вербицкая, О. В. Фигурна // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2015. – № 5. – С. 73 – 80.

20. Влияние толщин отдельных слоёв и границ раздела на фазовый состав и магнитные свойства многослойных плёночных композиций Pt/Fe [Текст] / М. Ю. Вербицкая, Е. А. Холина, Т. И. Вербицкая, Ю. Н. Макогон // Металлофізика та новітні технології. – 2016. – Т. 38, № 12, С. 1587 – 1598.

21. Вплив напруженого стану на формування фази L10-FePt в плівці Fe₅₂Pt₄₈(15 нм) на підкладці Al₂O₃ [Текст] / М. Ю. Вербицкая, М. Н. Шаміс, К. В. Сліпченко [та ін.] // Металлофізика та новітні технології. – 2017. – Т. 39, № 1, С. 105 – 115.

22. Влияние Au на формирование фазы L10 в наноразмерных пленках [Fe₅₀Pt₅₀/Au/Fe₅₀Pt₅₀]_n [Текст] / М. Ю. Вербицкая, М. Н. Шаміс, К. А. Грайворонская [та ін.] // Металлофізика та новітні технології – 2018. – Т. 40, № 3, С. 381 – 395.

23. Формування впорядкованої фази L1₀-FePt у плівках Fe₅₀Pt₅₀/Au/Fe₅₀Pt₅₀ при відпалі у водні [Текст] / М.Ю. Вербицкая, М.Н. Шаміс, П.В. Макушко [та ін.] // Металлофізика та новітні технології. – 2018. – Т. 40, № 8. – С. 1069 – 1079.

24. Effects of Ag underlayers on the microstructure and magnetic properties of epitaxial FePt thin films [Text] / Y. N. Hsu, S. Jeong, D. E. Laughlin, D. N. Lambeth // Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol. 89. – P. 7068-7070.

26. Дифрактометр Rigaku Ultima IV. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.rigaku.com/ru/products/xrd/ultima> – Назва з екрану. – Дата перегляду: 5.06.2021.

27. Горелик С. С. Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ [Текст] / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков // М. : Металлургия. – 1970. – 366 с.

28. Русаков А. А. Рентгенография металлов. Учебник для вузов [Текст] / А. А. Русаков / М. : Атомиздат. – 1977. – 480 с.

29. Secondary neutral mass spectrometry (SNMS)-recent methodical progress and applications to fundamental studies in particle/surface interaction [Electronic

resource]. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016811769404122N>. – Title on the screen. – Data of view: 5.06.2021

30. Quantitative comparison between Auger electron spectroscopy and secondary ion mass spectroscopy depth profiles of a double layer structure of AlAs in GaAs using the mixing-roughness-information depth model [Electronic resource]. – Access mode: – <https://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.1345899>. – Title on the screen. – Data of view: 5.06.2021

31. Великанов Д. А. Сквид-магнитометр для исследования магнитных свойств материалов в интервале температур 4,2 -370 К [Текст] / Д. А. Великанов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2013. – № 2. – Р. 48.

32. Magnetic Property Measurement System SQUID VSM User's Manual Part Number [Electronic resource]. – Access mode: <https://manualzz.com/doc/6686090/magnetic-property-measurement-system-squid-vsm-user-s-manual>. – Title on the screen. – Data of view: 5.06.2021.

33. Справочник по охране труда [Текст] / К. Н. Ткачук, Д. Д. Иванчук, Р. В. Соборно, А. Г. Степанов – Н. : Техника, 1991. – 285 с.

34. Документація. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПІН 3.3.2.007-98 [Текст]. – [Чинний від 1998-12-10]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1998. – 11 с.

35. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99 [Текст]. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 10 с.

36. Документація. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації: ДСН 3.3.6.039-99 [Текст]. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 11 с.

37. Документація. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : ДНАОП 0.00–1.21–98 [Текст]. – [Чинний від 1998-02-20]. – К. : Державний комітет України по нагляду за охороною праці, 1998. – 20 с.

38. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст]. – К. : Держстандарт України, 1999. – 16 с.