

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

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

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне
моделювання в матеріалознавстві»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Процеси впорядкування у нанорозмірних плівках FePt/FePd та
FePd/FePt під час відпалу у водні»**

Виконала:

Здобувач в.о. IV курсу, групи ФМ-п11

Городнича Дар'я Олегівна

Керівник:

ст. викл., к.т.н., Вербицька Тетяна Іванівна

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з економічно-організаційного розділу

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

Консультант з питань нормконтролю:

ст. викл. Шаповалова Н.А.

Рецензент:

д.т.н., проф. каф. ВТМіПМ Мініцький А.В.

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

Здобувач в.о. _____

Київ – 2024 року

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

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»
Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу в.о.

Городничій Дар'ї Олегівні

1. Тема роботи «Процеси впорядкування у нанорозмірних плівках FePt/FePd та FePd/FePt під час відпалу у водні», керівник роботи Вербицька Тетяна Іванівна, к.т.н., затверджені наказом по університету від « 30 » травня 2024 р. № 2209-с
2. Термін подання здобувачем в.о. роботи : 10.06.2024.
3. Вихідні дані до роботи: дифрактограми, електроннограми, результати переддипломної практики.
4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 76 сторінок, 9 таблиць, 35 рисунків.

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. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст.викл.		

7. Дата видачі завдання 15.04.2024.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	15.04.2024	
	Огляд літератури	09.05.2024	
	Освоєння методик дослідження	16.05.2024	
	Виконання експериментальних досліджень	23.05.2024	
	Отримання результатів, їх аналіз	30.05.2024	
	Оформлення дипломної роботи	06.06.2024	
	Попередній захист	07.06.2024	
	Захист на засідання ЕК	17.06.2024	

Студент

Дар'я ГОРОДНИЧА

Керівник

Тетяна ВЕРБИЦЬКА

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 76 сторінки, 9 таблиць, 35 рисунків, 46 літературних джерел.

ВІДПАЛ, ВПОРЯДКУВАННЯ, ГІДРОГЕН, ПЛІВКА, СТРУКТУРА, $L1_0$ FePd, $L1_0$ FePt, ФАЗА

Об'єкт дослідження: термічно активовані процеси впорядкування у нанорозмірних плівках FePt/FePd та FePd/FePt.

Предмет дослідження: нанорозмірні плівки FePt/FePd та FePd/FePt, які осаджені на підкладку Si(100 нм)/Si(001).

Мета роботи: виявлення закономірностей формування впорядкованої фази $L1_0$ у нанорозмірних плівках FePt/FePd та FePd/FePt на підкладках Si(100 нм)/Si(001) під час відпалу у середовищі водню.

Методи дослідження: рентгеноструктурний фазовий аналіз, електронографічний аналіз, скануюча електронна мікроскопія.

Результати дослідження та їх новизна: виявлено, що термічна обробка плівок FePt/FePd та FePd/FePt у середовищі водню в інтервалі температур 500 °C – 700 °C призводить до формування впорядкованої фази $L1_0$.

Сфера застосування: середовище для термічно активованого магнітного запису та зберігання інформації з підвищеною щільністю, наноелектроніка, спінтроніка.

ABSTRACT

Diploma work: 76 pages, 8 tables, 35 figures, 46 references.

ANNEALING, ORDERING, FILM, HYDROGEN, STRUCTURE, $L1_0$ FePd, $L1_0$ FePt, PHASE

Object of the study: thermally activated ordering processes in nanoscale FePt/FePd and FePd/FePt films.

Subject of the study: nanoscale FePt/FePd and FePd/FePt films deposited on a $\text{SiO}_2(100 \text{ nm})/\text{Si}(001)$ substrate.

Aim of the study: detection of the regularities of the formation of the ordered $L1_0$ phase in nanoscale FePt/FePd and FePd/FePt films on the $\text{SiO}_2(100 \text{ nm})/\text{Si}(001)$ substrates during annealing in a hydrogen environment.

Research methods: X-ray diffraction analysis, Electronographic analysis, Scanning Electron Microscopy.

Results and novelty: it has been found that thermal treatment of FePt/FePd and FePd/FePt films in a hydrogen environment within the temperature range of 500 °C to 700 °C leads to formation of the ordered $L1_0$ phase.

Fields of application: nanoelectronics, materials for functional layers of spintronic devices, materials for magnetic storage devices with high recording density.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Основи магнітного запису.....	10
1.1.1 Історія магнітного запису.....	10
1.1.2 Магнітний запис	11
1.2 Види технологій магнітного запису інформації.....	13
1.2.1 Поздовжній метод	13
1.2.2 Перпендикулярний метод	14
1.2.3 Термічно активований магнітний запис	15
1.3 Магнітні властивості тонких плівок	16
1.3.1 Плівки FePt з високими магнітними характеристиками для запису і зберігання інформації	16
1.3.2 Плівки FePd для запису і зберігання інформації.....	18
1.3.3 Взаємодія Pt, Pd та Fe із воднем	19
1.4 Висновки до розділу 1	20
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1 Матеріали дослідження	22
2.2 Технологія виготовлення тонких плівок	22
2.3 Методики дослідження	24
2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз.....	24
2.3.2 Електронографічний аналіз.....	26
2.3.3 Скануюча електронна мікроскопія	28
2.4 Висновки до розділу 2	28
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	30
3.1 Формування фазового складу та структури у плівках FePt/FePd та FePd /FePt на підкладках SiO ₂ (100 нм)/Si(001) під час відпалу у водні....	30
3.2 Електрографічний аналіз плівок FePt/FePd та FePd/FePt	40
3.3 Дослідження поверхні плівок FePt/FePd та FePd/FePt методом скануючої електронної мікроскопії.....	42

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	46
4.1 Науково-технічна актуальність.....	46
4.2 Розрахунок собівартості роботи	46
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	47
4.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску.....	49
4.2.3 Витрати на матеріали для досліджень	49
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя.....	49
4.2.5 Витрати на послуги сторонніх організацій	50
4.2.6 Витрати на службові відрядження.....	50
4.2.7 Енергоносії для проведення досліджень	50
4.2.8 Інші прямі невраховані витрати.....	50
4.2.9 Накладні витрати	50
4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	51
4.3 Науково-технічна ефективність НДР	52
4.4 Висновки до розділу 4	56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	56
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні ДР	56
5.1.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення	58
5.1.2 Небезпечні чинники при роботі з піччю Siemens-Plama	59
5.1.3 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрацій	62
5.1.4 Аналіз освітленості приміщення	63
5.1.5 Електробезпека	64
5.1.6 Аналіз продуктивності вентиляції	65
5.1.7 Інженерні рішення та засоби індивідуального захисту	66
5.1.8 Пожежна безпека	67
5.1.9 Алгоритм дій під час повітряної тривоги	68
5.2 Висновок до розділу 5	69
ВИСНОВКИ	70
CONCLUSIONS	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОЦК – об’ємноцентрована кубічна ґратка;

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка;

ГЦТ – гранецентрована тетрагональна ґратка;

ТАМЗ – термічно активований магнітний запис;

ОКР – область когерентного розсіювання.

ВСТУП

Завдяки винаходу магнітної стрічки та жорсткого диска магнітний запис став основною технологією в галузі зберігання інформації. З моменту винаходу першого комерційного жорсткого диска щільність площі зросла на дев'ять порядків. Однією з ключових вимог сучасності до носіїв інформації є здатність зберігати та маніпулювати великим обсягом даних [1].

Виготовлення сучасних великомістких магнітних накопичувачів базується на використанні нанорозмірних композицій. Завдяки впровадженню нових магнітних компонентів та вдосконаленню технологій виготовлення тонких шарів накопичувача, щільність запису даних на поверхні швидко зростає. Доручення зменшення розмірів під час розробки носіїв інформації з надзвичайною щільністю магнітного запису потребує врахування зміни фізичних властивостей і встановлення закономірностей утворення кристалічної структури в наноплівках [1].

Плівки на основі впорядкованої фази $L1_0$ -FePt(FePd) з вираженою текстурою [001], утворені шляхом термічної обробки плівок зі структурою неупорядкованої фази $A1$ -FePt(FePd), характеризується значною анізотропією магнітних властивостей, що відкриває перспективи його практичного використання в якості носія магнітного запису [2].

Таким чином, дослідження впливу фізико-технологічних параметрів термічної обробки або введення додаткових металевих шарів у нанорозмірні плівкові композиції FePt/FePd та FePd/FePt на формування їх структури та фазового складу, магнітних властивостей, концентраційних розподілів і кінетику дифузійних процесів для утворення впорядкованої фази $L1_0$ під впливом термічної обробки є актуальним як у науковому, так і в практичному відношенні.

Тому метою цієї роботи є виявлення закономірностей формування впорядкованої фази $L1_0$ у нанорозмірних плівках FePt/FePd та FePd/FePt на підкладках Si(100 нм)/Si(001) під час відпалу у середовищі водню.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Основи магнітного запису

1.1.1 Історія магнітного запису

Магнітний запис людського голосу вперше здійснено в 1898 році данським інженером, по імені Поульсен. Запис було зроблено на феромагнітний дріт, але через відсутність підсилювачів якість запису виявилась дуже низькою. У 1927 році, одночасно в США і Німеччині було винайдено магнітну стрічку.

Перший жорсткий диск з'явився в 1927 році в корпорації ІВМ (рис. 1.1) завдяки провідному інженеру Рейнольду Джонсону, який очолив нову дослідницьку лабораторію. У ті роки пріоритетним завданням став пошук альтернативних накопичувачів з високою ємністю інформації та широким доступом в протизагаду надзвичайно повільним перфокартам [3–5].

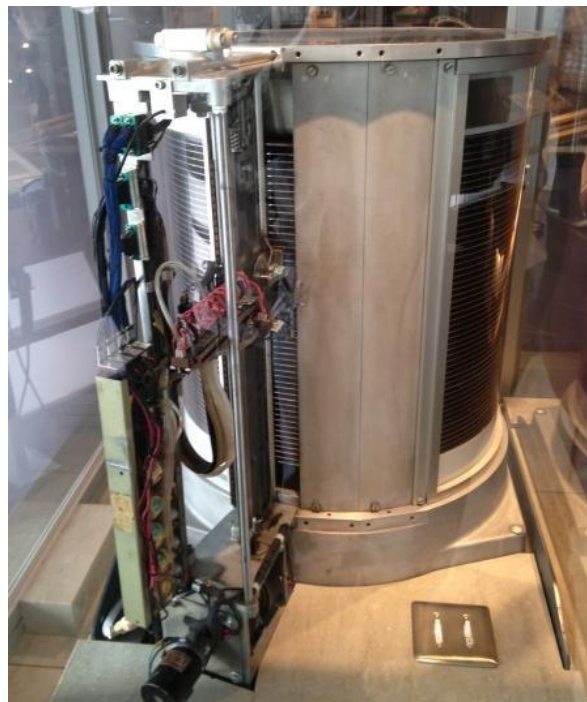


Рисунок 1.1 – Перший жорсткий диск для комп'ютера
IBM 305 RAMAC [5]

Результатом п'ятирічної праці команди Рейнольда стало створення в

1955 році накопичувача на жорстких дисках IBM 350 Disk File, який у 1956 році увійшов до складу IBM RAMAC.

Накопичувач складався з 50 дисків діаметром 24 дюйми, що оберталися зі швидкістю 1200 обертів за хвилину. Середній час доступу до довільної комірки становив 1 с, щільність запису – 2 Кбіт на квадратний дюйм, ємність становила 5 Мбайт. Розмір накопичувача був порівняний з двома сучасними двокамерними холодильниками [4].

1.1.2 Магнітний запис

Магнітний запис ґрунтується на феромагнітних властивостях речовин, які можуть не втрачати намагніченість при умовах відсутності магнітного поля (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Магнітні властивості феромагнітних матеріалів [2]

Матеріал	K_u , 10^7 ерг/см ³	M_s , емо/см ³	H_k , кЕ	T_c , К
CoPtCr	0,2	298	13,7	–
Co	0,45	1400	6,4	1404
Co ₃ Pt	2,0	1100	116	750
FePd	1,8	1100	33	760
FePt	6,6-10	1140	116	750
CoPt	4,9	800	123	840
MnAl	1,7	560	69	650
Fe ₁₄ Nd ₂ B	4,6	1270	73	585

Магнітний запис спирається на накладення магнітного поля, отриманого від електричного сигналу, на магніточутливе середовище, яке стає намагніченим. Магнітним носієм, який використовується в аналоговому записі, є магнітна стрічка: тонка пластикова стрічка з довільно орієнтованими мікроскопічними магнітними частинками, приклеєними до поверхні. Магнітне поле головки запису змінює магнітну поляризацію (а не фізичну орієнтацію) крихітних частинок так, що вони вирівнюють свої магнітні домени з накладеним полем: чим сильніше накладене поле, тим більше частинок

вирівнює свої орієнтації з полем, поки всі частинки не будуть намагнічені. Збережена картина намагніченості представляє сигнал. Коли намагнічений носій переміщується повз головку для читання, виникає електричний сигнал, який виробляється індукцією. На жаль, процес за своєю суттю дуже нелінійний, тому результуючий сигнал відтворення відрізняється від вихідного сигналу.

Процес запису починається з перетворення головкою запису електричного сигналу на магнітне поле, яке створює візерунок намагніченості в крихітних магнітних частинках стрічки. Головка складається з тороїдального сердечника з невеликим повітряним отвором. Котушка дроту намотана навколо сердечника, виготовленого з магнітопроникного металу. Подібно до трансформатора, головка запису перетворює електричний сигнал на змінне магнітне поле. Оскільки отвір у головці має високий опір (магнітний еквівалент електричного опору), поле проходить через менший опір магнітної стрічки, коли вона рухається повз зазор. Коли стрічка віддаляється від отвору, магнітний потік (магнітний еквівалент струму) зменшується обернено пропорційно квадрату відстані. На певній відстані від отвору він уже недостатньо сильний, щоб впливати на магнітні частинки стрічки, і зберігається візерунок намагніченості, який існував на той момент. Це означає, що фактичний запис відбувається на так званому «задньому краї» отвору, а не по всій його довжині.

Для деякого збільшення рівня сигналу намагніченість, що залишається на стрічці, зростає лінійно. На високих рівнях сигналу все менше магнітних частинок залишається для намагнічування, і стрічка поступово насичується, поки всі частинки не будуть намагнічені. Коли прикладене поле змінює напрямок, з намагніченим матеріалом нічого не відбувається, доки напруженість прикладеного поля не перевищить коерцитивну силу матеріалу. Врешті-решт, зворотне накладене поле починає змінювати магнітну поляризацію, попередньо збережену на стрічці. Цей ефект називається гістерезисом: магнітні домени стрічки не змінюються лінійно з накладеним сигналом, а «пам'ятають» свій попередній стан, доки зворотне поле не стане

достатньо сильним, щоб перенамагнітити їх. Загальна намагніченість стрічки є сумою магнітних полів окремих доменів. Оскільки доменів дуже багато, загальне поле виглядає неперервним, хоча насправді це є результатом великої кількості окремих доменів, які роблять стрічку здаватись безперервно намагніченою [4].

1.2 Види технологій магнітного запису інформації

1.2.1 Поздовжній метод

При технології повздовжнього магнітного запису (рис. 1.2) магнітні домени в тонкоплівковому шарі запису орієнтуються паралельно до площини носія. За допомогою поздовжнього магнітного запису можна досягти щільності до $(1 - 30) \text{ Гбіт/дюйм}^2$ [6].

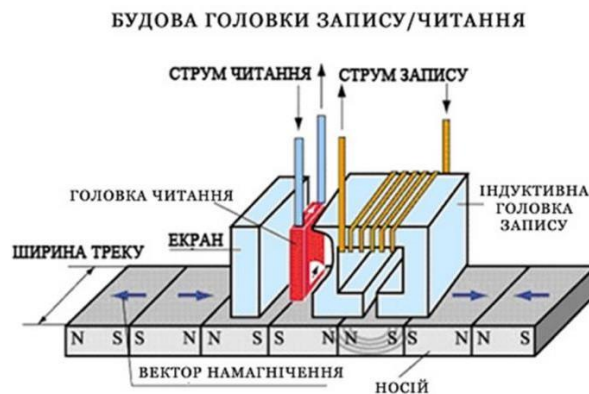


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення поздовжнього запису [7]

Магнітні середовища представляли собою декілька функціональних шарів, необхідних для досягнення бажаних експлуатаційних характеристик. В якості шару магнітного носія використовувався полікристалічний матеріал, зерна якого мали хаотичну орієнтацію по відношенню до площини плівки і по відношенню до напрямку магнітних доріжок, крім того, вони мали випадковий розподіл розмірів і випадкову орієнтацію осей легкого намагнічування. Для збільшення щільності магнітного запису необхідне зменшення середнього

розміру зерен. Збільшення кількості зерен, які мають вісь легкого намагнічування паралельну напрямку магнітної доріжки є шляхом зменшення впливу випадковості в природі зерен на процес запису інформації [8].

1.2.2 Перпендикулярний метод

Зростання щільності магнітного запису спонукало промисловців та вчених перейти на перпендикулярний запис, схематичне зображення (рис. 1.3.).

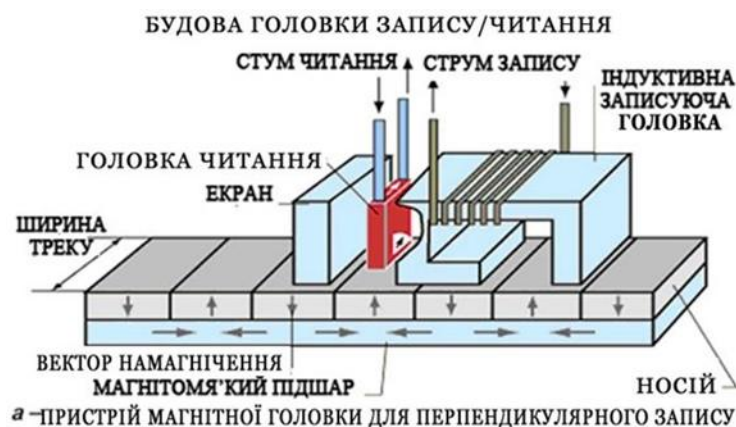


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення перпендикулярного запису [7]

У звичному повздовжньому магнітному записі магнітні домени в тонкій плівці на поверхні диска орієнтуються до поверхні паралельно. У перпендикулярному методі ці домени орієнтуються перпендикулярно до плівки, а саме вертикально до поверхні та напрямку руху головки (рис. 1.3). Це дає змогу набувати більшої щільності магнітного запису порівняно з попередньою технологією. Шар під поверхнею дозволяє фокусувати магнітний потік під час запису і розміщувати домени неподалік один до одного. Якщо збільшувати щільність магнітного запису без зменшення розміру зерен, то переходи намагніченості стануть більше шумними, що спричинить велику кількість недоліків при зчитуванні. Тому для того щоб отримати вищу щільність магнітного запису, треба зменшувати розмір зерен. Ця методика стала доволі ефективною, але з іншої сторони комірки стали настільки

маленькими, що їх подальше зменшення призводить до нестабільності намагніченості, що проявляється ефектом суперпарамагнетика. Щоб збільшити щільність запису треба продовжувати зменшувати розмір зерен і забезпечити їх термічну стабільність, обираючи матеріали з вищою магнітною жорсткістю. Кардинальне збільшення щільності буде можливим, якщо зменшувати область зберігання біту до розміру одного кристалічного зерна. Теоретично існує два рішення, які дозволили б цього добитися: одне – на основі електронно-іонних методів літографії, інше – шляхом створення структури, що само організується [9–11].

1.2.3 Термічно активований магнітний запис

Термічно активований магнітний запис (ТАМЗ) - це місцева область, де магнітний запис відтворюється у певний момент часу, яка точково підігрівається лазером до високої температури, приблизно в декілька сотень градусів за Цельсієм (рис. 1.4). Під час нагрівання магнітні домени у матеріалі з високою анізотропією стають більш рухливими, що сприяє записуванню, і після швидкого охолодження поворот домену ускладнюється. За допомогою цієї технології спершу формують впорядковано-гранулярну структуру магнітної плівки, розміри періодично розташованих наночасток в якій мають декілька нанометрів. Застосування утвореної структури магнітного шару збільшить щільність запису до (9-10) Тбіт на квадратний дюйм, що надає можливість покращити щільність запису в порівнянні з перпендикулярним [12].

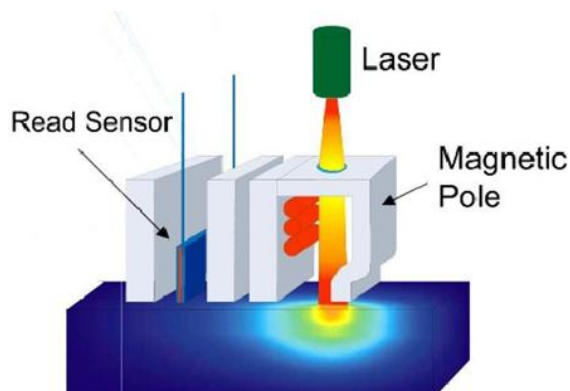


Рисунок 1.4 – Схема термічно активованого магнітного запису [12]

Ця технологія дає можливість уникати труднощі магнітного запису, які пов'язані з великою коерцитивною силою фази $L1_0$ -FePt/FePd і використовувати вказану властивість для збільшення стабільності зберігання інформації.

1.3 Магнітні властивості тонких плівок

1.3.1 Плівки FePt з високими магнітними характеристиками для запису і зберігання інформації

Подвійна діаграма фазової рівноваги системи Fe-Pt (рис. 1.5) вказує, що впорядкована фаза $L1_0$ -FePt формується в близькому до еквіатомного інтервалі концентрацій за підвищених температур.

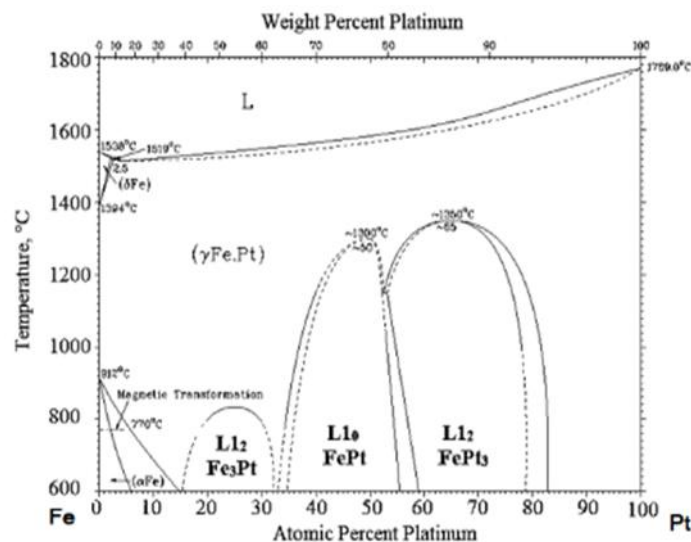


Рисунок 1.5 – Діаграма фазової рівноваги системи Fe-Pt [13]

Відомо, що на структуру і фазовий склад, що формуються в результаті термічної обробки плівкових композицій на основі FePt, і, відповідно, магнітні властивості, що ними обумовлюються значний вплив чинить велика кількість факторів: фізико-технологічні параметри термічної обробки, дефектність структури, тип підкладки і т.п. Припускається, що на процеси дифузійного фазоутворення також має вплив енергія напруженого стану, що виникає на

границях розділу між шарами плівкових композицій в результаті невідповідності параметрів їх кристалічної будови і температурних коефіцієнтів лінійного розширення.

Тонкі металеві плівки, що складаються з упорядкованої фази $L1_0$ -FePt і мають гранецентровану тетрагональну ґратку, представляють собою перспективні матеріали для створення нового покоління магнітних носіїв інформації. Ці матеріали сприятимуть досягненню максимальної щільності магнітного запису та збереження інформації.

Фаза $L1_0$ -FePt має енергією магнітокристалічної анізотропії 7×10^6 Дж/м³ (що в 1 млн. разів більше, ніж анізотропія чистого Fe), високі значення магніченого насичення (~ 1200 е.м.о./см³), коерцитивної сили, температуру Кюрі (~ 720 K) і корозійну стійкість [14]. Носій на основі FePt може бути термічно стабільним навіть при розмірах зерен, менших за 3 нм. Якщо вдасться отримати такі малі зерна і досягти запису інформації на такий матеріал, то щільність запису становитиме ~ 1 Тб/дюйм². Тому дослідженню магнітних матеріалів на основі FePt приділяється значна увага науковців [15 - 18].

Плівки FePt після осадження мають в своїй структурі неупорядковану фазу $A1$ - FePt з гранецентрованою кубічною решіткою (рис. 1.6), яка не має високого значення енергії магнітокристалічної анізотропії. Високоанізотропна впорядкована фаза $L1_0$ -FePt починає утворюватись після високотемпературної термічної обробки, атоми Fe і Pt створюють надґратку тетрагональної структури ($c < a$), з орієнтацією осі легкого намагнічування в напрямку c (рис. 1.6). Тобто, термічна обробка є невід'ємною складовою створення елементів пам'яті з використанням плівок FePt.

Зменшити температуру фазового переходу неупорядкованої магнітно-м'якої фази $A1$ ГЦК (рис. 1.6), в упорядковану магнітно-тверду фазу $L1_0$ - FePt. Атоми Fe і Pt утворюють надґратку тетрагональної структури ($c < a$), з орієнтацією осі легкого намагнічування c в напрямку $[001]$ [19-20].

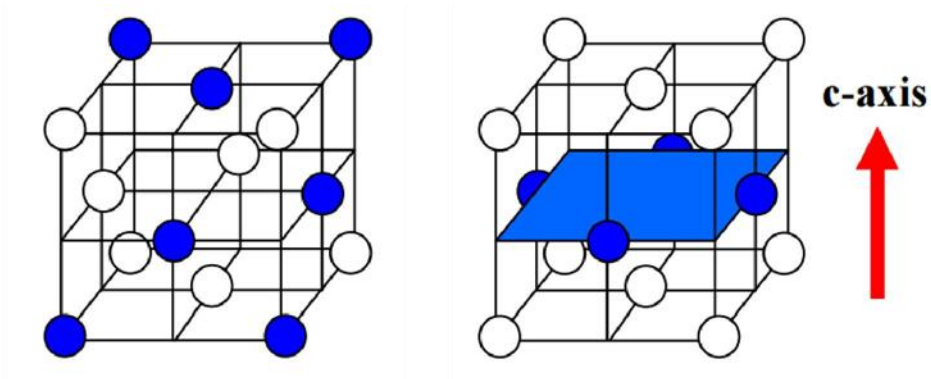


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення неупорядкованої фази $A1$ -FePt сплаву і упорядкованої фази $L1_0$ -FePt [21]

Зниження температури фазового переходу неупорядкованої магнітно-м'якої фази $A1$ ГЦК в упорядковану магнітно-тверду фазу $L1_0$ -FePt є одним з основних задач при створенні носіїв для збереження інформації в плівкових композиціях FePt, а також зменшення розміру зерен та підвищення коерцитивної сили.

1.3.2 Плівки FePd для запису і зберігання інформації

Розробка тонких плівок $L1_0$ FePd з великою об'ємною перпендикулярною магнітною анізотропією та низькою константою затухання може дозволити масштабування елементів магнітної пам'яті надвисокої щільності нового покоління [22].

Такі наночастинки можна отримати за допомогою різноманітних методів, таких як електроннопроменеве осадження, магнетронне напилення або хімічні методи розчинення. Магнітно-тверді властивості сплавів зі структурою $L1_0$ визначаються їх впорядкованою тетрагональною структурою, що допомагає підвищити магнітокристалічну анізотропію до 10^6 Дж/м³. Висока одновісна магнітна анізотропія наночастинок забезпечує термічну стабільність навіть при невеликих розмірах. Енергія магнітокристалічної анізотропії значно залежить від ступеня впорядкування системи, який, у свою чергу, залежить від умов термічної обробки та хімічного складу сплаву [23].

Система Fe-Pd має складну діаграму стану (рис. 1.7). За високих температур, нижче лінії солідусу, у всьому діапазоні складу спостерігається присутність твердих розчинів $\gamma\text{-Fe}_x\text{Pd}_{100-x}$ з гранецентрованою кубічною ґраткою (ГЦК) [24].

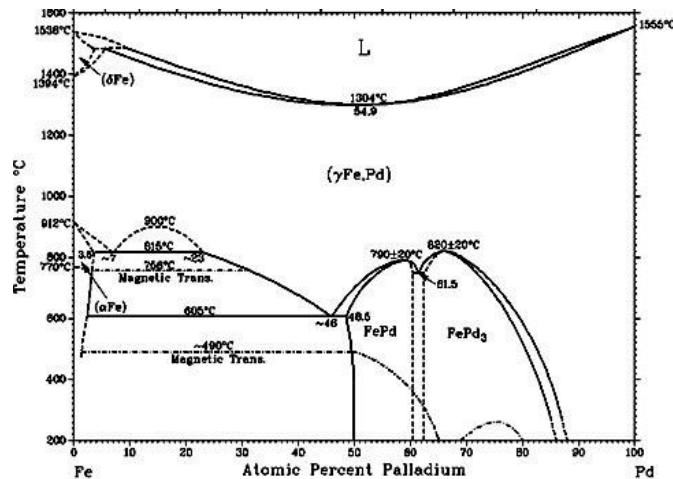


Рисунок 1.7 – Діаграма стану системи Fe-Pd [24]

Непорядкована ГЦК-структура, з $40 \leq x \leq 50$, яка має низьку магнітну анізотропію, упорядковується в $L1_0$ -тип суперструктуру через термодинамічне перетворення першого порядку. Упорядкована структура є тетрагональною внаслідок чергування шарів Fe та Pd вздовж головної осі [001] відносно ГЦК-ґратки. Відношення параметрів ґратки c/a ($c/a \cong 0.96$) становить менше одиниці через різницю атомних радіусів між Fe та Pd. Впорядкована $L1_0$ -фаза була отримана шляхом відпалу цих сплавів від 500 °C [24].

1.3.3 Взаємодія Pt, Pd та Fe із воднем

На рисунку 1.8 показано, що H_2 не утворює хімічних сполук у присутності Fe. Розчинення водню знижує температуру плавлення Fe та розширює діапазон стійкості $\gamma\text{-Fe}$, що призводить до утворення газоперитектичної, газоевтектичної та газоевтектоїдної рівноваг. Позиції фазових рівноваг залишаються майже незмінними в системі, окрім діапазону

тиску від 20 МПа до 30 МПа. Збільшення тиску практично не впливає на розташування фазових перетворень через відхилення від параболічного закону розчинності при високих температурах і тиску [24].

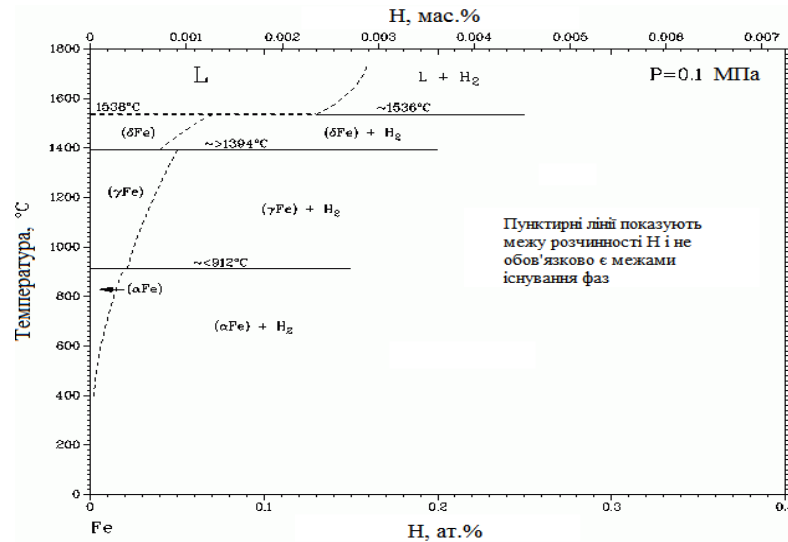


Рисунок 1.8 – Діаграма фазового стану системи Fe-H [25]

Відомо, що атмосфера, яка застосовується під час осадження та подальшого відпалу, суттєво впливає на кінетику процесу впорядкування, а відповідно, на структурні та магнітні характеристики. У роботі: [26] було досліджено вплив тиску H_2 та температури відпалу до 360 K на магнітні властивості плівок сплаву FePd. Спостереження показали циклічне підвищення коерцитивного поля H_c , викликане конкуренцією між термічною активацією та зв'язуванням водню [27].

1.4 Висновки до розділу 1

На сьогоднішній день починає набирати популярності термічно активований магнітний запис, щоб досягти високої щільності запису, а також використовується метод перпендикулярного магнітного запису

Після аналізу доступних наукових джерел встановлено, що наноструктурні композиції на основі сплаву $L1_0$ FePt(FePd) є гарними

матеріалами для використання їх як магнітні носії інформації. Незважаючи на значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, задачі для практичного застосування цих матеріалів залишаються не повністю вирішеними.

Щоб досягти впорядкованої фази $L1_0$ потрібно провести термічну обробку, а саме відпал при температурах, які становлять: (500 – 700) °C.

Встановлено, що відпал у водні, забезпечує більш виражену анізотропію магнітних властивостей та меншу поверхневу шорсткість, що є важливим фактором для практичного застосування плівок на основі FePt(FePd), кількість шарів плівки, все це є чинниками, що впливають на фізичні властивості магнітної плівки. Ретельне вивчення впливу типу підкладки, складу композиції та термічної обробки на формування структури, фазовий склад, кінетику дифузійних процесів в нанорозмірних плівках на основі FePt(FePd) залишається актуальним.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали дослідження

У роботі було проведено дослідження нанорозмірних плівок FePt/FePd та FePd/FePt з товщиною окремих шарів по 15 нм. Відпал проводився у водневій атмосфері. В якості підкладки використовувався монокристалічний кремній з орієнтацією (001) та шаром SiO₂ товщиною 100 нм (рис. 2.1).

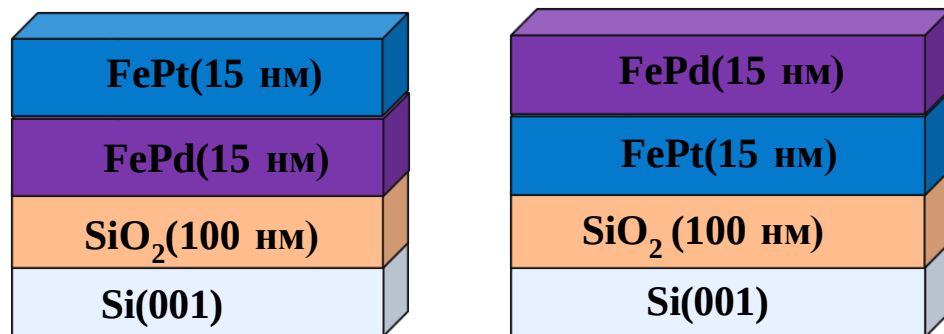


Рисунок 2.1– Схематичне зображення плівкової структури

Нанорозмірні плівкові композиції отримано осадженням шарів відповідного сплаву на підкладку термічно окисленого монокристалічного SiO₂(100нм)/Si(001).

2.2 Технологія виготовлення тонких плівок

Магнетронне розпилення — це технологія осадження, яка включає газоподібну плазму, яка генерується та обмежується простором, що містить матеріал для осадження — «мішень». Поверхня мішені розмивається високоенергетичними іонами в плазмі, а звільнені атоми переміщуються через вакуумне середовище та осідають на підкладці, утворюючи тонку плівку. У типовому процесі осадження методом розпилення камеру спочатку вакуумують до високого вакууму, щоб мінімізувати парціальний тиск усіх фонових газів і потенційних забруднень. Для сприяння якомога більшій кількості високоенергетичних зіткнень — що призводить до збільшення швидкості

осадження – газ для розпилення зазвичай вибирається високомолекулярним газом, таким як аргон або ксенон. Якщо потрібний процес реактивного розпилення, такі гази, як кисень або азот, також можуть бути введені в камеру під час росту плівки [28].

Основними компонентами магнетрона є катод, анод та система магнітного поля, як показано на рисунку 2.2. Лінії сили магнітного поля формують замкнуті контури між полюсами магнітної системи.

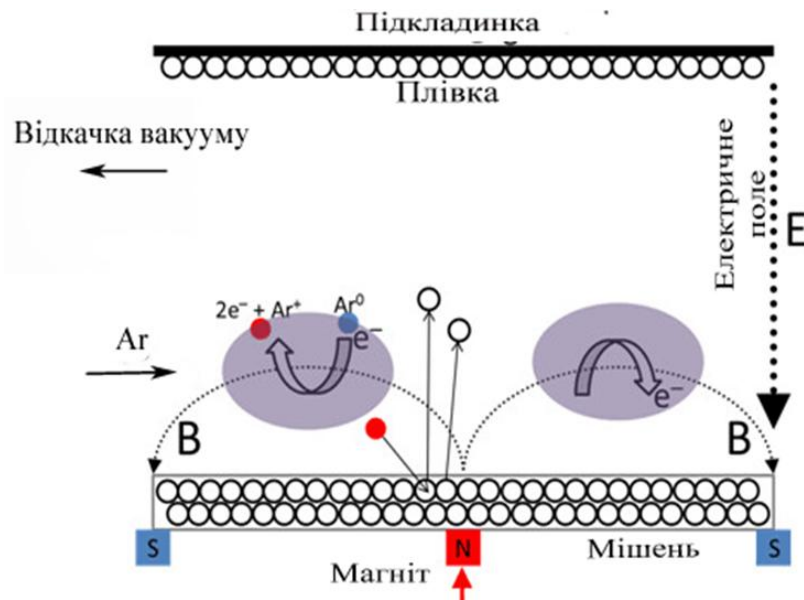


Рисунок 2.2 – Схема методу магнетронного розпилення [29]

Було встановлено, що на електрон у магнітному полі діє сила Лоренца, яка перпендикулярна швидкості електрона. Це веде до того, що електронна траєкторія набуває вигляду циклоїду, через яку електрон рухається, обертаючись навколо магнітної лінії. За достатньої величини магнітного поля електрон повернеться на катод із практично нульовою енергією і знову почне прискорений рух під дією електронного поля. Електрон знаходиться в «пастці», покинути яку він може, лише здійснивши зіткнення з іншою часткою. Тоді він перейде на нову траєкторію, розташовану трохи далі від катода і так, поки не ослабнуть поля, магнітне – за рахунок віддалення від полюсів магнітної

системи, електричне – за рахунок плазмового екранування. За рахунок наявності пастки багаторазово зростає ефективність іонізації емітованими електронами, що дозволяє на відміну від звичайного діодного розряду отримувати високу щільність іонного струму, а отже, і високі швидкості розпилення при низьких тисках близько 0,1 Па і нижче [29].

2.3 Методики дослідження

2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгенографічні дослідження фазового складу та кристалічної структури зразків виконувався на пристрої Bruker D8 ADVANCE та Rigaku ULTIMA IV. Зйомка проводилася у випроміненні мідного аноду, Cu K α (λ = 1,54178 Å), прискорювальна напруга – 40 кВ та анодний струм – 40 мА.

Особливість дослідження тонких плівок полягає в тому, що рентгеноструктурний аналіз дозволяє виявляти рефлекси від фази, яка може мати високий відсотковий вміст у плівці, але через її малу товщину абсолютне значення цього вмісту залишається низьким.

Оскільки рентгенівські промені проникають глибше, ніж товщина досліджуваного об'єкта, на рентгенограмі можуть з'являтися рефлекси від підкладки. Присутність цих ліній ускладнює ідентифікацію і може призвести до неоднозначних висновків щодо фазового складу плівок [30].

Умовою дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці є умова Вульфа–Брегга:

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

де d – міжплощинна відстань, властива даній фазі, Å

θ – кут дифракції рентгенівського променю даною системою атомних площин;

λ – довжина хвилі випромінення монохроматичних рентгенівських променів, падаючих на кристал, Å;

n – порядок дифракційного максимуму (ціле число).

Ця умова з фізичної точки зору пояснюється таким чином, що коли рентгенівські хвилі розсіюються сусідніми атомними площинами кристала, вони посилюються внаслідок інтерференції, якщо різниця у пройденому ними шляху дорівнює цілому числу довжин хвиль λ .

Інтенсивність рефлексу визначається режимом роботи рентгенівського апарату, зокрема: силою струму через трубку, напругою на трубці, розміром щілин і режимом роботи лічильника квантів рентгенівського випромінювання.

Інтенсивність рефлексу залежить від кількості відповідної фази. Якщо об'єкт дослідження містить кілька фаз, то кожна фаза матиме свою власну дифракційну картину. У цьому випадку дифрактограма буде являти собою накладення дифрактограм всіх фаз, присутніх у досліджуваному зразку [31].

Чутливість рентгенівського фазового аналізу визначається найменшою кількістю речовини у суміші, яка дає достатній набір характерних рефлексів для ідентифікації цієї фази у зразку.

Параметри гранецентрованої кубічної та гранецентрованої тетрагональної ґраток розраховуються за формулами 2.2 та 2.3, відповідно [31]:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

Для визначення ступеня впорядкування фази $L1_0$ можна використати відношення c/a , де c і a – являються параметрами ґратки фази $L1_0$ або по відношенню інтегральних інтенсивностей $I(001)/I(002)$ від цієї фази.

Кількість зерен фази $L1_0$ з текстурою (001) у плівках можна визначити по відношенню $I(001)/I(111)$ від фази $L1_0$. Використання методу рентгеноструктурного фазового аналізу дає змогу оцінити розмір областей когерентного розсіювання (ОКР), який зазвичай асоціюють з розміром зерен у нанорозмірних композиціях. Область когерентного розсіювання представляє собою характерну

зону, в межах якої рентгенівське розсіювання відбувається когерентно тобто узгоджено. Розмір ОКР визначається за допомогою рівняння Дебая-Шеррера:

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} , \quad (2.3)$$

де d – середній розмір кристалітів,

λ – довжина хвилі випромінення, що використовується,

β – ширина піка на половині висоти,

θ – кут дифракції,

$k = 0,9$.

2.3.2 Електронографічний аналіз

Електронографія – метод дослідження структури речовини, заснований на розсіюванні електронів, прискорених досліджуванним зразком. Використовується для вивчення атомної будови кристалів, аморфних твердих тіл і рідин, молекул газів і пари. Існує кілька видів даного методу, але основним є електронографія на просвіт. В даному методі використовується дифракція електронів високих енергій (50–300) кеВ, що відповідає довжині хвилі близько ($5\text{--}10^{-3}$) нм. Електронографічний аналіз проводять у спеціальних пристроях – електронографах, де утримується вакуум ($10^{-5}\text{--}10^{-6}$) Па, час експозиції приблизно 1 секунда, або у трансмісійних електронних мікроскопах. Вакуум є важливим аспектом для проведення дослідження, через здатність уникати повітря, щоб отримати чіткіші зображення, адже у вакуумі електрони не розсіюються повітрям. Зразки для досліджень виготовляють у вигляді тонких плівок товщиною (10 – 50) нм, осаджуючи кристалічну речовину з розчинів або суспензій, або отримуючи плівки вакуумним розпорошенням. Зразки мають вигляд мозаїчного монокристалу, текстуру або полікристал.

Під час проникнення через матеріал, електрони з властивостями хвиль взаємодіють з атомами, що спричиняє утворення дифракційних пучків. Інтенсивність та положення цих пучків залежать від атомної структури

матеріалу та інших параметрів його структури. Розсіяння електронів зумовлене електростатичним потенціалом атомів, який досягає максимуму в точках розташування атомних ядер.

Дифракційна картина, електронограма, виникає внаслідок проходження початкового монохроматичного потоку електронів через зразок і являє собою сукупність упорядковано розташованих дифракційних кілець, які визначаються розташуванням атомів у об'єкті [32]. На електронограмах видно рівномірно затемнені кільця, а при фотографуванні на рухомій фотопластинці можна побачити паралельні смуги. Якщо електронограма показує потовщені віддзеркалені дуги, це вказує на переважну орієнтацію зерен, тобто наявність текстури.

На рисунку 2.3 вказані основні елементи електронографу: 1 – електронна пушка; 2 – I лінза; 3 – II лінза; 4 – досліджуваний зразок; 5 – екран. Фокусування електронів в площині флуоресцентного екрана 4 здійснюється лінзами 2 і 3. Реєстрацію електронограм виконують на фотоплівку або на напівпровідникову матрицю із зарядовим зв'язком (ПЗС-матрицю).

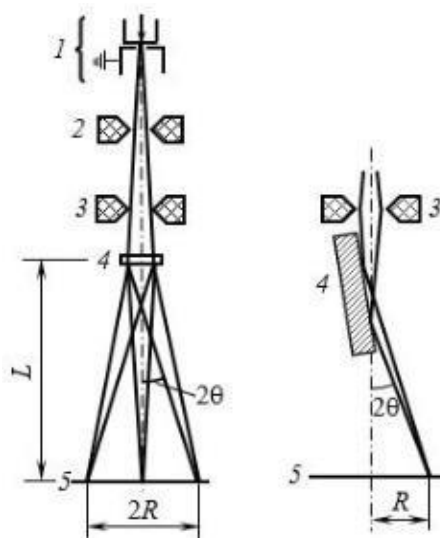


Рисунок 2.3 – Схема формування дифракційної картини в електронографі в двох режимах [33]

Визначення міжплощинних відстаней фаз у кристалічній структурі здійснюється шляхом обчислення співвідношення між сталою приладу і діаметром характерного інтерференційного рефлексу. Стала приладу залежить

від відстані між розсіюючим зразком і фотопластиною, а також від довжини хвилі де Бройля електрона. Використовуючи ASTM таблиці для розрахунків міжплощинних відстаней, можна отримати дані про фазовий склад досліджуваного зразка та параметри його кристалічної решітки [33].

2.3.3 Скануюча електронна мікроскопія

Скануюча електронна мікроскопія є дуже універсальною технікою, яка використовується для отримання зображень високої роздільної здатності та детальної інформації про поверхню зразків. Це різновид електронної мікроскопії, яка використовує сфокусований промінь електронів для сканування поверхні зразка та створення зображень зі значно вищою роздільною здатністю порівняно з оптичною мікроскопією. Роздільна здатність приладів може коливатися від < 1 нанометра до кількох нанометрів.

Скануючий електронний мікроскоп проектує та сканує сфокусований потік електронів на поверхні зразка та збирає різні сигнали, отримані за допомогою спеціальних детекторів. Електрони в пучку взаємодіють з атомами всередині зразка, створюючи таким чином різні сигнали, які можна використовувати для отримання інформації про рельєф і склад поверхні. Детектор вторинних електронів і детектор зворотного розсіювання електронів є двома найпоширенішими типами детекторів, які використовуються для отримання зображень із високою роздільною здатністю. Мікроаналіз складу поверхні можна отримати за допомогою детекторів енергодисперсної рентгенівської спектроскопії. Унікальна конфігурація остаточно визначить його роздільну здатність і доступні режими зображення [34].

2.4 Висновки до розділу 2

Матеріалами для дослідження в даній роботі обрано нанорозмірні плівки FePt/FePd та FePd/FePt, які було осаджено на монокристалічний кремній з

орієнтацією (001) та шаром SiO_2 (100 нм) методом магнетронного розпорошення. Термічне оброблення проводилося у атмосфері водню.

Розглянуто спектр методів сучасного фізичного матеріалознавства для використання в роботі: рентгеноструктурний фазовий аналіз, електронографічний аналіз, скануюча електронна мікроскопія. Ці методики дозволяють отримати достовірну інформацію про зміни фазового складу, структури та морфології поверхні плівок.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У експериментальній частині представлено результати та аналіз досліджень з формування фазового складу і структури плівок FePt/FePd та FePd/FePt, які були одержані методом магнетронного осадження. Відпал проводився в водневій атмосфері в інтервалі температур (500 – 700) °С.

3.1 Формування фазового складу та структури у плівках FePt(15 нм)/FePd(15 нм) та FePd(15 нм)/FePt(15 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) під час відпалу у водні

Після осадження на дифрактограмі плівки FePt(15 нм)/FePd(15 нм) спостерігається рефлекс (111) від неупорядкованої фази A1 та від підкладки, які показано на рисунку 3.1.

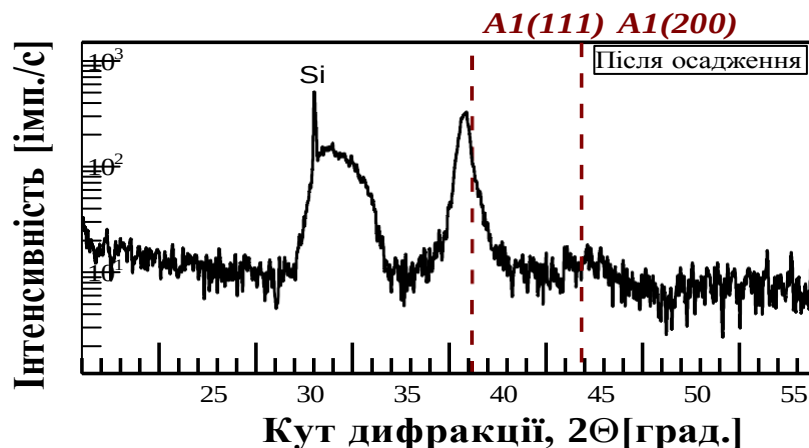


Рисунок 3.1 – Дифрактограма для плівки FePt(15 нм)/FePd(15 нм) після осадження

На рисунку 3.2 зображені дифрактограми плівки FePt(15нм)/FePd(15 нм) після відпалу в температурному інтервалі (500–700) °С. В ході відпалу за температури 500 °С виникають: надструктурний рефлекс (001) малої інтенсивності, базовий рефлекс (002), які належать впорядкованій фазі L1₀, та рефлекс (200). Рефлекс (111) змінює своє положення в бік більших кутів (41,04 °С) та

відповідає двом фазам $A1+L1_0$. Підвищення температури відпалу що супроводжується збільшенням інтенсивностей рефлексів (001) та (002), що вказує на збільшення кількості впорядкованої фази.

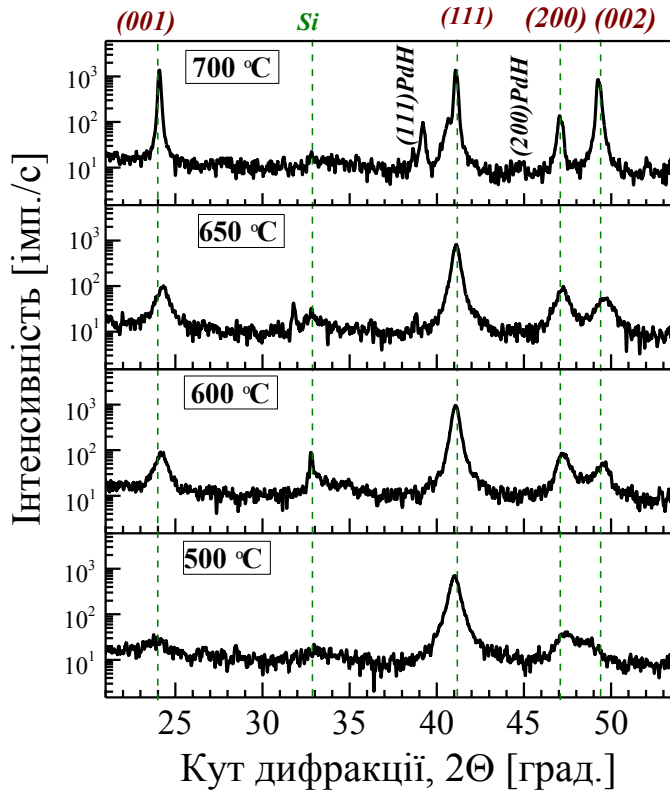


Рисунок 3.2 – Дифрактограми плівки FePt(15nm)/FePd(15 nm) після відпалу в температурному інтервалі (500–700) °C

Збільшивши температуру відпалу до 600 °C можна спостерігати збільшення надструктурного рефлексу (001) та рефлексу (200), що належить впорядкованій фазі $L1_0$. Інтенсивність піку (111) від фаз A1 та $L1_0$ продовжує збільшуватися.

Підвищивши температуру на 50 °C можна спостерігати незначні зміни у збільшенні кількості та інтенсивностей рефлексів.

Подальше збільшення температури відпалу до 700 °C призводить до стрімкого збільшення інтенсивності надструктурного рефлексу (001) впорядкованої фази $L1_0$. Інтенсивність піку $L1_0(111)$ продовжує збільшуватись.

Стрімко збільшується інтенсивність рефлексу (002) фази $L1_0$ та утворюються гідриди.

Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів від плівки FePt/FePd, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню представлені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів у плівці FePt/FePd, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню

Термообробка, °C	Індекси, hkl	Кут дифракції, 2Θ , град.	Інтенсивність, I , імп./с	Міжплощинна відстань, d , Å
Після осадження	(111)	40,76	393	2,21
500	(001)	23,75	40,20	3,75
	(111)	41,03	704,24	2,20
	(200)	47,42	34,41	1,92
600	(001)	24,16	97	3,68
	(111)	41,08	973	2,20
	(200)	47,40	89	1,92
	(002)	49,68	58	1,84
650	(001)	24,32	108	3,66
	(111)	41,12	851	2,20
	(200)	47,28	102	1,92
	(002)	49,60	57	1,84
700	(001)	24,08	1447	3,70
	(111)	41,08	1402	2,20
	(200)	47,04	142	1,93
	(002)	49,24	884	1,85

У таблиці 3.2 представлено розраховані параметри ґратки та відношення параметру c до параметру a фази $L1_0$ у плівках FePt(15нм)/FePd(15 нм).

Таблиця 3.2 – Параметри ґратки та відношення параметру c до параметру a фази $L1_0$ у плівках FePt(15нм)/FePd(15 нм)

Термобробка, °C	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å	Відношення c/a
Після осадження	3,82	3,82	1
500	3,84	3,75	0,976
600	3,84	3,68	0,958
650	3,84	3,67	0,955
700	3,86	3,70	0,958

На рисунку 3.3 показано дифрактограми від плівки FePd(15 нм)/FePt(15 нм) після відпалу в температурному інтервалі (400 – 700) °C. Під час термічної обробки за температури 400 °C у плівці FePd(15 нм)/FePt(15 нм) починає формуватися впорядкована фаза $L1_0$. Надструктурний рефлекс (001) має дуже малу інтенсивність. Після відпалу за 500 °C інтенсивність його збільшується. На дифрактограмі від плівки присутні рефлекси (001), (111), (200), (002) та від підкладки. Рефлекс (111) може належати як фазі $A1$, так і $L1_0$. Інтенсивність надструктурного рефлексу (001) більше, ніж у плівці FePt(15 нм)/FePd(15 нм) за цієї температури відпалу. Базовий рефлекс (200) розщеплюється на рефлекси (200) та (002) (рис. 3.3).

При збільшенні температури до 600 °C збільшуються інтенсивності рефлексів (001), (002) та (200). Інтенсивність піку (111) від впорядкованої фази $L1_0$ продовжує зменшуватися. Додатково з'являється надструктурний рефлекс (110). Подальше збільшення температури відпалу до 650 °C призводить до більш стрімкого росту інтенсивностей надструктурного рефлексу (001) та базового (002) рефлексів. Інтенсивність рефлексів (110), (111) та (200) майже не змінюються.

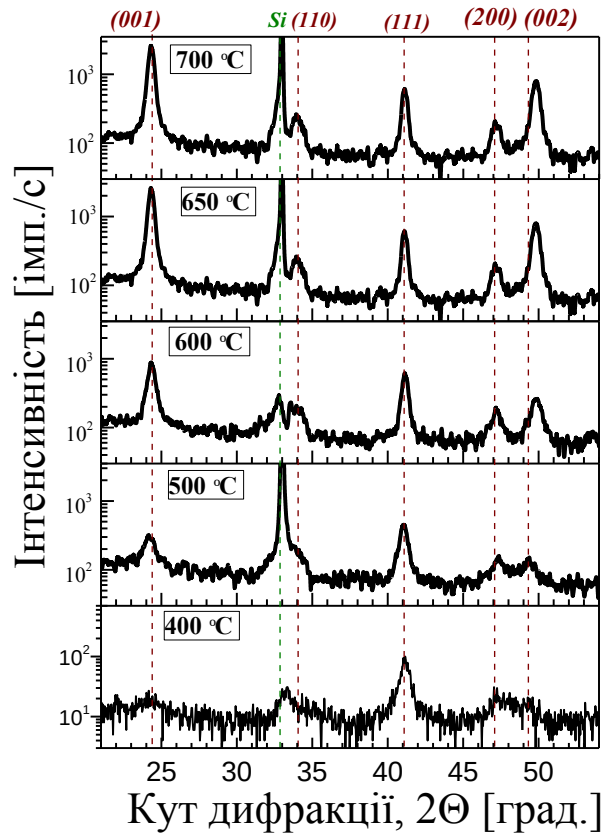


Рисунок 3.3 – Дифрактограми плівки FePd(15nm)/FePt(15 nm) після відпалу в температурному інтервалі (400 – 700) °C

Підвищення температури до 700 °C не призводить до подальшої зміни дифракційної картини. У таблиці 3.3 представлено розраховані параметри ґратки фази $L1_0$ та відношення параметру c до параметру a у плівках FePt(15 nm)/FePd(15 nm).

Таблиця 3.3 – Параметри ґратки фази $L1_0$ у та відношення параметру c до параметру a у плівках FePd(15 nm)/FePt(15 nm)

Термобробка, °C	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å	Відношення c/a
400	3,848	3,6836	0,9572
500	3,839	3,695	0,962
600	3,854	3,660	0,949
650	3,858	3,660	0,948
700	3,858	3,660	0,948

Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів від плівки FePt/FePd, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у

атмосфері водню представлені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів у плівках FePd/FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню

Термообробка, °C	Індекси, hkl	Кут дифракції, 2 Θ , град.	Інтенсивність, I, імп./с	Міжплощинна відстань, d, Å
Після осадження	(111)	40,76	393	2,21
400	(001)	24,16	9,92	3,6836
	(111)	41,15	55,48	2,1936
	(200)	47,24	16	1,924
	(002)	49,25	111,55	1,85
500	(001)	24,15	326,25	3,68
	(111)	41,06	205,04	2,19
	(200)	47,15	206,36	1,92
	(002)	49,90	270,85	1,82
600	(001)	24,35	874,68	3,65
	(111)	41,10	619,54	2,19
	(200)	47,15	206,36	1,92
	(002)	49,90	270,85	1,82
650	(001)	24,30	2543,01	3,66
	(111)	41,11	537,63	2,19
	(200)	47,11	198,92	1,92
	(002)	49,80	751,66	1,83
700	(001)	24,30	2602,15	3,66
	(111)	41,13	623,66	2,19
	(200)	47,10	225,81	1,92
	(002)	49,80	811,83	1,83

На рисунку 3.4 представлено залежність міжплощинної відстані d від температури відпалу для рефлексу (111). Збільшення міжплощинної відстані за температури відпалу 500 °C у плівці FePd/FePt та за 700 °C у плівці FePt/FePd може бути пов'язано з втіленням атомів водню.

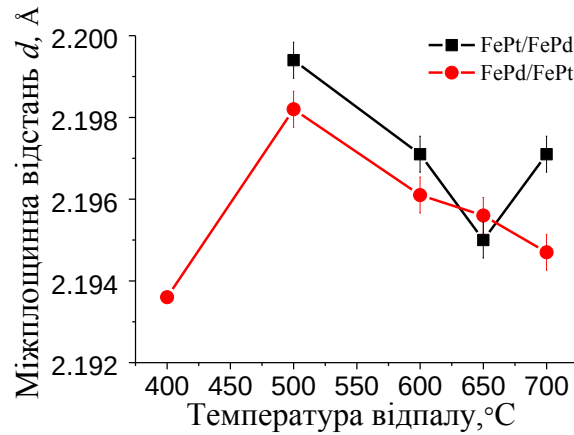


Рисунок 3.4 – Залежність міжплощинної відстані d рефлексу $L1_0$ (111) від температури відпалу у плівках FePt/FePd та FePd/FePt

Параметр ґратки a фази $L1_0$ зростає у обох плівкових композиціях з підвищенням температури відпалу до 700 °C (рис. 3.5).

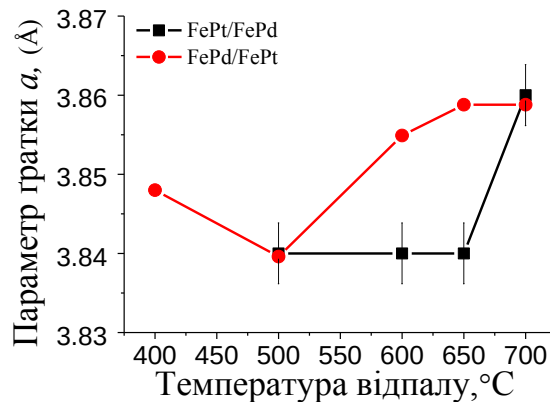


Рисунок 3.5 – Залежність параметру ґратки a фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd та FePd/FePt від температури відпалу

Проаналізувавши ми бачимо, що стрімке збільшення параметру ґратки притаманне нанорозмірній плівці FePd/FePt, в той час у композиції FePt/FePd зростання починається за температури 700 °C.

Параметр ґратки c фази $L1_0$ у плівці FePt/FePd зменшується до температури 650 °C та зростає за температури відпалу 700 °C, що, ймовірно

пов'язано зі втіленням атомів водню у плівку (рис. 3.6). Параметр ґратки c у плівці FePd/FePt з протилежним розташуванням шарів зменшується до температури 600 °C і надалі практично не змінюється, вказуючі на те, що процеси впорядкування відбулися по всій товщині плівкової композиції (рис. 3.6).

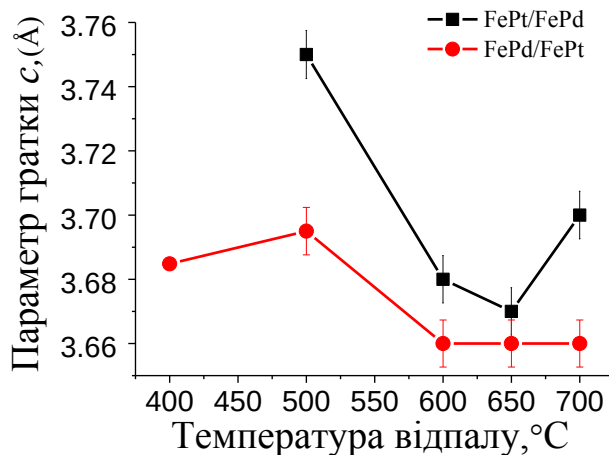


Рисунок 3.6 – Залежність параметру ґратки c фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd та FePd/FePt від температури відпалу

Відношення параметрів ґратки c/a фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd та FePd/FePt зменшується, що вказує на збільшення ступеню тетрагональності (рис. 3.7).

Об'єм ґратки у плівці FePt/FePd зменшується до температури 650 °C та зростає до температури 700 °C, а в композиції FePd/FePt зменшується до температури 600 °C, але також збільшується до температури 700 °C (рис. 3.8).

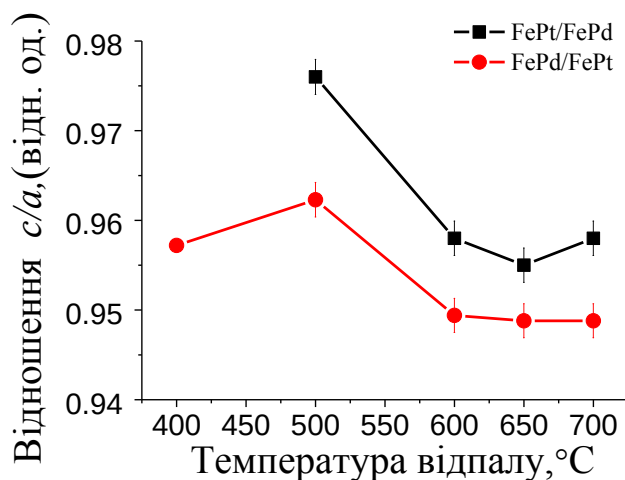


Рисунок 3.7 – Зміна відношення параметрів ґратки c/a фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd та FePd/FePt з температурою відпалу

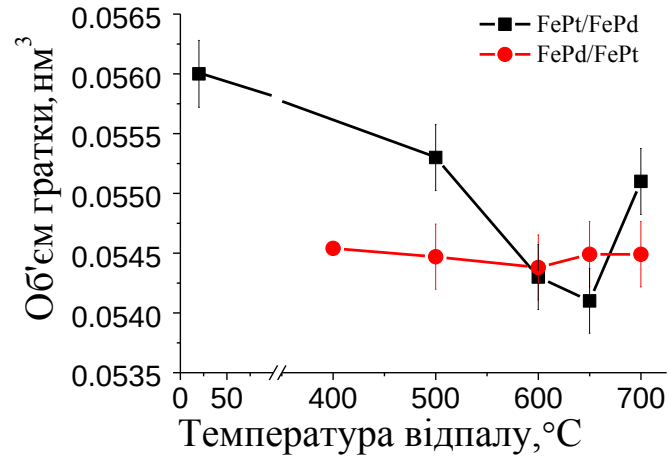


Рисунок 3.8 – Залежність об'єму ґратки у плівках FePt/FePd та FePd/FePt від температури відпалу

На рисунку 3.9 відображена зміна розміру областей когерентного розсіювання плівок FePt/FePd та FePd/FePt від температури відпалу. Зерна зростають разом з температурою відпалу. У плівці FePt/FePd найбільший розмір ОКР після відпалу у водні за температури 700 °C.

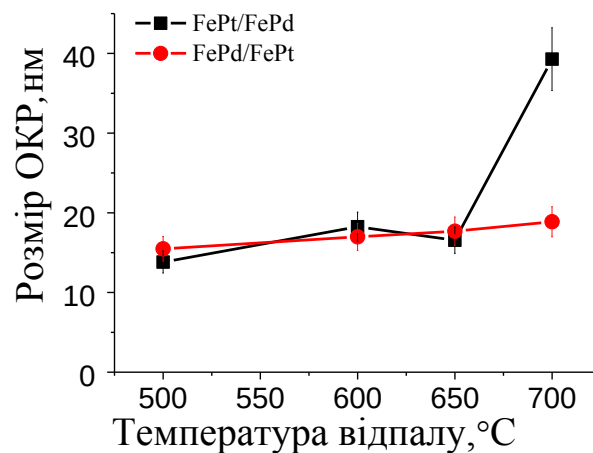


Рисунок 3.9 – Зміна розмірів областей когерентного розсіювання для фази $L1_0$ з температурою відпалу у плівках FePt/FePd та FePd/FePt

На збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$ вказує також збільшення відношення інтегральних інтенсивностей рефлексів (001) та (002) від фази $L1_0$ з температурою відпалу у водні (рис. 3.10). Це вказує на збільшення ступеню впорядкування дальнього порядку.

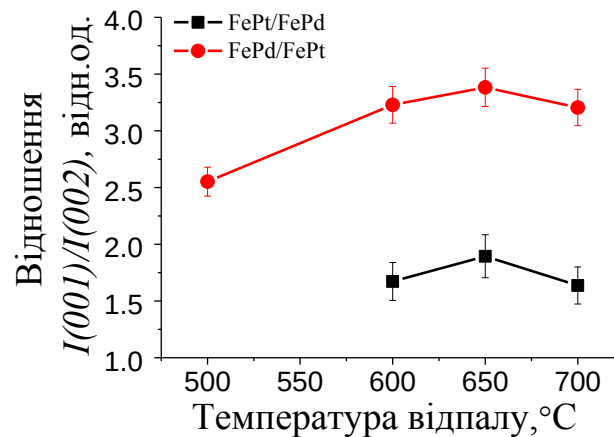


Рисунок 3.10 – Залежність відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$ від фази $L1_0$ від температури відпалу у плівках FePt/FePd та FePd/FePt

На рисунку 3.11 показано зміну відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ від фази $L1_0$ з температурою відпалу для плівок FePt/FePd та FePd/FePt.

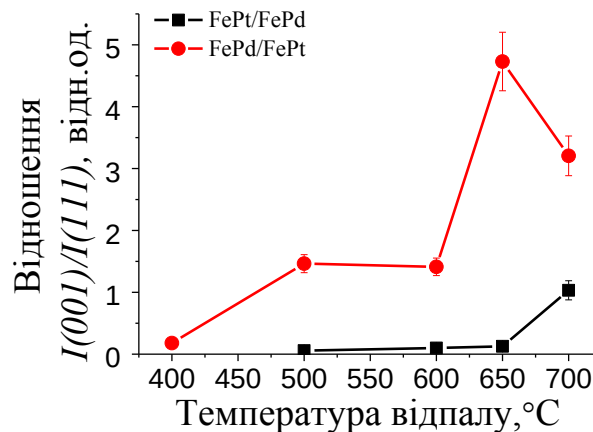


Рисунок 3.11 – Зміна відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ від фази $L1_0$ з температурою відпалу у плівках FePt/FePd та FePd/FePt

Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ збільшується з температурою

відпалу від 500 °C до 700 °C у плівці FePt/FePd, що вказує на збільшення об'ємної долі зерен фази $L1_0$ FePt/FePd з текстурою (001).

3.2 Електрографічний аналіз плівок FePt/FePd та FePd/FePt

На рисунку 3.12 представлено електронограми від плівки FePt/FePd після осадження та відпалу у водні за температури 500 °C. Дифракційна картина після осадження та відпалу за температури 500 °C розмита, що може бути пов'язано з малою товщиною плівки та великих напружень у ній.

Відпал у водні за 600 °C протягом години призводить до збільшення кількості рефлексів на електронограмі внаслідок упорядкування у плівці. З'являється надструктурний рефлекс (110) та рефлекси (002), (112), (201), (311), (222), (202) що належать впорядкованій фазі $L1_0$ -FePt (рис. 3.13). Рефлекс (111) може належати, як до неупорядкованої фази $A1$, так й до впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$.

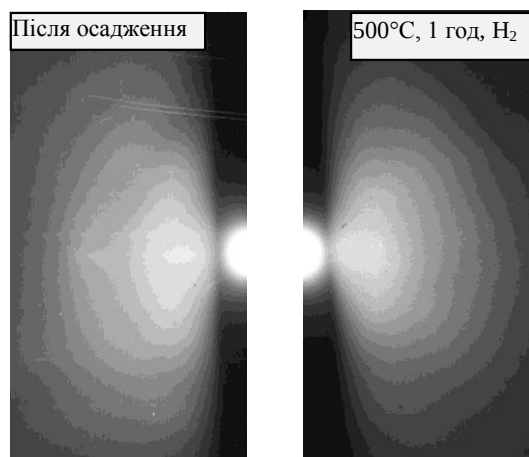


Рисунок 3.12 – Електронограми від плівки FePt/FePd після осадження та відпалу у водні при температурі 500 °C

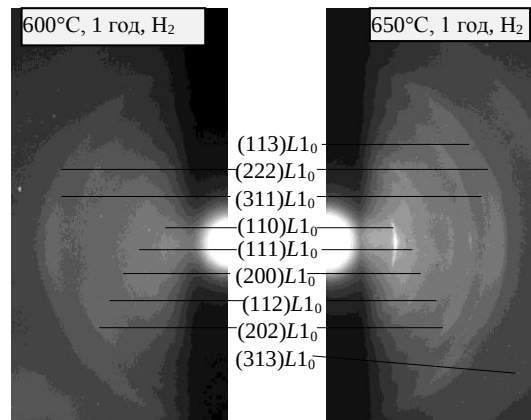


Рисунок 3.13 – Електронограми від плівки FePt/FePd після відпалу у водні за температур 500 °C та 600 °C

Після відпалу плівки FePt/FePd за температури 650 °C на електронограмі, збільшується інтенсивність рефлексів (110), (112), (201), які належать до впорядкованої фази $L1_0$, що свідчить про збільшення її кількості (рис. 3.14). У плівці переважає текстура (111). Після відпалу за 700 °C дифракційна картина майже не змінюється.

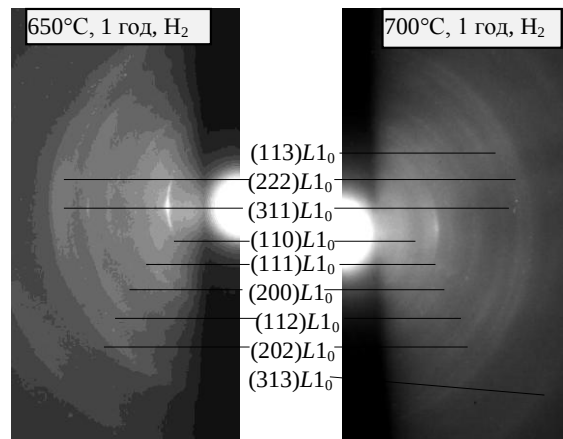


Рисунок 3.14 – Електронограми плівки FePt/FePd після відпалу у водні за температур 650 °C та 700 °C

На рисунках 3.15 та 3.16 представлено електронограми від плівки FePd/FePt після відпалів у водні за температур (500 – 700) °C. Усі дифракційні картини після осадження та відпалів у водні розмиті, що може бути пов'язано з великих напруженнями у поверхневому шарі плівки та умовами зйомки електронограми.

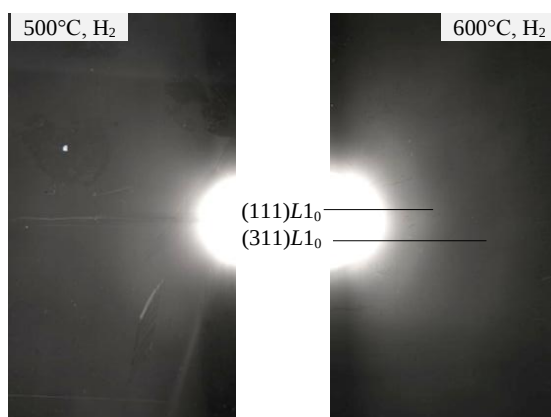


Рисунок 3.15 – Електронограми від плівки FePd/FePt після відпалу у водні за температур 500 °С та 600 °С

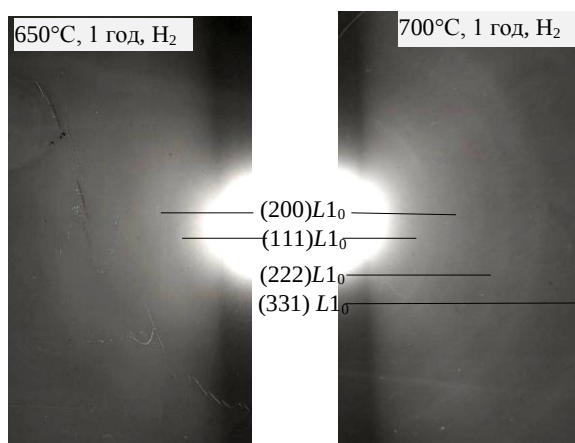


Рисунок 3.16– Електронограми від плівки FePd/FePt після відпалу у водні за температур 650 °С та 700 °С

Після відпалу у водні за температури 700 °С збільшується кількість ліній на електронограмі від впорядкованої фази, що вказує на збільшення ступеня впорядкування.

3.3 Дослідження поверхні плівок FePt/FePd та FePd/FePt методом скануючої електронної мікроскопії

На рисунках 3.17 – 3.19 представлено зображення поверхні плівок FePt/FePd за різних збільшень після осадження та відпалів у водні за температур 650 °С та 700 °С. Після осадження поверхня плівки FePt/FePd

гладка (рис. 3.17).

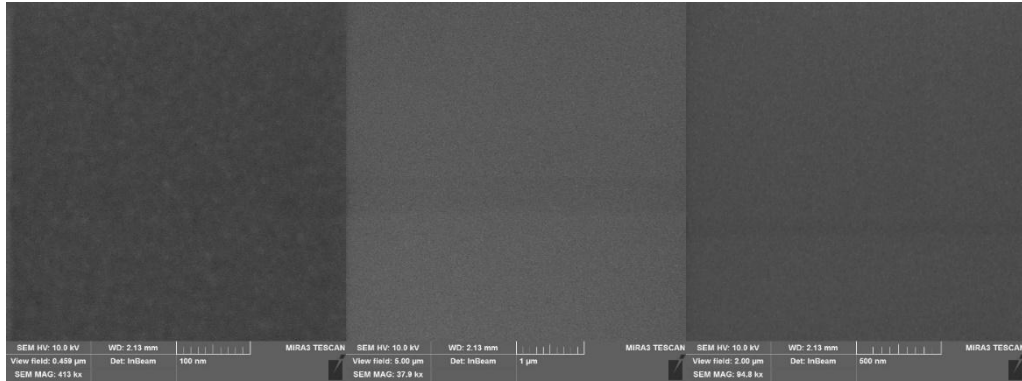


Рисунок 3.17 – Зображення поверхні плівки FePt/FePd після осадження

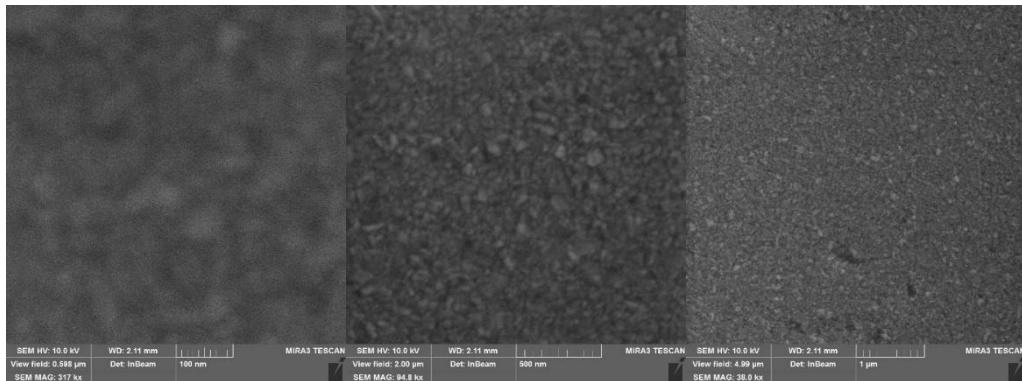


Рисунок 3.18 – Зображення поверхні плівки FePt/FePd після відпалу за температури 650 °C

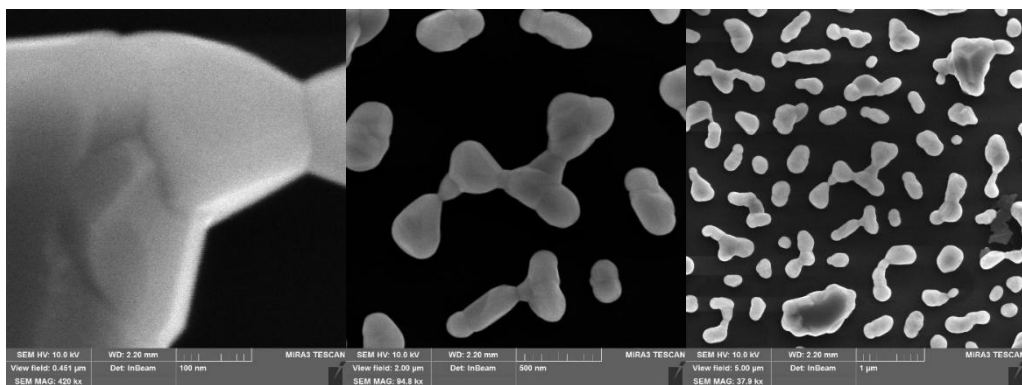


Рисунок 3.19 – Зображення поверхні плівок FePt/FePd після відпалу за температури 700 °C

На рисунках 3.20 – 3.21 представлено зображення поверхні плівок FePd/FePt за різних збільшень після осадження та відпалів у водні за

температур 650 °C та 700 °C.

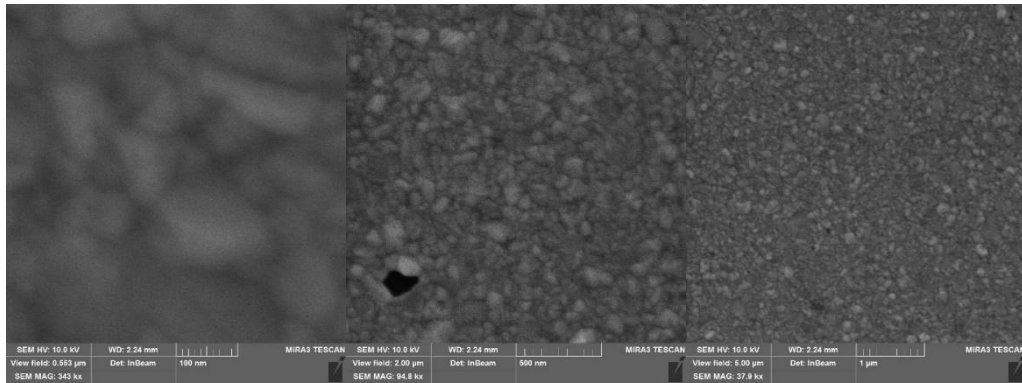


Рисунок 3.20 – Зображення поверхні плівок FePd/FePt після відпалу при температурі 650 °C

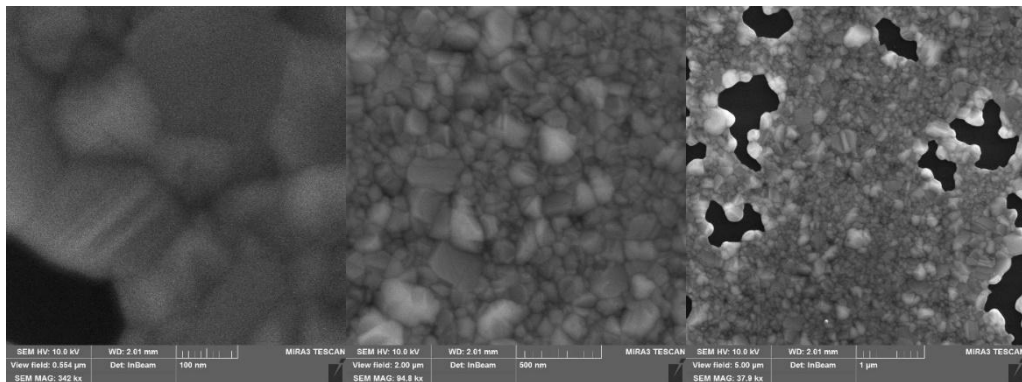


Рисунок 3.21 – Зображення поверхні плівок FePd/FePt після відпалу при температурі 700 °C

Поверхня плівки FePt/FePd після відпалу у водні за температури 650 °C має більшу шорсткість поверхні, ніж після осадження (рис. 3.18).

Структура плівки FePt/FePd після відпалу за температури 700 °C втрачає свою суцільність (рис.3.19).

Поверхня плівки FePd/FePt після відпалу за температури 650 °C має такий самий вигляд як і у плівці FePt/FePd (рис.3.20).

Плівка FePd/FePt, як і FePt/FePd також не зберігає повністю свою суцільність після високотемпературного відпалу за 700 °C (рис.3.21).

Для дослідження використовувався скануючий електронний мікроскоп TESCAN MIRA 3.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Формування впорядкованої фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd починається під час відпалу у водні за температури 500 °C. Зміна розташування шарів FePd/FePt призводить до зменшення температури впорядкування на 100 °C.

2. Ступень впорядкування фази $L1_0$ збільшується з температурою відпалу у водні у обох плівках.

3. Відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$ фази $L1_0$ збільшується з підвищенням температури відпалу до 700 °C, що свідчить про збільшення ступеню упорядкування фази $L1_0$.

4. Найбільша кількість зерен впорядкованої фази $L1_0$ у плівці з текстурою (001) утворюється після відпалу за температури 650 °C, коли обидві плівки залишаються суцільними.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність

Розвиток комп'ютерних технологій зазвичай потребує розробки нових носіїв інформації, з більшою щільністю та стабільністю інформації. Запис на жорсткі магнітні диски є найбільш розповсюдженим методом зберігання цифрової інформації. Плівки на основі сплаву FePt/FePd та FePd/FePt з впорядкованою структурою $L1_0$ добре зарекомендували себе в якості такого матеріалу.

Під час осадження за кімнатної температури плівки FePt/FePd та FePd/FePt мають у своїй структурі невпорядковану фазу $A1$, 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) та осаджувати на нагріту підкладку $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$.

4.2 Розрахунок собівартості роботи

Сума, необхідна для здійснення досліджень з розробки та аналізу властивостей тонкоплівкових композицій, визначається наступними складовими витратами: витрати на оплату праці, відрахування на соціальні заходи, матеріальні витрати на дослідження, інші безпосередні витрати, а також інші загальні витрати.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Зарплатня кожного працівника встановлюється на основі обчислень, що враховують трудомісткість роботи. Розрахунки проводяться згідно системи людина-день, щоденна заробітна плата формується як відношення місячного окладу до календарного місяця (21-22 дня за п'ятиденним робочим тижнем). Фонд заробітної плати назначається через множення середньоденної заробітної плати для кожної категорії працівників на заплановану трудомісткість робіт. У таблицях 4.1 та 4.2 наведені розрахунки трудомісткості та фонду заробітної плати.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання дипломної роботи

Етапи	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні Посади виконавців зазначайте повністю, а не скорочено			
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	науковий співробітник	Інженер-дослідник
1	2	3	4	5
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	1	2	—	2
2. Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	—	—	—	10

3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	—	2	—	2
4. Розробка методики проведення дослідження	—	—	—	3
5. Проведення дослідження	3	14	6	14

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
6. Обговорення результатів дослідження	2	4	2	4
Усього	6	22	8	35

Таблиця 4.2 – Фонд заробітної плати для виконавців дипломної роботи

Посада	Трудовістість, люд.-дні	Місячний оклад, грн	Денна заробітна плата, грн	Сумарна заробітна плата, грн
--------	----------------------------	---------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

Пров.н.с.	6	16608,8	754,95	4529,7
С.н.с.	22	15588,8	708,58	15588,8
Н.с.	8	14182	644,64	5157,12
Інженер	35	9250	420,45	14715,75
Всього	57	55629,6	2528,62	39991,37

Враховуючи трудомісткість кожного з учасників та його заробітну плату, отримано фонд заробітної плати для наявних досліджень. Фонд заробітної плати (ФЗП) даної науково-дослідної роботи складає 39991,37грн.

4.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску

Згідно чинного законодавства України, єдиний соціальний внесок (ЄСВ) становить 22 % від фонду заробітної плати:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \cdot 0,22 = 39991,37 \cdot 0,22 = 8798 \text{ грн}$$

4.2.3 Витрати на матеріали для досліджень

Під час досліджень було використано чотири нанорозмірні плівкові композицій: FePt/FePd та FePd/FePt у кількості 1 одиниці кожного типу. Повна сума витрачених коштів на матеріали та транспортно-заготівельні витрати складає 2000 грн.

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя

Оскільки термічна обробка відбувалася на вже придбаному обладнанні у вигляді муфельної печі марки Siemens-Plama Berlin-Lichtenberg, закуп приладдя

не враховується у фінальній сумі вартості дослідження, на закупку балону водню 40 л було витрачено 2000 грн.

4.2.5 Витрати на послуги сторонніх організацій

Виконання даної дипломної роботи не передбачає використання послуг сторонніх організацій, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.6 Витрати на службові відрядження

Під час виконання дипломної роботи службові відрядження не передбачаються, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.7 Енергоносії для проведення досліджень

Витрати на енергоносії розраховуються лише в тому випадку, якщо дослідження на цю тему пов'язані з плавленням, покриттям зразків або виробів, та потребують значних витрат енергії, особливо електроенергії. В інших випадках витрати на енергоносії опосередковано й автоматично включаються до програмного бюджету суб'єкта через статтю «Накладні витрати».

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

У даній статті об'єднані всі витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідних робіт (НДР), які не враховані в попередніх статтях. Для оцінки інших безпосередніх витрат при проведенні робіт використовується рівень 10% від загальної суми витрат на виконання НДР.

$$I_v = (39991,37 + 8798 + 2000 + 2000) \cdot 0,1 = 5278,9 \text{ грн}$$

4.2.9 Накладні витрати

У цьому розділі враховуються різноманітні види витрат, пов'язаних з управлінням виконавчою організацією проекту. Ці витрати включають розробку та раціоналізацію, амортизацію основних активів, науково-технічну інформацію, забезпечення безпеки та умов праці, оплату банківських послуг, а також податки, збори та інші обов'язкові платежі. Можна розглянути підхід до розрахунку загальних накладних витрат, який передбачає встановлення відсоткового співвідношення витрат на прямі витрати на рівні 20 %.

$$H_v = (39991,37 + 8798 + 2000 + 2000 + 5278,9) \cdot 0,2 = 11614 \text{ грн}$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Для формування планової калькуляції вартості досліджень за даною темою використовуються розрахунки та нормативні дані (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	39991,37	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	10609	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	8798	Відповідно до розрахунків
4. Енергоносії для проведення досліджень	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються

		у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	—	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7. Витрати на службові відрядження	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	5278,9	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі

Продовження таблиці 4.3

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
9. Накладні витрати	11614	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10. Усього витрат по темі	65682,27	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для оцінки цілеспрямованості проведення даної роботи потрібно провести розрахунок очікуваного економічного ефекту науково-дослідної роботи (НДР). Варто зазначити, що такий розрахунок можна здійснити тільки для НДР, які прямо спрямовані на створення нових матеріалів, розробку нових конструкцій та покращення якості продукції.

Для визначення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінювання економічної ефективності з використанням таких показників:

1. Важливість розробки (K1);
2. Можливість використання результатів розробки (K2);
3. Теоретичне значення та рівень новизни (K3);
4. Складність дослідження (K4).

Коефіцієнт K1 може приймати наступні значення:

а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів становить 1 бал;

б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво становить 3 бали;

в) робота являє собою частину відомчої програми становить 5 балів;

г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів становить 7 балів;

д) робота є частиною міжнародної комплексної програми становить 8 балів.

Коефіцієнт K2 може приймати такі значення:

а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі становить 1 бал;

б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією становить 3 бали;

в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями становить 5 балів;

г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі становить 8 балів;

д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K3 може приймати такі значення:

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

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів становить 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів становить 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо становить 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше становить 8 балів.

Коефіцієнт К4 може приймати такі значення (табл. 4.4):

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень становить 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень становить 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень становить 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень становить 7 балів;

д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень становить 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$Б = K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4 \quad (4.4)$$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення	Характеристики даної роботи	Кількість балів
----------------------------------	-------------------	-----------------------------	-----------------

	показника		
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

В даному випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.4 становить:

$$Б = 3 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 5 = 360$$

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_n \cdot B_{\text{НДР}} \quad (4.1)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 1.4).

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 360 - 0,2 \cdot 65682,27 = 166863,55 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}} \quad (4.2)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{166863,55}{65682,27} = 2,54$$

Коефіцієнт умовної економічної становить 2,54 (більше одиниці), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

1. В даному розділі була визначена планова кошторисна дипломної роботи, яка складає 65682 грн.

2. Економічний аналіз проведеного дослідження в ході виконання дипломної роботи показує, що це дослідження є економічно доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

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 структурних властивостей у нанорозмірних плівках FePt/FePd та FePd/FePt, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та безпеку у надзвичайних ситуаціях. Відпал у водні проводився в муфельній печі марки Siemens-Plama Berlin-Lichtenberg.

Аналізуючи умови праці при виконанні цієї дипломної роботи, потрібно розглянути такі чинники: мікроклімат; склад повітря робочої зони; шум; вібрації; електрична та пожежна безпека.

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні ДР

Науково-дослідницька робота виконувалась на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ КІП ім. Ігоря Сікорського в

лабораторіях № 028 корпусу № 9 та електронографії № 403, корпусу № 19. Схематичне зображення лабораторії № 403, а також розташування всіх її елементів представлено на рис. 5.1.

Було проведено вимірювання приміщення лабораторії №403 де в основному відбувалося дослідження:

- 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 – $36,48 \text{ м}^3$.

Площа та об'єм лабораторії, згідно з ДСанПІН 3.32-007-98, де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму, відповідають нормам [35].

Приміщення, в якому виконувалася НДР, має наступні установки:

- 1 – електронограф ЕМР – 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.

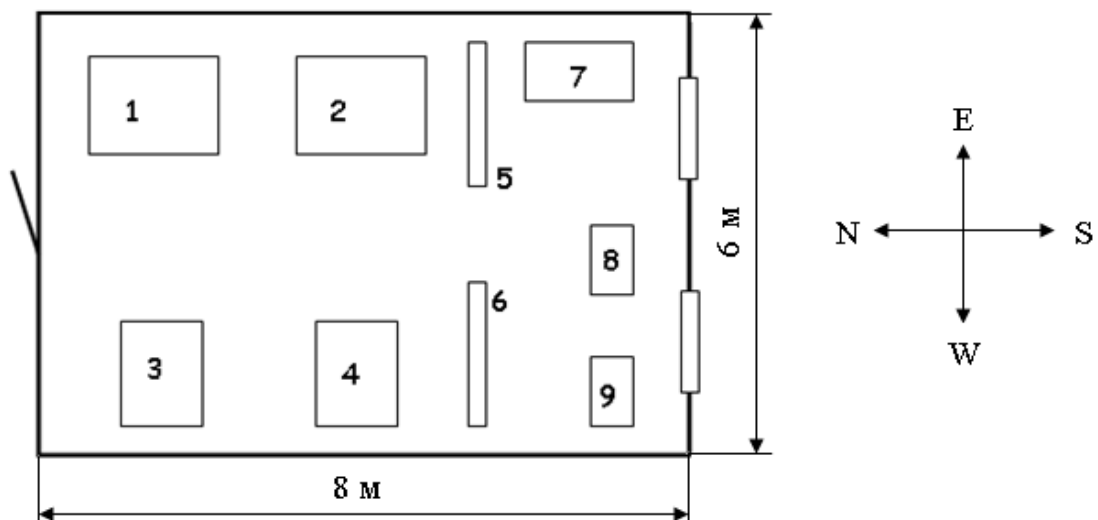


Рисунок 5.1 – Схема лабораторії в якій виконувалася НДР

5.1.1 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 [37-46].

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 проведене дослідження відповідає категорії I 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 холодний період року температура, швидкість руху повітря та відносна вологість відповідають нормам (21 °С; 0,1 м/с; 70 % відповідно). У теплий період року при природньому повітрообміні фактичні параметри також в межах норм (22 °С; 0,2 м/с; 55 % відповідно), за винятком невеликого перевищення відносної вологості, яке залишається припустимим (допустима – 60 % при 27 °С). Таким чином, можна зробити висновок, що мікроклімат у лабораторії відповідає санітарним вимогам.

У таблиці 5.1 наведено параметри мікроклімату приміщення лабораторії, де проводилася дана науково-дослідна робота.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату приміщення лабораторії термічної обробки [36]

Категорія робіт середньої важкості, Па
--

Період року	Температура, °C	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18 - 20	40 - 60	0,2
Виміряне значення	18	60	0,2
Теплий	21 - 23	40 - 60	0,3
Виміряне значення	23	50	0,2
Висновок щодо відповідності	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

Виконання науково-дослідної роботи, що проводилася у приміщенні лабораторії термічної обробки, відповідає категорії Па згідно класифікації. Ця категорія включає роботи, пов'язані з ходінням, переміщенням невеликих предметів або виробів вагою до 1 кг в положенні сидячи або стоячи, що потребують незначного рівня фізичного навантаження. За таких фізичних навантажень енерговитрати організму людини становлять від 160 ккал/год до 210 ккал/год [37-46].

За результатами мікрокліматичного аналізу можна зробити висновки, що приміщення лабораторії термічної обробки, в якому проводилася науково-дослідна робота, відповідає вимогам, встановленим у ДСН 3.3.6.042-99 [37], та створює комфортні мікрокліматичні умови для виконання цієї роботи.

5.1.2 Небезпечні чинники при роботі з піччю Siemens-Plama

Муфельна піч марки Siemens-Plama Berlin-Lichtenberg є високотемпературним обладнанням, яке використовується в лабораторіях та промислових умовах для проведення різноманітних термічних обробок матеріалів. Використання такого обладнання пов'язане з певними небезпечними чинниками, які можуть становити загрозу для здоров'я та життя персоналу, якщо не дотримуватися правил охорони праці.

Піч живиться від 380-вольтової мережі, тому пошкодження живильних кабелів та електрообладнання всередині установки може створити ризик ураження електричним струмом. Щоб забезпечити безпеку стосовно електрики, установка підключена до заземлювального проводу. Підключення живлення установки до електричної мережі здійснюється за допомогою автоматичних вимикачів.

Муфельна піч працює при дуже високих температурах, які можуть досягати 1200°C і більше. При недотриманні правил безпеки можливі опіки шкіри та пошкодження органів зору. Після закінчення встановленого циклу нагрівання піч автоматично або вручну вимикається та охолоджується природнім шляхом це найбільш безпечний і рекомендований метод охолодження.

Правильне використання печі Siemens-Plama Berlin-Lichtenberg є важливим для її надійної роботи та зниження ризику виникнення небезпечних ситуацій. Початок роботи з установкою та її вимкнення вимагають точного дотримання встановленої послідовності дій:

- зовнішній огляд установки на наявність пошкоджень обладнання;
- переконатися, що піч правильно заземлена.
- ввімкнення живлення установки та її запуск;
- ввімкнення системи вентиляції для забезпечення видалення шкідливих газів.;

Вимкнення відбувається в такій послідовності:

- дочекатися завершення встановленого циклу термічної обробки матеріалів;
- натиснути кнопку вимикання або вимкнути основний вимикач на панелі управління;
- відключити піч від електромережі;
- залишити піч у вимкненому стані для охолодження до безпечної температури та не відкривати дверцята печі до повного охолодження, щоб уникнути опіків та інших небезпек.

Процес відпалу у водні в муфельній печі може супроводжуватись виділенням певних шкідливих речовин у повітря. Склад повітря при такому процесі може містити наступні компоненти:

1. Водень (H_2): Основний газ, що використовується в процесі відпалу. Водень є вибухонебезпечним газом, тому його концентрація повинна контролюватися.
2. Водяна пара (H_2O): Водень може реагувати з оксидами металів, утворюючи водяну пару. Це не є шкідливим компонентом, але його наявність вказує на протікання хімічних реакцій.
3. Оксид вуглецю (CO): Може утворюватися внаслідок взаємодії вуглецевих залишків з воднем або вуглецевих матеріалів печі. CO є токсичним газом, що вимагає контролю концентрації.
4. Діоксид вуглецю (CO_2): Утворюється при повному згорянні вуглецю. Він не є токсичним при низьких концентраціях, але у високих концентраціях може викликати асфіксію.
5. Оксиди азоту : Можуть утворюватися при високотемпературних процесах, особливо в присутності повітря. NO_x є токсичними і подразнюючими речовинами.
6. Металічний пил або оксиди металів: Можуть утворюватися в залежності від матеріалу, що обробляється. Деякі оксиди металів є токсичними або подразнюючими.
7. Леткі органічні сполуки : Можуть виділятися з мастил або інших органічних речовин, що знаходяться на поверхні матеріалів перед відпалом.

Важливо забезпечити належну вентиляцію та контроль концентрації цих речовин у повітрі, щоб запобігти їх накопиченню до небезпечних рівнів і забезпечити безпеку працівників. Використання відповідних систем фільтрації і вентиляції може допомогти зменшити ризики, пов'язані з цими шкідливими речовинами.

5.1.3 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрацій

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

Під дією шуму відбувається зниження слухової чутливості, а отже й суттєве зниження продуктивності на робочому місці. Дуже ефективний спосіб боротьби з шумом – це зниження його в джерелі створення:

- заміна шумних технологічних процесів або обладнання малошумними;
- звуковбирання та звукоізоляція;
- екранування;
- оснащення шумних машин засобами дистанційного та автоматичного управління;
- застосування засобів індивідуального захисту.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСТУ 2867-94. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99 [38].

Вібрація – це механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація є видом механічного впливу, який має негативні наслідки для організму [38-43].

До джерел технологічної вібрації відносяться:

- верстати та метало-деревообробне;
- електричні машини;
- стаціонарні електричні установки;
- насосні агрегати та вентилятори та ін..

Вібрація має механічний вплив на організм людини та може бути причиною порушення його функціонування. Джерелом незначних вібрацій під час виконання НДР є муфельна електропіч Siemens-Plama.

Для зменшення впливу вібрацій на працівника та інше обладнання використовують методи віброгасіння. На вібруючі пристрої встановлюється динамічне навантаження, а самі пристрої розташовуються на окремий віброізований фундамент. Джерела коливань ізовані від опорних конструкцій гумовими прокладками, пружинами або іншими віброізоляторами.

5.1.4 Аналіз освітленості приміщення

У залежності від джерела світла освітлення може бути:

- природним (розсіяні на небосхилі або прямі сонячні промені);
- штучним (освітлення електричними пристроями);
- суміщеним (недостатня кількість природного освітлення компенсується штучним).

Природне освітлення поділяється на: бокове (одно або двобічне), що здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах приміщення; верхнє, що здійснюється через отвори в стелях та дахах; комбіноване – поєднання бокового та верхнього освітлення.

Штучне освітлення поділяється на загальне, місцеве та комбіноване. Загальне освітлення реалізується встановленням світильників у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над рівнем підлоги). Місцеве освітлення створюється світильниками, світловий потік яких сконцентровано безпосередньо на робочу поверхню. Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Використовувати лише місцеве освітлення у виробничих приміщеннях заборонено [39].

У приміщенні лабораторії № 403 реалізована схема суміщеного освітлення. В світлий час доби приміщення освітлюється природнім освітленням з вікон. При цьому, нестача, за умовами зорової роботи, природного освітлення може бути компенсована штучним, яке задовольняє норми ДБН В.2.5-28 2006 [39]. Загального освітлення забезпечується люмінесцентними лампами ЛБ-40 (24

одиниці), що розташовані на стелі приміщення, для місцевого – лампи розжарювання.

Нестача, надмірність або неоднорідність освітлення в полі зору втомлює очі, що є причиною зниження продуктивності праці. Це може бути джерелом потенційної небезпеки виконання помилкових дій та нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може викликати розлад гостроти зору та головний біль, відблиски від поверхонь можуть спричинити тимчасове засліплення [39].

5.1.5 Електробезпека

Відповідно до діючих правил побудови електричних пристроїв ПУЕ - 2017 приміщення лабораторії за небезпекою електротравм відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки [40]. 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.

5.1.6 Аналіз продуктивності вентиляції

Для ефективного розподілу повітря встановлена вентиляційна решітка у верхній частині приміщення для видалення забрудненого повітря (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Вентиляційна решітка

Для розрахунку продуктивності вентиляції слід враховувати об'єм приміщення, кількість людей, що перебувають у приміщенні [35].

Щоб визначити продуктивність вентиляції з даними розмірами лабораторії та кількістю людей, а саме 4, потрібно зробити розрахунки. За габаритами приміщення ($6 \text{ м} \times 8 \text{ м} \times 3,8 \text{ м}$), його об'єм становить: $182,4 \text{ м}^3$. Для

промислових приміщень застосовується кратність повітрообміну в діапазоні від 5 до 10 разів за годину. Візьмемо середнє значення, наприклад, 6 разів за годину. Потрібний об'єм повітрообміну є добутком об'єму приміщення та кратності та становить: $1094,4 \text{ м}^3/\text{год}$. Отже, продуктивність вентиляції для даного приміщення повинна складати $1094,4 \text{ м}^3/\text{год}$.

5.1.7 Інженерні рішення та засоби індивідуального захисту

Для забезпечення безпеки працівників при роботі з муфельною піччю Siemens-Plama Berlin-Lichtenberg необхідно використовувати такі засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

1. Захист від високих температур:
 - Теплозахисний одяг і рукавиці.
 - Теплозахисне взуття.
2. Захист органів зору:
 - Захисні окуляри або щитки.
3. Захист від електричного струму:
 - Діелектричні рукавиці і взуття.
 - Ізолюючі килимки.
4. Захист органів дихання:
 - Респіратори або маски.
 - Системи подачі чистого повітря.
5. Захист шкіри:
 - Лабораторні халати або спецодяг.
 - Захисні креми.
6. Захист від шуму і вібрацій:
 - Шумозахисні навушники або вкладиші.
7. Додаткові заходи:
 - Вентиляція і витяжки.
 - Контрольні прилади для моніторингу шкідливих речовин.

5.1.8 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.07.005-86 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 [42,44].

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 вуглекислотноброметиловий 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).

3) працівники повинні утримуватися від виходу на вулицю під час тривання "Повітряної тривоги".

б) укриття або захисна споруда:

1) працівники повинні швидко та організовано пересунутися до укриття або захисної споруди;

2) в укритті необхідно дотримуватися вказівок та інструкцій цивільного захисту, наданих співробітниками керівництва або відповідними органами.

в) після закінчення сигналу "Повітряна тривога":

1) працівники можуть повернутися на робочі місця або відповідно до додаткових вказівок керівництва або органів цивільного захисту;

2) завдання щодо цивільного захисту повинні бути виконані відповідно до інструкцій та вимог.

Тобто, у разі отримання сигналу "Повітряна тривога", працівники мають негайно діяти, слідувати вказівкам керівництва і піти до найближчих укриттів або захисних споруд. Дотримання інструкцій та вказівок з безпеки є важливим для забезпечення особистої безпеки і зменшення ризиків під час надзвичайних ситуацій.

5.2 Висновок до розділу 5

Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, а саме: мікроклімату, складу повітря робочої зони, шуму, вібрації, 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. Аналіз літературних джерел виявив, що матеріали на основі сплаву FePt(FePd) є перспективними для використання як магнітні носії інформації та функціональних елементів спінтроніки.

2. Розглянуто методики сучасного фізичного матеріалознавства: рентгеноструктурний фазовий аналіз, електроннографічний аналіз, скануючу електронну мікроскопію, які дозволяють дослідити зміни фазового складу, структури та морфології поверхні плівок FePt/FePd та FePd/FePt на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001).

3. Встановлено, що формування впорядкованої фази $L1_0$ у плівках FePt/FePd починається під час відпалу у водні за температури 500 °C. Зміна розташування шарів у плівці FePd/FePt призводить до зменшення температури початку утворення фази $L1_0$ на 100 °C.

4. Визначено, що з підвищенням температури відпалу до 700 °C збільшується кількість та ступінь впорядкування фази $L1_0$. Ступінь впорядкування у плівках FePd/FePt майже вдвічі більше.

5. Встановлено, що найбільша кількість зерен впорядкованої фази $L1_0$ з текстурою (001) зростає у плівці FePd/FePt під час відпалу у водні за температури 650 °C. За температури 700 °C обидві плівки FePt/FePd стають несуцільними, що пов'язано з острівцевим зростанням зерен впорядкованої фази.

6. Показано, що це дослідження за темою дипломної роботи є економічно доцільним.

7. Встановлено, що умови мікроклімату, рівень шуму, вібрацій, освітлення а також організація робочого місця в лабораторії відповідають вимогам діючих санітарних норм.

CONCLUSIONS

1. Analysis of literary sources has revealed that materials based on the FePt(FePd) alloy are promising for use as magnetic information carriers and functional elements in spintronics.

2 The methods of modern physical materials science are considered: X-ray structural phase analysis, electronographic analysis, scanning electron microscopy, which allow to study changes in the phase composition, structure and surface morphology of FePt/FePd and FePd/FePt films on SiO₂(100 nm)/Si(001) substrates.

3. It was established that the formation of the ordered $L1_0$ phase in FePt/FePd films begins during annealing in hydrogen at a temperature of 500 °C. The change in the arrangement of the layers in the FePd/FePt film leads to a decrease in the temperature of the beginning of the formation of the $L1_0$ phase by 100 °C.

4. It was determined that with the increase of the annealing temperature to 700 °C, the amount and ordering degree of the $L1_0$ phase increases. The degree of ordering in FePd/FePt films is almost twice as much.

5. It was established that the largest number of grains of the ordered $L1_0$ phase with the (001) texture grows in the FePd/FePt film during annealing in hydrogen at a temperature of 650 °C. At a temperature of 700 °C, both FePt/FePd films become discontinuous, which is due to the island growth of grains of the ordered phase.

6. It is shown that this research topic for the diploma thesis is economically justified.

7. It has been established that the microclimate conditions, noise level, vibrations, lighting, as well as the organization of the workplace in the laboratory, comply with the requirements of current sanitary norms.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ovanov O. A. Measurement of anisotropy constant and saturation magnetization of iron-platinum alloy and magnetic properties of its powders/ O. A. Ovanov, L. V. Solina and V. A. Demshina // Phys. Met. Metallogr. –1973.–Vol. 35.– P. 81.
2. Thiele J. U. Perpendicular magnetic anisotropy and magnetic domain structure in sputtered epitaxial FePt (001) films / J.U. Thiele, L. Folks, M. F. Toney, D. K. Weller // J. Appl. Phys. –1998. –Vol.84. –P.5686.
3. Kim M. G. Role of magnetoelastic anisotropy in Ni/Pt multilayer films / M. G. Kim, S. C. Shin // J. Appl. Phys. – 1995 – Vol.66. –P.1692.
4. Visokay M. R. Materials Science Aspects / M. Visokay and R. Sinclair // J. Appl. Phys. –1995. –Vol.66 –P.1692.
5. Schoenherr S. The History of Magnetic Recording / S.Schoenherr // University of San Diego, presented at Magnetism Society Seminar– UCSD. – 2002. – Nov.5.
6. Даниленко Ю. Від 5 МБ пам'яті до 50 ТБ. Еволюція жорсткого диска в цифрах і фото [Електронний ресурс] / Юлія Даниленко // Speka - онлайн медіа про технології та підприємництво | Speka.media | – Режим доступу: <https://speka.media/vid-5-mb-pamyati-do-50-tb-evolyuciya-zhorstkogo-diska-v-cifrah-i-foto-98g16p> (дата звернення: 15.05.2024).
7. Kumar N. Baseline Wander Cancellation on Trellis for Perpendicular Magnetic Recording / N. Kumar // IEEE Transactions on Communications. – 2015. – Vol. 63, no 10. – P. 3600–3606.
8. Лебедь О. Фізичні основи інформаційних систем / О. Лебедь, В. Ф. Орленко, О. Д. Кочергіна // Рівне : навчальний посібник. – 2013. – 132 с.
9. Weller D. A. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. / D. A. Weller, L. Moser, M. E. Folks // IEEE Trans. Magn. – 2000. – Vol.36. –P.10.
10. Piramanayagam S.N. Perpendicular recording media for hard disk drives/ S.N. Piramanayagam // Journal of applied physics. – 2007. – Vol.102. – P.1301.

11. Bertero G. A. Optimization of granular double-layer perpendicular media / G. A. Bertero, D. Wachenschwanz, S. Malhorta // IEEE transactions on magnetics. – 2002. – Vol.38. – P.1627-1631.
12. Shimatsu T. Thickness reduction in CoPtCr-SiO₂ perpendicular recording media to improve media performance / T. Shimatsu, Y. Inaba, H. Sato, I. // IEEE transactions on magnetics. – 2004. – Vol.40. – P.2461- 2463.
13. Yuan F.T. Magnetic reversal study of Au-FePt thin films with very high coercivity / F.T. Yuan, S.K. Chen, L. Horng, J.L. Tsai // IEEE transactions on magnetics. – 2005. – Vol.41. – P.3346-3348.
14. Wang B. The A1 to L1₀ transformation in FePt films with ternary alloying additions of Ag and Au / B. Wang, K. Barmak, T.J. Klemmer // IEEE transactions on magnetics. – 2010. – Vol.46. – P.1773-1776.
15. Tsujikawa M. Finite electric field effects in the large perpendicular magnetic anisotropy surface Pt/Fe/Pt (001) / M. Tsujikawa, T. Oda. //Physical review letters. – 2009. – Vol.102. – P.247203.
16. Weller D. Magnetic magneto-optical properties of cobalt-platinum alloys with perpendicular magnetic anisotropy / D. Weller, H. Brandle, G. Gorman, C.Lin, // Applied physics letters. – 1992. – Vol.61. – P.2726-2728.
17. Safran G. Nano-structure formation of Fe-Pt perpendicular magnetic recording media co-deposited with MgO, Al₂O₃ and SiO₂ additives / G. Safran, // Thin solid films. – 2005. – Vol.496. – P.580-584.
18. Singh A.K. Thermal stability of granular-type FePt-MgO perpendicular recording media with soft underlayers / A.K. Singh, J. Yin, T. Suzuki // IEEE transactions on magnetics. – 2005. – Vol 41. – P.3205-3207.
19. Preparation condition of Co-Pt-Cr-SiO₂ films with high coercivity / C.Y. Tan, [et al.] // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2004. – Vol.287. – P.172-175.
20. Low-temperature growth of perpendicular FePt films / Y.C. Wu, [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 2005. – Vol.41. – P.3199-3201.

21. Ito H. Control of the size for octahedral FePt nanoparticles and their magnetic properties / H. Ito, T. Shima, K. Takanashi // IEEE transactions on magnetics. – 2005. – Vol.41. – P.3373-3375
22. Sato K. Electron Microscopy Studies on Magnetic L1₀-Type FePd Nanoparticles / K. Sato, T. J. Konno, Y. Hirotsu // Elsevier Inc. –2012. – Vol.170.– P. 165–225.
23. Burzo E. Magnetic properties of iron- palladium solid solutions and compounds / E. Burzo // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2010. – Vol. 12. – P. 1869– 1878.
24. Hydrogen in Steels [Електронний ресурс] // IspatGuru. – Режим доступу: <https://www.ispatguru.com/hydrogen-in-steels/> (дата звернення: 15.05.2024).
25. Thermally modulated hydrogenation in Fe_xPd_{1-x} alloy films: Temperature-driven peculiar variation of magnetism / P.-Ch. Chang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2020. – Vol. 116, no 10. – P. 102407.
26. L1₀ phase formation in FePd thin films induced by H₂ during annealing / M. N. Shamis [et al.] // Applied Nanoscience. – 2022. –Vol.12 – P.1227.
27. Magnetron sputtering [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://angstromengineering.com/tech/magnetron-sputtering/> (дата звернення: 21.05.2024).
28. Tran Y. Suppressed silicide formation in FePt thin films by nitrogen addition /Y. Tran, C.D. Wright // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2013. – Vol.331. – P.216-219.
29. Effect of addition of N on L10 transformation and atomic diffusion in FePt films // V. Phatak, [et al.] // Acta Materialia. – 2010. – Vol.58. – P.979-988.
30. Influence of the annealing atmosphere on the structural properties of FePt thin films // Vladymyrskyi I. A., [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol.114. – №. 16. – P.164314.
31. Електронографія [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://leksika.com.ua/14060704/ure/elektronografiya> (дата звернення: 17.05.2024).
32. Кожура В. С. Термічне окиснення тонких шарів вакуумно осадженого хрому: магістерська дисертація / Кожура Віталій Сергійович – Київ, 2018. – 74 с.

33. Методи дослідження структури твердих тіл : навч. посіб. [В. В. Ожерельєв та ін.] – Київ : Знання, 2021. – 101 с.
34. Scanning-electron-microscopy [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/> (дата звернення: 20.05.2024).
35. Документація. Будівельні норми і правила : ДСан ПіН 3.32 .007 – 98 – [Чинний від 01.04.2019]. – Київ : «Український зональний науково-дослідний і проектний інститут по цивільному будівництву», 2019. – 99 с.
36. Желібо Є.П Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний // За ред. Є.П. Желібо. – Київ: «Каравела»; 2001. – 320 с.
37. Документація. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 01.12.1999]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 10 с.
38. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 01.12.1999]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 17 с.
39. Документація . Природне та штучне освітлення : ДБН В.2.5.28-2006 – [Чинний від 01.10.2006]. – Київ : «Мінбуд Ураїни», 2006. – 78 с.
40. Документація. Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд : ДБН В2.5-13-98. – [Чинний від 01.01.2007]. – Київ : ЗАТ «Спецавтоматика», 2007. – 79 с.
41. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.
42. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

43. Вібрація та захист від неї [Електронний доступ] / Режим доступу до ресурсу <https://www.diagram.com.ua/info/ohrana/ohrana-truda187.shtml> (дата звернення: 25.05.2024).
44. Документація. Системи протипожежного захисту : ДБН В.2.5-56:2014. – [Чинний від 01.11.2019]. – Київ : ПП «НТЦ УСВППП», 2018. – 27 с.
45. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.
46. Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний та ін. // За ред. О.Г. Левченка. – К.: Основа, 2019. – 472 с.