

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

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

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
Мирослав КАРПЕЦЬ
«__» _____ 20__ р.

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

**на тему: «Процеси впорядкування у плівках FePt на підкладках
SiO₂/Si(001) під час термічного оброблення у водневій атмосфері»**

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФМ-21мп
Пузик Максим Юрійович

Науковий керівник:
к.т.н., ст.викл. Вербицька Т.І.

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

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

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

Рецензент:
доц. каф.ВТ і ПМ, к.т.н. Соловійова Т.О.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

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

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Мирослав КАРПЕЦЬ

«___»___20__р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Пузику Максиму Юрійовичу

1. Тема дисертації «Процеси впорядкування у плівках FePt на підкладках SiO₂/Si(001) під час термічного оброблення у водневій атмосфері», науковий керівник дисертації Вербицька Тетяна Іванівна к.т.н., ст.викл. затверджені наказом по університету від 08.11.2023р. № 5195-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження процеси упорядкування у плівках FePt та вплив їх товщини на формування впорядкованої фази L1₀
4. Вихідні дані наукова та технічна література; Результати записів з приладів по використаним методикам
5. Перелік завдань, які потрібно розробити розрахувати та проаналізувати данні по методикам що використовуються в роботі; зробити загальні висновки по процесам впорядкування у плівках FePt
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація у форматі Power Point
7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

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

9. Дата видачі завдання 04.09.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури з основ магнітного запису та основних матеріалів для його забезпечення	06.09.2023 р. – 18.09.2023 р.	
2	Огляд наукових робіт по дослідженню плівок FePt та відпалу у водні	19.09.2023 р. – 25.09.2023 р.	
3	Вибір та ознайомлення методиками для дослідження процесів впорядкування у плівках FePt	20.09.2023 р. – 01.10.2023 р.	
4	Розрахунок та аналіз даних рентгеноструктурного фазового аналізу	02.10.2023 р. – 21.10.2023 р.	
5	Розрахунок та аналіз даних електронографічного аналізу	22.10.2023 р. – 05.11.2023 р.	
6	Розрахунок та аналіз даних феромагнітного резонансу	06.11.2023 р. – 09.12.2023 р.	
7	Розрахунок та аналіз даних раманівської спектроскопії	10.12.2023 р. – 16.12.2023 р.	
8	Формування розділу «Охорона праці»	17.12.2023 р. – 31.12.2023 р.	
9	Формування розділу «Розробка стартап-проекту»	15.12.2023 р. – 04.01.2023 р.	

10	Оформлення магістерської дисертації	01.01.2024 р. – 04.01.2024 р.	
11	Оформлення презентації для захисту дисертації	01.01.2024 р. – 04.01.2024 р.	
12	Підготовка до захисту магістерської дисертації	02.01.2024 р. – 15.01.2024 р.	
13	Попередній захист магістерської дисертації	05.01.2024 р.	
14	Захист магістерської дисертації	16.01.2024	

Студент

Максим ПУЗИК

Науковий керівник

Тетяна ВЕРБИЦЬКА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 103 сторінок, 20 таблиць, 57 рисунків, 3 формули, 52 літературних джерел.

ВІДПАЛ У ВОДНІ, ВПОРЯДКОВАНА ФАЗА, НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКИ, ПРОЦЕСИ ВПОРЯДКУВАННЯ, FePt.

Об'єкт дослідження: процеси упорядкування у плівках FePt та вплив їх товщини на формування впорядкованої фази $L1_0$.

Предмет дослідження: нанорозмірні плівки на основі сплаву $Fe_{50}Pt_{50}$ товщиною 5 нм, 10 нм та 20 нм.

Мета роботи: виявлення закономірностей структурно-фазових перетворень та впорядкування у плівках FePt на підкладках $SiO_2/Si(001)$ в залежності від товщини плівки під час термічного оброблення у водневій атмосфері.

Методи дослідження: рентгеноструктурний фазовий аналіз, електронографічний аналіз, феромагнітний резонанс та раманівська спектроскопія комбінаційного розсіювання.

Результати дослідження та їх новизна: виявлено, що під час термічної обробки у атмосфері водню в інтервалі температур 300 °C – 700 °C збільшення товщини плівки до 10 нм призводить до зменшення температури впорядкування на 100 °C (до 400 °C).

Сфера застосування: Проектування, розробка та виготовлення магнітних носіїв інформації з підвищеною щільністю запису, нанoeлектроніка, спінтроніка, подальші наукові дослідження магнітної електроніки.

ABSTRACT

Master dissertation: 103 pages, 20 tables, 57 figures, 3 formulas, 52 literary sources.

FePt, NANO-SIZED FILMS, PROCESSES OF ORDERING, ANNEALING IN HYDROGEN, ORDERED PHASE.

Object of the study: ordering processes in FePt films and the influence of their thickness on the formation of the ordered $L1_0$ phase.

Subject of the study: nanoscale films based on $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ alloy with a thickness of 5 nm, 10 nm and 20 nm.

Aim of the study: detection of regularities of structural-phase transformations and ordering in FePt films on $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ substrates depending on the film thickness during heat treatment in a hydrogen atmosphere.

Research methods: X-ray structural phase analysis, electronographic analysis, ferromagnetic resonance and Raman spectroscopy.

Results and novelty: it was found that during heat treatment in a hydrogen atmosphere in the temperature range of 300 °C – 700 °C, an increase in the film thickness to 10 nm leads to a decrease in the ordering temperature by 100 °C (to 400 °C).

Fields of application: Design, development and production of magnetic information carriers with increased recording density, nanoelectronics, spintronics, further scientific research of magnetic electronics.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	5
ABSTRACT.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Магнетизм	13
1.2 Основи магнітного запису	15
1.2.1 Магнітний запис	15
1.2.2 Процес запису та відтворення	18
1.2.3 Поздовжній запис	19
1.2.4 Перпендикулярний запис	20
1.2.5 Проблеми з майбутнім магнітним записом надвисокої щільності	21
1.3 Магнітні матеріали для носіїв запису високої щільності	22
1.3.1 Сучасні гексагональні Со-сплави	22
1.3.2 Сплави FePt	23
1.3.3 Використання плівок FePt для магнітного запису	25
1.4 Взаємодія Pt та Fe із воднем в масивному стані	28
1.5 Висновки до розділу 1	29
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
2.1 Матеріали дослідження	30
2.2 Технологія виготовлення тонких плівок	30
2.3 Методики дослідження	33
2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	33
2.3.2 Електронографічний аналіз	37
2.3.3 Метод феромагнітного резонансу	40
2.3.4 Раманівська спектроскопія комбінаційного розсіювання	42
2.4 Висновки до розділу 2	45
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	46
3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз плівок FePt.....	46

3.1.1 Формування фазового складу у плівках FePt (5 нм) під час відпалу у водні	46
3.1.2 Формування фазового складу у плівках FePt (10 нм) під час відпалу у водні	55
3.1.3 Формування фазового складу у плівках FePt 20 нм при відпалі у водні	61
3.2 Електронографічний аналіз.....	67
3.3 Дослідження фазових та структурних перетворень у плівках FePt (10 нм) методом раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання	72
3.4 Метод феромагнітного резонансу.....	75
3.5 Висновки до розділу 3	76
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	77
4.1 Характеристики приміщення	77
4.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)	78
4.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення	78
4.2.2 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрації	79
4.2.3 Розрахунок і аналіз освітленості приміщення.....	80
4.2.4 Електробезпека	81
4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	82
4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	84
4.4.1 Пожежна безпека	84
4.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях	85
4.5 Висновок до розділу 5	86
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ	87
5.1 Опис ідеї проєкту	87
5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту	88
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	89
5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	95
5.5 Висновки до розділу 5	97
ВИСНОВКИ	98
CONCLUSIONS.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ФМР – феромагнітний резонанс;

ОЦК – об’ємноцентрована кубічна ґратка;

ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка;

ГЦУ – щільноупакована ґратка;

SNR – співвідношення сигнал/шум;

ОКР – області когерентного розсіювання;

DC – постійний струм;

RF – радіочастотний.

СКР – спектроскопія комбінаційного розсіювання

ВСТУП

У сучасних комп'ютерах, як базова архітектура зберігання, широко використовується метод магнітного запису. Типовим прикладом є жорсткий диск (HDD). Щоб підвищити продуктивність жорсткого диска, важливим завданням на виробництвах є збільшення щільності запису або зменшення розміру окремої одиниці зберігання [1].

Виробництво сучасних великомістких магнітних накопичувачів базується на використанні тонкоплівкових матеріалів. Завдяки впровадженню нових магнітних компонентів та вдосконаленню технологій виготовлення тонких шарів накопичувача, поверхнева щільність запису інформації стрімко зростає. Наприклад, у 1998 році вона становила близько 12 Гбіт/дюйм², у 2000 році – приблизно 100 Гбіт/дюйм², а вже до 2015 року перевищила 1,34 Тбіт/дюйм² [2].

Для відтворення інформації, записаної з високою щільністю, використовується тонкоплівковий елемент, чий електричний властивості змінюються в магнітному полі. Такий елемент відомий як магніторезистивний. Виготовлений з магнітного матеріалу, наприклад, пермалою, електричний опір магніторезистивного елемента може змінюватися приблизно на 2 %. Відносна зміна електричного опору може досягати значень у десятках відсотків в багатошарових тонкоплівкових матеріалах та одношарових гранульованих плівках, і такі матеріали отримали назву – матеріали з надгігантським магнітоопором [3].

Суперпарамагнетизм обмежує щільність зберігання жорстких дисків найменшим розміром частинок, який можна використовувати. Ця межа щільності відома як суперпарамагнітна межа. Застаріла технологія жорсткого диска використовує запис у площині. Орієнтовний ліміт становить (100–200) Гбіт/дюйм². Сучасна технологія жорсткого диска використовує перпендикулярний запис. Станом на липень 2020 року диски з щільністю

близько 1 Тбіт/дюйм² комерційно доступні. Це досягає межі звичайного магнітного запису, передбаченого в 1999 році [4].

У майбутніх магнітних носіях запису, щільність площі яких перевищує 1 Тбіт/дюйм², очікується, що розмір феромагнітних частинок, диспергованих у немагнітній матриці, становитиме кілька нм навіть для розміру біта в кілька десятків нанометрів, для досягнення високого співвідношення сигнал/шум. Такі феромагнітні наночастинки стають термічно нестабільними, коли їх розмір досягає суперпарамагнітної межі. Завдяки великій магнітокристалічній анізотропії ($K_u = 7 \times 10^7$ ерг/см³) і хорошій корозійній стійкості $L1_0$ – впорядкована фаза FePt є найбільш перспективним матеріалом для магнітних носіїв надвисокої щільності [5].

В даній роботі досліджуються процеси впорядкування у плівках FePt різної товщини на підкладках SiO₂/Si(001) під час термічного оброблення у водневій атмосфері.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Магнетизм

Навіть у давні часи магнетизм широко вивчався і використовувався у сучасному людському суспільстві. Магнітне зберігання даних, постійні магніти та магнітно-резонансне зображення є трьома найважливішими застосуваннями магнітної технології. У магнітних матеріалах спін і орбітальне обертання електронів генерують намагніченість та магнітний момент. Існують кілька видів магнетизму, які класифікуються за їх взаємодією з прикладеним магнітним полем та з сусідніми атомами.

Діамагнетизм

У діамагнетиків магнітні моменти схильні вирівнюватися антипаралельно прикладеному полю. Усі матеріали виявляють діамагнетизм, але його ефект дуже слабкий. Тому він виявляється лише в немагнітних матеріалах.

Парамагнетизм

У матеріалах, що мають парамагнітні властивості магнітні моменти можуть бути вирівняні зовнішнім полем та насичуватися, якщо поле дуже сильне. Однак після зняття зовнішнього поля вирівнювання моментів стане випадковим, і чиста намагніченість зменшиться до нуля.

Феромагнетизм

З точки зору застосування, феромагнетизм є найважливішим типом магнетизму. У феромагнітних матеріалах магнітні моменти сусідніх атомів міцно пов'язані між собою і реагують на зовнішні поля. Але, на відміну від парамагнетиків, феромагнітний матеріал проявляє гістерезис, оскільки він має ненульовий залишковий магнетизм (залишкове намагнічування) при нульовому полі.

Рисунок 1.1 показує типову петлю гістерезису феромагнітних матеріалів. Він зображує зміну намагніченості відносно магнітного поля. Коли магнітне

поле досягає критичної величини, воно викликає насичення магнітного матеріалу, вирівнюючи всі магнітні моменти паралельно зовнішньому полю. Після видалення поля обмінний зв'язок між моментами працює для підтримки вирівнювання, що призводить до залишкової намагніченості навіть без зовнішнього поля. Щоб скинути сумарну намагніченість до нуля (розмагнітити матеріал), до матеріалу необхідно застосувати протилежне поле, яке називається коерцитивною силою. Коли магнітний момент дуже малий, термічний ефект стає визначальним. Схоже на парамагнетизм, в цьому стані магнітні моменти мають тенденцію випадково вирівнюватися, і чиста намагніченість стає нульовою без зовнішнього поля. Це явище відоме як суперпарамагнетизм і є однією з найважливіших обмежень, які заважають подальшому збільшенню щільності магнітного запису.

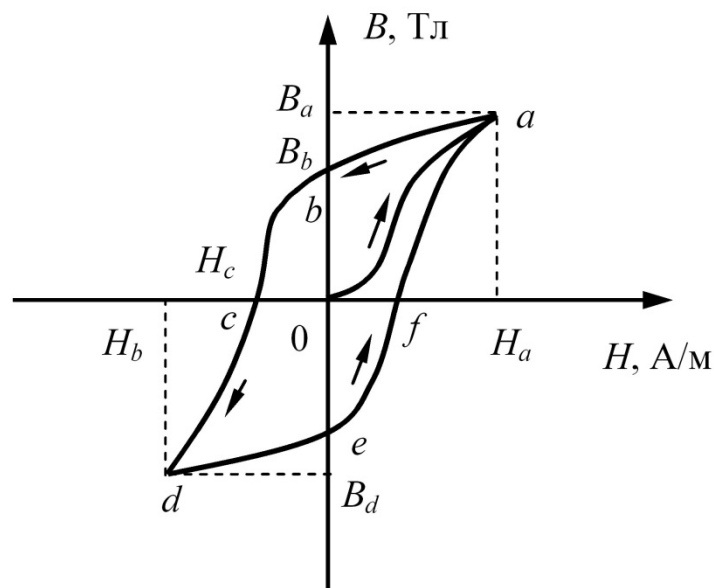


Рисунок 1.1 – Типова петля гістерезису ферромагнітних матеріалів [6]

Антиферромагнетизм

В антиферромагнітних матеріалах магнітні моменти мають тенденцію вирівнюватись антипаралельно з сусідніми моментами. Атоми демонструють негативний зв'язок молекулярного поля, змушуючи моменти двох сусідніх сусідів вказувати в протилежних напрямках. У результаті чиста намагніченість

антиферромагнітних матеріалів дорівнює нулю. Антиферромагнітні матеріали зазвичай включають іонні сполуки, зокрема оксиди.

Феримагнетизм

Подібно до антиферромагнетизму, у феромагнітних матеріалах сусідні пари електронів мають тенденцію вказувати в протилежних напрямках. Однак, на відміну від антиферромагнетизму, у феримагнетизмі намагніченості двох підґраток різні. Тому сумарна намагніченість феримагнітних матеріалів відмінна від нуля.

1.2 Основи магнітного запису

1.2.1 Магнітний запис

З винайденням магнітної стрічки та жорсткого диска технологія магнітного запису значно просунулася протягом останніх десятиліть і стала основною технологією в інформаційному суспільстві. Перший комерційний жорсткий диск, який отримав назву 350 RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control), був продемонстрований компанією IBM у вересні 1956 року. Він містив п'ятдесят 24-дюймових дисків і важив сотні кілограмів. Його щільність становила всього 5 Кбіт/дюйм², а ємність – лише 5 МБ, але він успішно здійснював випадковий доступ, переміщаючи свою магнітну голівку в будь-яку область зберігання на диску. У 1968 році IBM вперше запропонувала технологію Winchester; її диск-пакети, голівка і механізм руху були запечатаними. Як прототип найсучаснішого жорсткого диска, IBM 3340 був представлений у 1973 році на основі технології Winchester. Потім, завдяки винаходу голівки з тонкоплівковим покриттям, об'єм жорсткого диска значно зменшився. На сьогодні щільність магнітних носіїв наближається до 1 Тбіт/дюйм², а комерційні жорсткі диски об'ємом до 4 ТБ доступні для особистих комп'ютерів. Рисунок 1.2 показує еволюцію щільності запису жорсткого диска від періоду першого комерційного продукту до майбутнього.

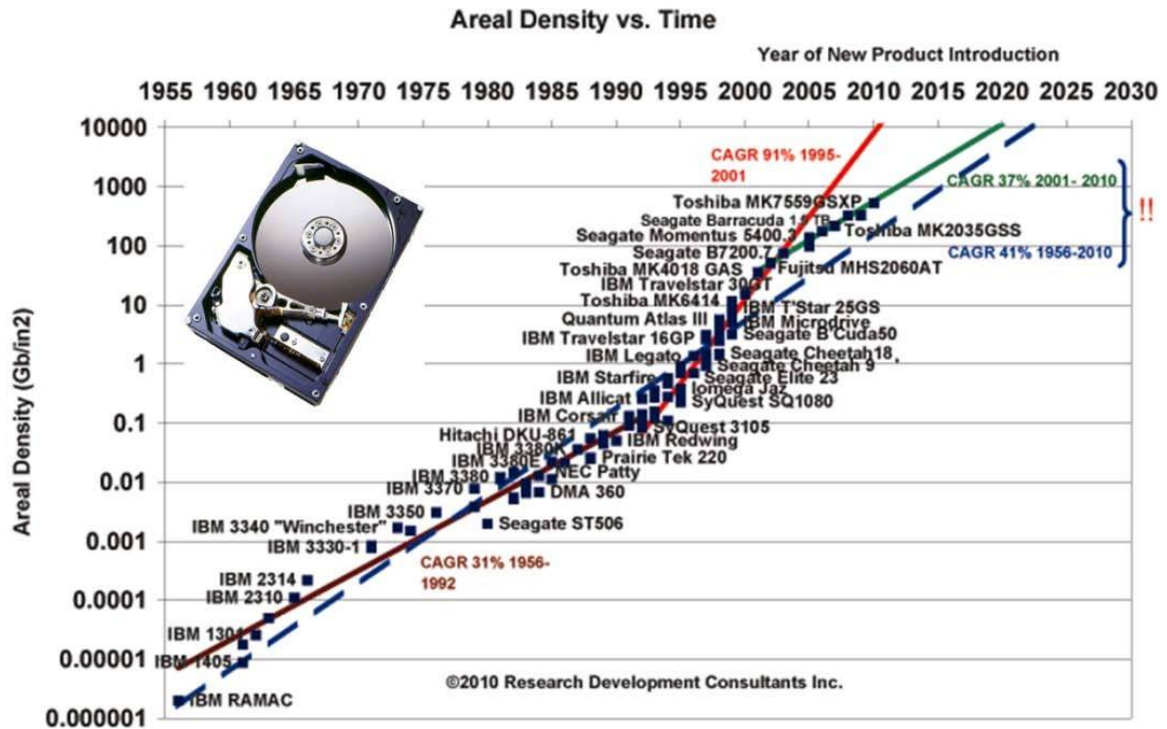


Рисунок 1.2 – Графік розвитку площинної щільності жорсткого диска [7]

Як видно на графіку, щорічний темп зростання площинної щільності досягав максимального значення приблизно 60 % у 1990-х роках. Після цього зростання стало повільнішим, оскільки вважалося, що магнітний запис наблизився до фізичного обмеження. Зараз площинна щільність зросла на 9 порядків від 1950-х років.

Рисунок 1.3 показує основну структуру та компоненти жорсткого диска. Дані зберігаються на стопці дисків. Швидкість обертання дисків може коливатися від кількох тисяч обертів за хвилину до понад 10 тисяч обертів за хвилину. Чим швидше обертається диск, тим коротший час доступу. Голівка використовується для читання та запису даних на диски та з дисків. З обертанням диска і рухом руки голівка може отримати доступ до будь-якої області на диску. У жорсткого диска також є складні електронні компоненти, які керують процесом запису, перетворюють сигнал читання назад в цифрові дані і встановлюють відповідний струм для запису цифрової інформації на дисках. Диски формуються так, щоб мати багато доріжок, які представляють

собою концентричні кола. Дані зберігаються лише на доріжках. Однак доріжки фізично не розділяються, але позначаються різними магнітними станами. Усі дані записуються на магнітній тонкій плівці з напиленням, яка розташована зверху дисків.



Рисунок 1.3 – Основна механічна структура та компоненти жорсткого диска [8]

Як показано внизу на рисунку 1.4, носій запису складається з численних крихітних зерен, кожна з яких має розмір менше 10 нм. Ці зерна складаються з феромагнітного матеріалу та ізольовані немагнітними матеріалами, такими як оксиди. Набір зерен використовується для запису одного біта, і вони з'єднані разом як феромагнітні матеріали. Кожен біт може бути намагнічений записуючою голівкою (записувачем), а його намагніченість може бути відчута

зчитувальною голівкою (зчитувачем). Цей процес є механізмом, через який здійснюється доступ до інформаційних даних.

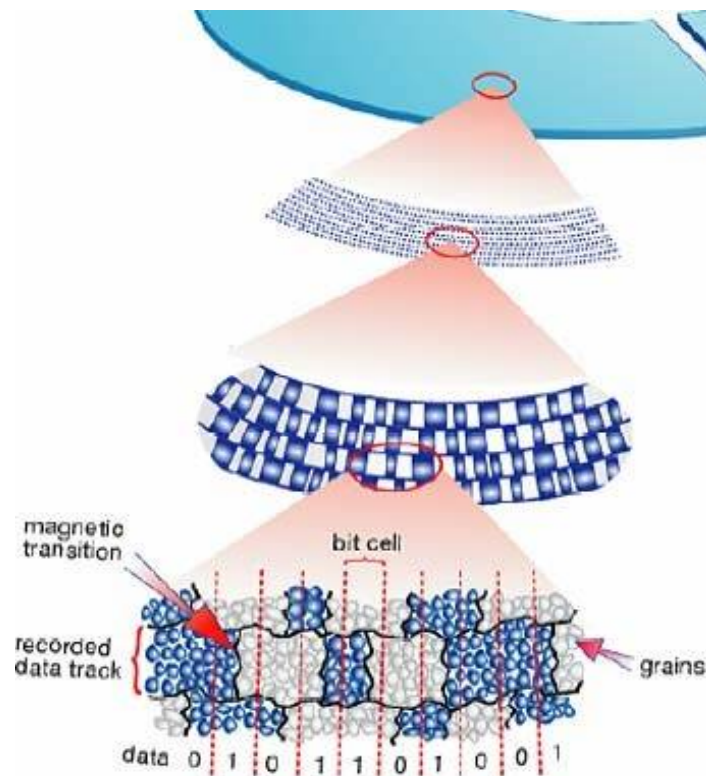


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення зернистої структури носія з бітом запису [9]

1.2.2 Процес запису та відтворення

Процес запису

Під час процесу запису генерується записуючий струм відповідно до інформації, яку слід зберегти. Цей струм намагнічує записуючу голівку та створює магнітне поле, спрямоване до носія. В області на носії, де магнітне поле більше поля, що перемикається, відбувається зміна намагніченості біта запису. Таким чином, інформація записується.

Процес відтворення

У зчитувальній голівці є магніторезистивний (MR) блок, опір якого змінюється залежно від його стану намагніченості. За допомогою компоненти

MR зчитувальна голівка може виявляти магнітний потік. Оскільки диск обертається, а зчитувальна голівка рухається по доріжках та переходах бітів, зміна магнітного потоку виявляється зчитувальною голівкою і викликає напругу, яку можна визнати електронною частиною.

1.2.3 Поздовжній запис

У системі поздовжнього запису намагніченість бітів лежить у площині. Для запису даних використовувався випадковий магнітний поляризатор від кільцевої голівки. На рисунку 1.5 представлена схема системи поздовжнього запису.

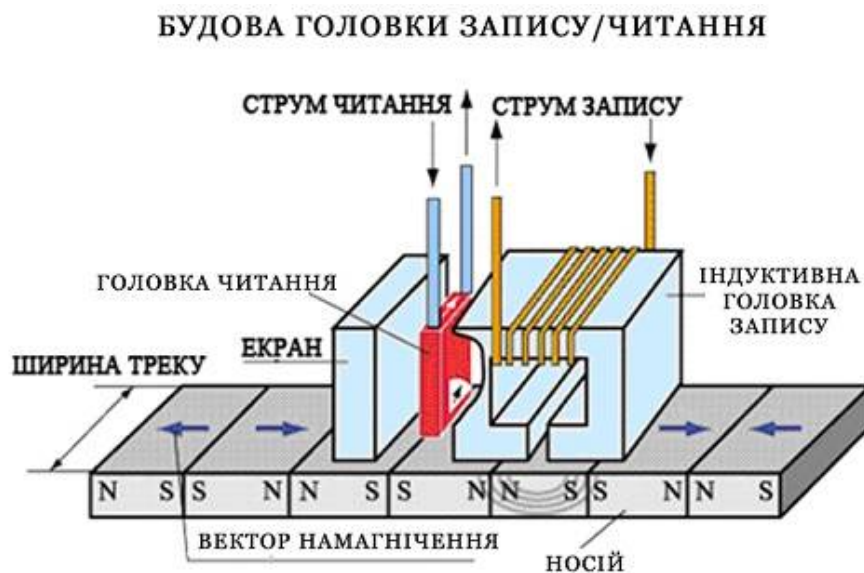


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення поздовжнього запису [10]

Цей метод широко використовувався протягом десятиліть, але серйозною проблемою став, коли люди прагнули подальшого збільшення площинної щільності. Під час переходу намагніченість двох сусідніх бітів спрямована один до одного. Біт, що відчуває поле розмагнічування від свого сусіда, стає нестабільним, і його намагніченість може бути змінена через ефекти теплових флуктуацій. Цей перехід між двома бітами призводить до ширшої області

переходу, що знижує відношення сигнал/шум. Крім того, недоліком є те, що поле запису є полем розсіювання кільцевої голівки, яке недостатньо велике для запису носія запису з високою коерцитивною силою та високою термічною стабільністю. Ці недоліки перешкоджають використанню поздовжнього запису як методу запису з високою щільністю.

1.2.4 Перпендикулярний запис

В перпендикулярній системі запису даних орієнтація намагнічування доменів робочого шару перпендикулярна поверхні диску. Це розташування було вперше запропоноване Ш. Івасакі в 1976 році. Під робочим шаром диска або стрічки знаходиться шар магнітно-м'якого заліза (рисунок 1.6).

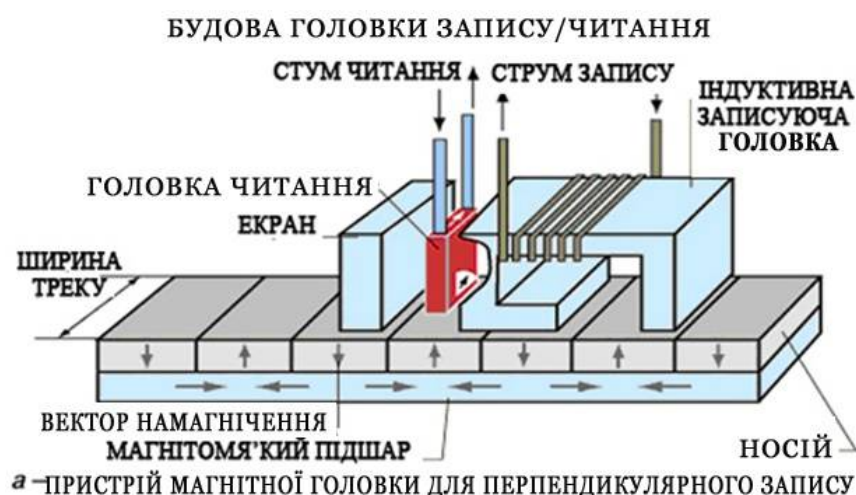


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення перпендикулярного запису[10]

Магнітна голівка, так само як і в поздовжньому записі, розташована з одного боку носія, але має конструкцію, відмінну від голівки для поздовжнього запису. Полюси такої голівки мають різні поперечні перерізи – "гострий" і "тупий". Густі силові лінії, які виходять з "гострого" полюсу, записують дані на диск і, розтікаючись по магнітно-м'якій основі, в розрідженому стані повертаються до "тупого" полюсу. При цьому вони розріджені настільки, що вже не можуть перемагнітити носій. Таким чином, якщо в поздовжньому

запису магнітне поле запису генерується між полюсами голівки, то в перпендикулярному – між зрізом полюсу голівки і магнітно-м'якою основою диску. Тому домени записуючого шару орієнтуються вертикально, а основи – горизонтально. Це забезпечує додаткову стабільність доменів відносно один одного.

Під час перпендикулярного запису використовується набагато складніший магнітний робочий шар. Під тонким захисним вуглецевим шаром знаходиться записуючий шар із окисленого сплаву кобальту, платини і хрому. Основа складається з двох антиферомагнітних шарів, які дозволяють зняти внутрішнє напруження магнітного поля.

Для зчитування інформації в системах з перпендикулярним магнітним записом потрібні принципово нові голівки читання, які дозволяють значно покращити співвідношення сигнал/шум і потужність самого сигналу. Тому деякі компанії вже починають використовувати нове покоління головок на тунельному магніторезистивному ефекті (TMR Heads).

Система перпендикулярного магнітного запису дозволяє досягти щільність запису даних до 500 Гбіт/дюйм² (теоретична межа). [10]

1.2.5 Проблеми з майбутнім магнітним записом надвисокої щільності

Як вже було зазначено, збільшення щільності запису сповільнилося протягом останніх десяти років. Перед тим як продовжувати збільшення щільності запису, необхідно вирішити низку невідворотних проблем і знайти для них рішення. З точки зору носіїв інформації існують три фундаментальні вимоги: співвідношення сигнал/шум (SNR), термічна стабільність і можливість запису. Високий SNR гарантує, що зчитувач зможе виявити інформацію. Висока термічна стабільність забезпечує стабільний стан долота з малим

розміром зерна. Записуваний біт означає, що його поле перемикання менше поля запису. Однак виконання всіх трьох цих вимог одночасно становить серйозну проблему.

1.3 Магнітні матеріали для носіїв запису високої щільності

1.3.1 Сучасні гексагональні Со-сплави

У таблиці 1.1 наведено загальні матеріали з високою константою анізотропії (K_U), які наразі використовуються або можуть бути потенційно використані в носіях інформації.

Таблиця 1.1 – Магнітні матеріали з високим K_U

Тип	Матеріал	Магніто кристалічна анізотропія, K_U , 10^7 erg/cm^3	Намагніченість насичення, M_S , emu/cm^3	Анізотропне поле, H_k , kOe	Температура Кюрі, T_c , K	Мінімальний стабільний розмір частинки, D_p , nm
Со сплави	CoCrPt	0,20	298	13,7	--	10,4
	Co	0,45	1400	6,4	1401	8,0
	Co ₃ Pt	2,0	1100	35	--	4,8
L1 ₀ сплави	FePd	1,8	1100	33	760	5,0
	FePt	6,6–10	1140	116	750	3,3–2,8
	CoPt	4,9	800	123	840	3,6
	MnAl	1,7	560	69	650	5,1
Рідкоземельні перехідні метали	Fe ₁₄ Nd ₂ B	4,6	1270	73	585	3,7
	SmCo ₅	11–20	910	240–400	1000	2,7–2,2

Сплави на основі кобальту з гексагональною щільноупакованою ґраткою (ГЩУ) широко використовуються в комерційних жорстких дисках як матеріали для носіїв інформації. Сплави на основі Со мають одновісну анізотропію, і вісь легкості орієнтована вздовж напрямку с. Незважаючи на те, що у Со значення

K_U вище, ніж у CoCrPt , саме CoCrPt використовується в носіях інформації, і це має дві причини:

1) у магнітних носіях інформації магнітні зерна повинні бути ізольовані немагнітними матеріалами для розділення сусідніх зерен обмінного роз'єднання. Домішування атомів Cr у сплав на основі Co може відокремити зерна Co . Деякі атоми Cr дифундують в зерна Co , але більше Cr утворює границю зерен і роз'єднує зерна Co ;

2) магнітокристалічна анізотропія може бути покращена за допомогою додавання Pt . Зазвичай висока коерцитивна сила і термічна стабільність потрібні в носіях інформації.

Оскільки у сплаві на основі Co немає високої анізотропії, його мінімальний стабільний розмір частинки становить близько 10 нм, що набагато більше за потрібний розмір для майбутнього запису з високою щільністю. Тому матеріали з високою магнітокристалічною анізотропією, такі як SmCo_5 та FePt , стають більш популярними, і, нарешті, FePt вважається найкращим кандидатом через його бажану магнітну стабільність і хімічну стабільність.

1.3.2 Сплави FePt

Платина – належить до десятої групи періодичної системи елементів. Має шість природних ізотопів. Кристалічна решітка простої речовини кубічна гранецентрована з параметром 3,850 Å [11].

Залізо – елемент восьмої групи четвертого періоду періодичної системи хімічних елементів, феромагнетик, період ґратки 2,870 Å. Залізо має три модифікації:

- до 768 °C парамагнітна $\alpha\text{-Fe}$ з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою (ОЦК);
- при 912 °C відбувається поліморфне перетворення і залізо переходить з ОЦК в гранецентровану кубічну ґратку (ГЦК);
- при 1394 °C утворюється $\delta\text{-Fe}$ з ОЦК [12].

Сполука FePt, що має гранецентровану кубічну ґратку, відноситься до структурного типу CuAu і має параметри ґратки: $a = 2,719 \text{ \AA}$, $c = 3,722 \text{ \AA}$, $c/a = 1,369$. Впорядковані фази FePt і Fe₃Pt мають структуру гранецентрованої тетрагональної та гранецентрованої кубічної ґратки (L1₀, L1₂) відповідно [13]. Діаграма стану FePt (рисунок 1.7) належить до типу діаграм з відкритою областю гамма-фази. На діаграмі можна виділити три зони впорядкованих розчинів: Fe₃Pt (γ_1), FePt (γ_2), FePt₃ (γ_3). За даними магнітних, дилатометричних і рентгенівських досліджень встановлено границю фази Fe₃Pt. Область гомогенності Fe₃Pt (19–33) ат.% Pt свідчить про існування стабільної області в інтервалі температур 600 °С – 740 °С. Припускається, що між (α -Fe) і Fe₃Pt відбувається евтектоїдна реакція при температурі $\sim 550 \text{ °С}$ і вмісті 15 ат.% Pt [14].

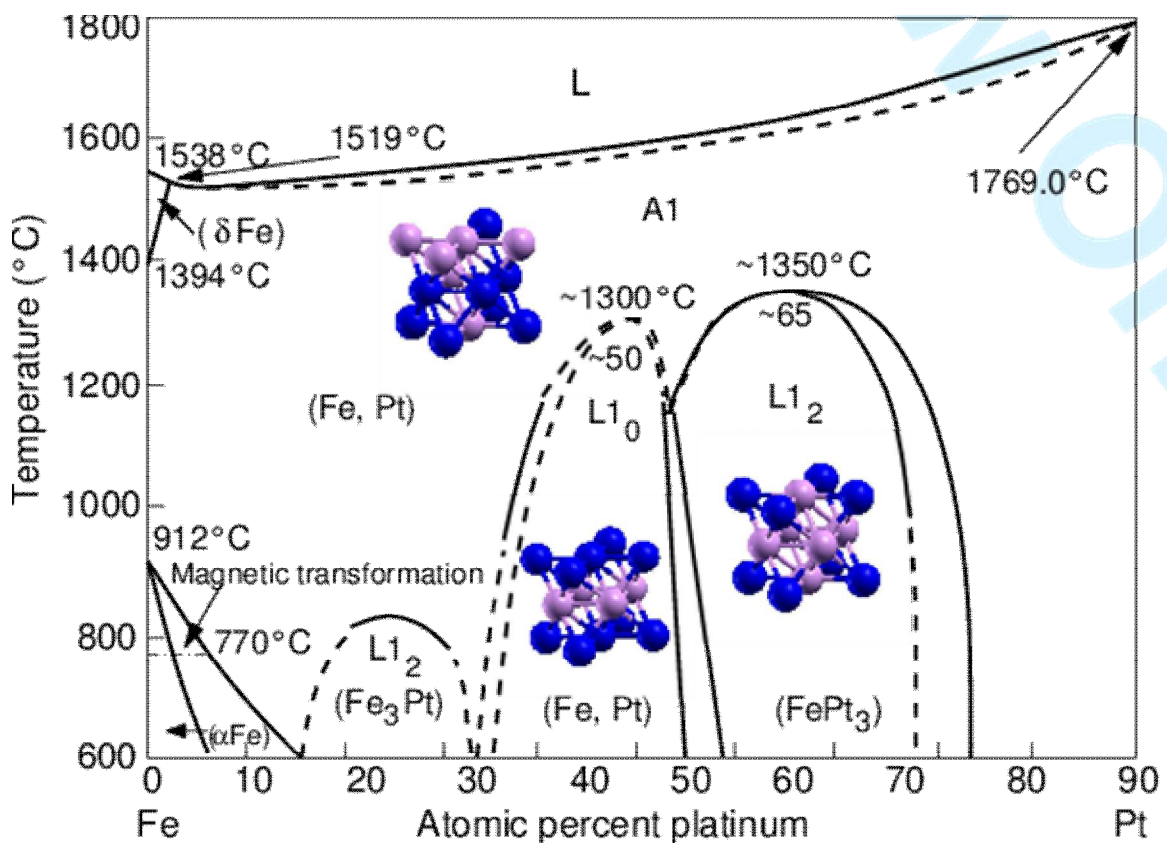


Рисунок 1.7 – Рівноважна фазова діаграма та кристалографічні структури FePt зі структурою L1₀ близько 50 ат.% Fe [15]

Сполука Fe₃Pt є феромагнетиком з гранецентрованою кубічною ґраткою і відноситься до структурного типу Cu₃Au з параметрами ґратки: $a = 2,719 \text{ \AA}$, $c =$

3,722 Å, $c/a = 1,369$. Впорядковані фази FePt і Fe₃Pt мають гексагональну і кубічну структури відповідно (L1₀, L1₂) [16]. Температура Кюрі для впорядкованої фази FePt досягає максимуму приблизно при 50 ат.% Pt і 480 °C.

Перетворення (γ -Fe, Pt) $\leftrightarrow$ (FePt₃) відбувається при температурі 1350 °C. У дослідженні [14] підтверджено, що діаграма стану FePt в області проміжних фаз FePt і FePt₃ має евтектоїдний характер.

1.3.3 Використання плівок FePt для магнітного запису

Високоанізотропні тонкі металеві плівки, що базуються на впорядкованій фазі L1₀ FePt з ГЦТ ґраткою, є перспективним матеріалом для надщільного запису інформації на магнітних накопичувачах. Дана фаза відзначається енергією магнітокристалічної анізотропії на рівні 7×10^6 Дж/м³, що в 1 мільйон разів перевищує анізотропію чистого заліза [17]. Крім того, цей матеріал має високі значення намагніченості насичення, температури Кюрі, коерцитивної сили і корозійної стійкості.

Як показано в таблиці 1.1, фаза L1₀ FePt має другий за величиною магнітокристалічну анізотропію серед всіх звичайних магнітних матеріалів. Але, на відміну від SmCo₅, вона не лише магнітно стабільна, але й хімічно стійка. Магнітна частинка FePt у впорядкованій фазі L1₀ залишається термічно стійкою, навіть якщо її розмір становить всього 3 нм. Тому вона розглядалася як найбільш перспективний кандидат для майбутніх носіїв інформації з екстримально високою щільністю магнітного запису, особливо для носіїв інформації HAMR.

На рисунку 1.8 продемонстровано структуру решітки цих двох фаз. Для перетворення фази A1 в фазу L1₀ ми можемо або відпалювати неупорядкований FePt при високій температурі, або збільшувати утворення тонких плівок FePt під час їх відкладання. Неупорядкована фаза називається фазою A1, що характеризується гранецентрованою кубічною структурою ґратки з постійною ґратки "a" приблизно 0,39 нм. У фазі A1 атоми Fe і Pt демонструють випадкове

розташування, що призводить до низької анізотропії, що робить її непридатною для зберігання даних. У $L1_0$ -впорядкованій фазі FePt розташування атомів Fe і Pt відбувається шар за шаром.

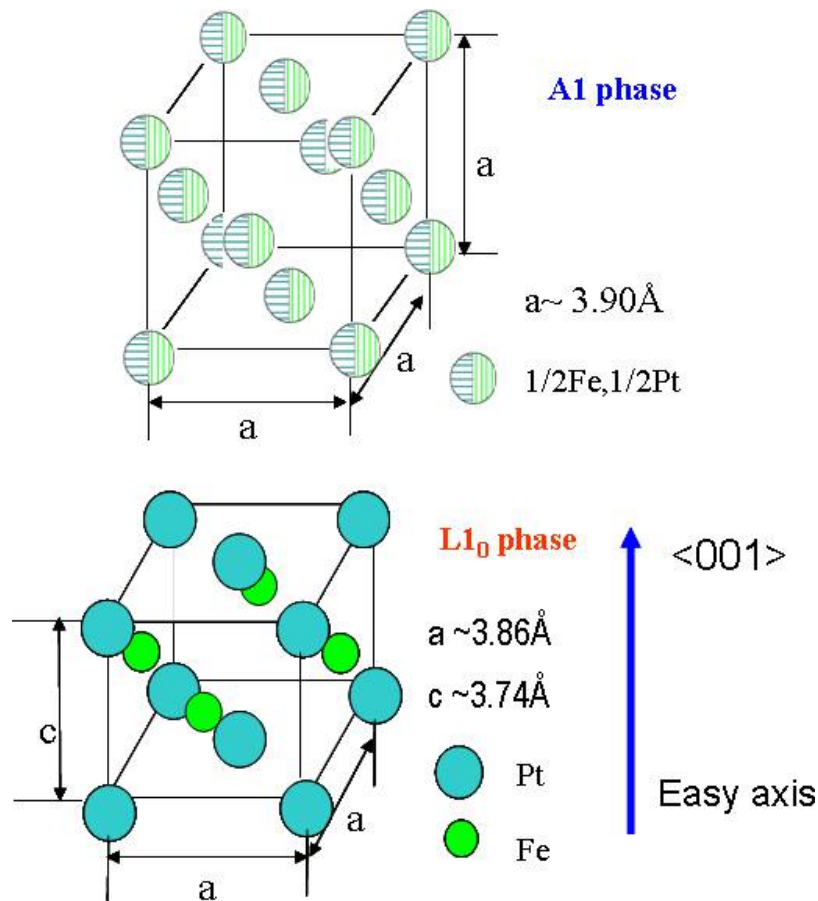


Рисунок 1.8 – Структура ґратки (вгорі) фази A1 FePt та (внизу) фази $L1_0$ FePt [18]

Вісь c елементарної комірки коротша за осі a і b , що призводить до одновісної магнітокристалічної анізотропії через асиметрію елементарної комірки. Вісь легкого намагнічування вирівнюється вздовж осі c . FePt фази $L1_0$ демонструє значну магнітокристалічну анізотропію, причому експериментальна коерцитивна сила досягає 105 кЕ в тонких плівках FePt. Це було досягнуто шляхом нанесення FePt на монокристалічну підкладку MgO при 780°C [19].

Розрахунки свідчать, що носій, на основі FePt, може залишатися термічно стабільним, навіть якщо розміри його зерен менше 3 нм. При досягненні таких малих розмірів зерен і можливості запису інформації на такий матеріал,

можливим стає досягнення щільності запису на рівні приблизно 1 Тб/дюйм². Тому увага науковців приділяється дослідженням магнітних властивостей матеріалів на основі FePt. Проте після осадження на підкладки за кімнатної температури, плівковий матеріал FePt набуває в своїй структурі фазу A1 – невпорядковану фазу з гранецентрованою кубічною ґраткою (рисунок 1.9). Фаза, яка виявляє високий рівень енергії магнітокристалічної анізотропії, утворюється лише після високотемпературної термічної обробки. Іншими словами, термічна обробка є необхідною для створення пам'яті на основі плівкового матеріалу FePt. Зате високотемпературний відпал, на жаль, спричиняє зростання розмірів зерен та шорсткості поверхні плівкових композицій і не може бути використаний в промисловості.

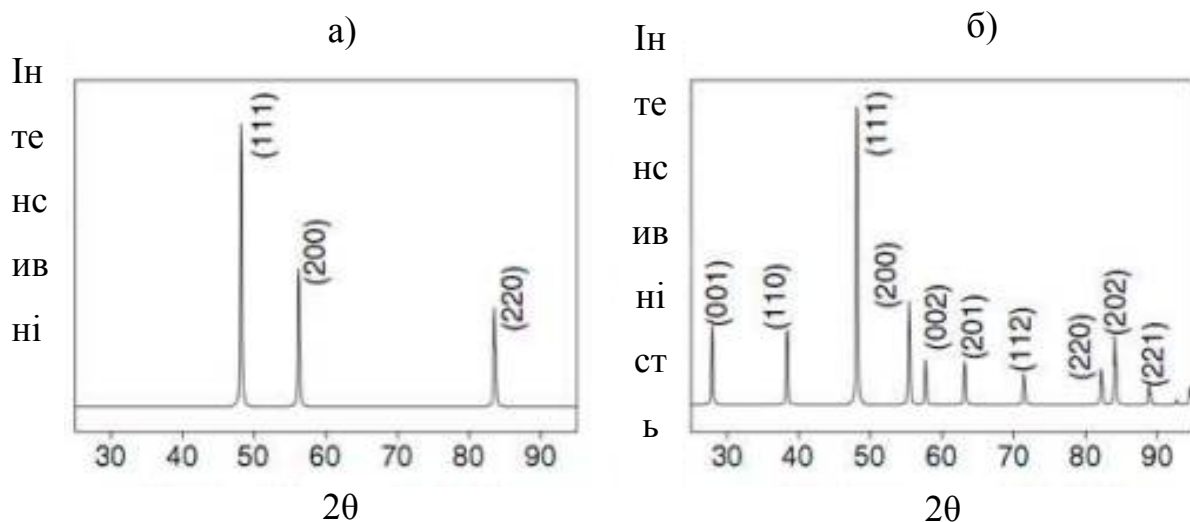


Рисунок 1.9 – Дифрактограми для невпорядкованої фази A1 та впорядкованої фази L1₀ сплаву FePt [20]

Для практичного використання магнітних носіїв на основі FePt, крім зниження температури фазового перетворення A1 FePt → L1₀ FePt, необхідно вирішити завдання у сфері матеріалознавства, такі як контроль розміру зерен і орієнтації їх осей легкого намагнічування, формування вираженої перпендикулярної анізотропії в плівковому матеріалі, і підвищення коерцитивної сили. Також, оскільки площина (111) фази L1₀ FePt має найменшу поверхневу енергію, зерна швидше ростуть саме у цій площині, що може

впливати на напрямок досліджень і спрямовує їх на вирішення цих конкретних завдань.

1.4 Взаємодія Pt та Fe із воднем в масивному стані

З рисунку 1.10 видно, що водень не утворює хімічних сполук із залізом, зокрема не виникає утворення гідридів. Його розчинення знижує температуру плавлення заліза та розширює діапазон стійкості γ -Fe, спричиняючи виникнення газоевтектичної, газоперитектичної та газоевтектоїдної рівноваг.

У системі положення ліній фазових рівноваг практично не змінюється за винятком діапазону тиску від 20 МПа до 30 МПа. Подальше збільшення тиску практично не впливає на положення ліній фазових перетворень, що пов'язано з від'ємним відхиленням від параболічного закону розчинності при високих температурах та тиску [21].

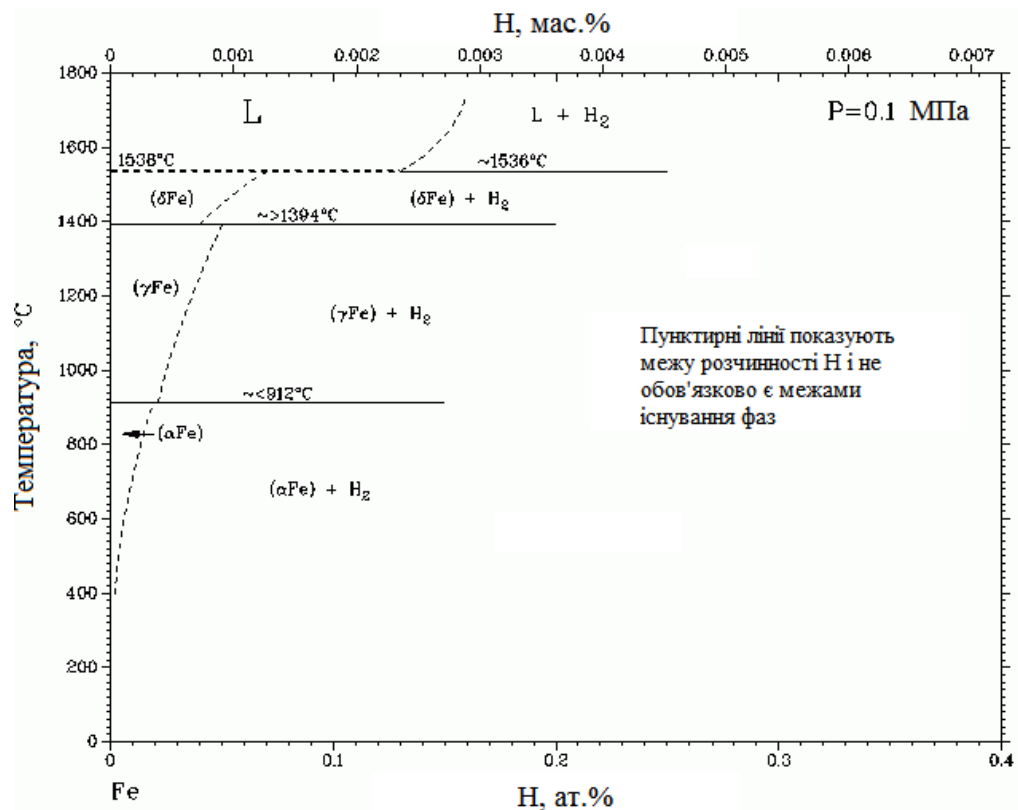


Рисунок 1.10 – Діаграма фазового стану системи Fe-H при тиску 0,1 МПа [21]

В роботі [22] було проведено дослідження на вплив водню на ріст тонких плівок FePt. Плівки FePt були виготовлені методом лазерного напилення на MgO (100) в атмосфері формування газу із 5 % водню у суміші з аргоном. З комбінації тиску та температури 0,1 мбар та 800 °C можна отримати гладкі, неперервні та добре впорядковані плівки фази $L1_0$. Анізотропне поле близьке до значення для об'єму, тоді як коерцитивна сила порівняно низька – 0,15 Тл. Це в контрасті з плівками, що відкладаються в вакуумі, які мають зернисту структуру та велику коерцитивну силу. Запропоновано, що цю різницю в режимі росту викликають центри зародкоутворення для росту острівців, введені воднем на поверхню MgO. Цим припущенням пояснюються залежність морфології поверхні від температури та тиску.

1.5 Висновки до розділу 1

У сучасний період використовується технологія перпендикулярного магнітного запису інформації. Однак для досягнення високої щільності магнітного запису необхідно переходити на метод термічно-активованого магнітного запису.

Проаналізувавши доступні літературні джерела встановлено, що матеріали, засновані на сплаві FePt, є перспективними для використання як магнітні носії інформації. Задачі для практичного використання цих матеріалів, можна вважати невирішеними у повній мірі навіть з урахуванням значного обсягу теоретичних та експериментальних досліджень.

Встановлено, що впорядкована фаза $L1_0$ FePt найкраща для використання як матеріал для магнітного запису інформації. Для отримання впорядкованої фази $L1_0$ необхідно провести відпал (600–1300) °C в області (33–50) ат.% Pt.

Визначено, що відпалі у водні порівняно з відпалом у вакуумі забезпечує більш виражену анізотропію магнітних властивостей та меншу поверхневу шорсткість, що є важливим фактором практичного застосування плівок на основі

FePt.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали дослідження

У роботі досліджено нанорозмірні плівки на основі сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ товщиною 5 нм, 10 нм, 20 нм. Відпал проводився у водневій атмосфері. В якості підкладки використовувався кремній з орієнтацією (001) та шаром SiO_2 100 нм (рисунок 2.1).

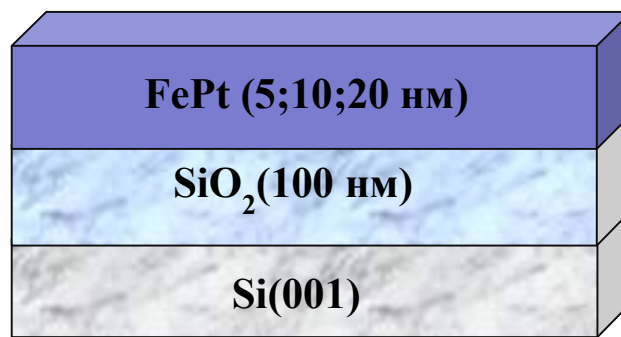


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення плівкової структури

2.2 Технологія виготовлення тонких плівок

Плівки на основі сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ отримано методом магнетронного осадження на підкладку з кремнію за кімнатної температури.

Магнетронне розпорошення – це процес фізичного розпорошення з парової фази (PVD), який належить до одного з процесів вакуумного осадження. Він широко використовується в промисловості через його численні переваги, такі як низька температура осадження, хороша якість плівки, хороша однорідність, висока швидкість осадження та можливість готувати однорідні та щільні тверді плівки великої площі.

Назва «магнетронне розпорошення» походить від використання магнітного поля для керування поведінкою заряджених іонних частинок під час осадження магнетронним розпорошенням. Процес потребує високовакуумної

камери для створення середовища низького тиску для розпорошення. Спочатку в камеру надходить газ, що містить плазму (зазвичай аргон). Між катодом і анодом подається висока від'ємна напруга, щоб ініціювати іонізацію інертного газу. Позитивні іони аргону з плазми стикаються з негативно зарядженою мішенню. Кожне зіткнення енергійних частинок призводить до того, що атоми з поверхні мішені (мішені) викидаються у вакуумне середовище та просуваються на поверхню підкладки. Сильні магнітні поля створюють високу густину плазми, утримуючи електрони біля поверхні мішені (мішені), збільшуючи осадження швидкість і запобігання пошкодженню підкладки від іонного бомбардування. Більшість матеріалів можна використовувати як мішені для процесів розпорошення, оскільки системи магнетронного розпорошення не вимагають плавлення або випаровування вихідного матеріалу. [23].

Магнетронне розпорошення краще за інші технології осадження тонких плівок, оскільки дозволяє створювати велику кількість плівок за дуже низьку вартість. Це також дуже підходить для матеріалів з високою температурою плавлення, які не можна випарувати, і це технологія, яка може утворювати дуже щільні плівки з хорошою адгезією.

Як показано на рисунку 2.2, магнітні поля генеруються бічними магнітами, потім проникають у мішень і, нарешті, повертаються до центрального магніту. Електрони будуть концентруватися біля поверхні мішені магнітними полями і продовжуватимуть обертатися в коловому русі. Плазма біля поверхні мішені значно підсилюється, оскільки збільшується ймовірність зіткнення та іонізації через більшу кількість електронів. При однаковій напрузі при магнетронному розпорошенні споживається на один-два порядки більше струму порівняно з простими розрядами. Іншими словами, порівняно з простим напиленням, конфігурація магнетронного розпорошення може мати вищу швидкість осадження та нижчу робочу напругу. Необхідний робочий тиск робочого газу також можна знизити, оскільки магнітні поля можуть підтримувати високу щільність електронів у плазмі.

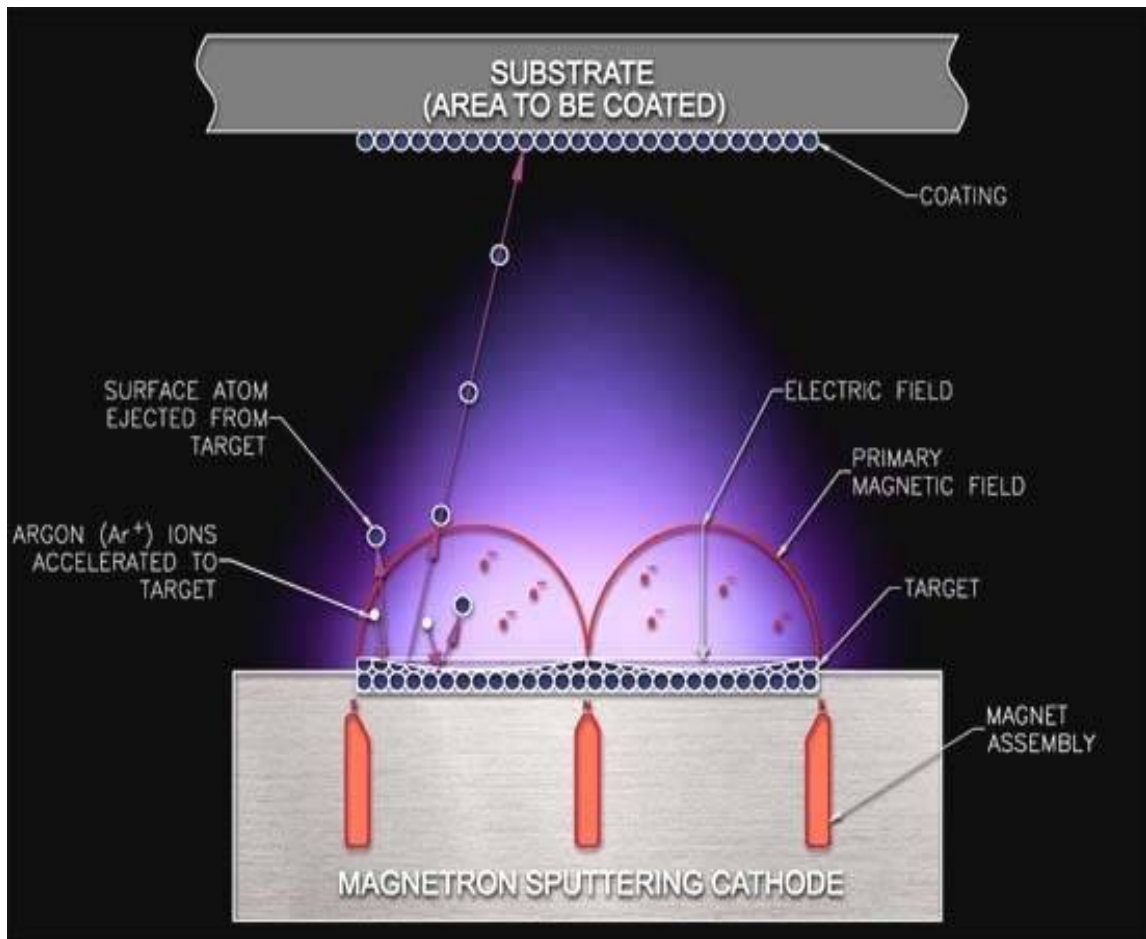


Рисунок 2.2 – Схема магнетронного розпорошення [18]

Під час осадження тонких плівок очікується використання багатьох видів матеріалів. DC-розпорошення добре працює з провідними матеріалами. Однак при роботі з непровідними матеріалами DC-розпорошення не працює. При розпорошенні непровідних матеріалів, наприклад SiO_2 , після прискорення позитивних іонів і їх бомбардування мішені, позитивні заряди накопичуються на поверхні мішені і не будуть нейтралізовані. У цьому випадку потрібно використовувати RF-розпорошення, яке є перемінним струмом із радіочастотою. На високій частоті струм може проходити через діелектричні матеріали, а також через заряди на поверхні мішені, але для того, щоб іони бомбардували мішень, потрібен негативний самостійний зсув цілі для направлення позитивних іонів на мішень.

Загальна теплова енергія, яка розсіюється на поверхні підкладки, отже і її температура, залежать не лише від конструкції та параметрів роботи системи

розпорошення, але також, в значній мірі, від матеріалу мішені. Основним джерелом нагрівання поверхні підкладки є енергія, що виникає при гальмуванні та конденсації осаджених атомів матеріалу мішені, що призводить до температури поверхні підкладки в межах $70\text{ }^{\circ}\text{C} - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дозволяє використовувати процес осадження плівок на підкладки з матеріалів з невеликою термостійкістю, таких як пластик, полімери, органічне скло, тощо. Звичайні значення загальної теплової енергії знаходяться в діапазоні $(10 - 70)\text{ eV/атом}$ [24].

Товщина плівкового матеріалу є ключовим параметром. Таким чином, для контролю товщини шарів застосовуються методи:

- контроль за допомогою кварцового резонатора;
- визначення на основі швидкості розпилення мішені;
- аналіз за допомогою профілометра.

Умови для створення магнітних плівок $\text{Ll}_0\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ різної товщини:

- метод – магнетронне розпорошення;
- тип підкладки – $\text{SiO}_2(100\text{ нм})/\text{Si}(001)$;
- температура підкладки – кімнатна температура;
- термічна обробка – відпал в атмосфері H_2 ;
- температурний інтервал – $(300 - 700)\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- швидкість нагріву – $1\text{ }^{\circ}\text{C/с}$;
- тривалість – 1 година;
- швидкість охолодження – $1\text{ }^{\circ}\text{C/с}$.

2.3 Методики дослідження

2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Головною метою рентгеноструктурного аналізу є визначення відповідності між атомною структурою вивченого зразка та просторовим розподілом рентгенівського випромінювання, яке розсіюється зразком. Крім

того, якісний фазовий аналіз використовується для визначення фаз, які присутні у зразку.

Рентгенографічні дослідження фазового складу та кристалічної структури зразків виконувався на пристрої Bruker D8 ADVANCE. Зйомка проводилася у випромінєні мідного аноду, Cu K α ($\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$), прискорювальна напруга – 40 кВ та анодний струм – 40 мА.

Дослідження тонких плівок має особливості, оскільки фазу, яка може мати великий вміст у плівці відсотковим співвідношенням, можна не помітити рентгенографічно через її малу товщину.

Важливою особливістю є те, що глибина проникнення рентгенівських променів перевищує товщину досліджуваного об'єкта. Це може виводити на рентгенограму рефлексії від підкладки, ускладнюючи ідентифікацію і може призводити до неоднозначності у визначенні фазового складу плівок.

Кожна фаза має свою кристалічну комірку, і визначення фазового складу полікристалічних речовин за їхніми міжплощинними відстанями є одним із завдань рентгенівського аналізу, яке вирішується порівняно легко.

Для того, щоб хвилі, розсіяні сімейством рівнобіжних площин кристала дали максимум інтенсивності необхідно виконання наступного співвідношення між міжплощинною відстанню d , кутом падіння рентгенівських хвиль на дану кристалографічну площину і довжиною хвилі рентгенівського випромінювання λ :

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

де d – міжплощинна відстань, властива даній фазі, $\text{\AA}$;

θ – брегівський кут;

λ – довжина хвилі випромінювання;

n – порядок відбиття, ($n=1$).

Ця рівність виражає основний закон дифракції рентгенівських променів у кристалах і називається умовою Вульфа-Брегга (рисунок 2.3).

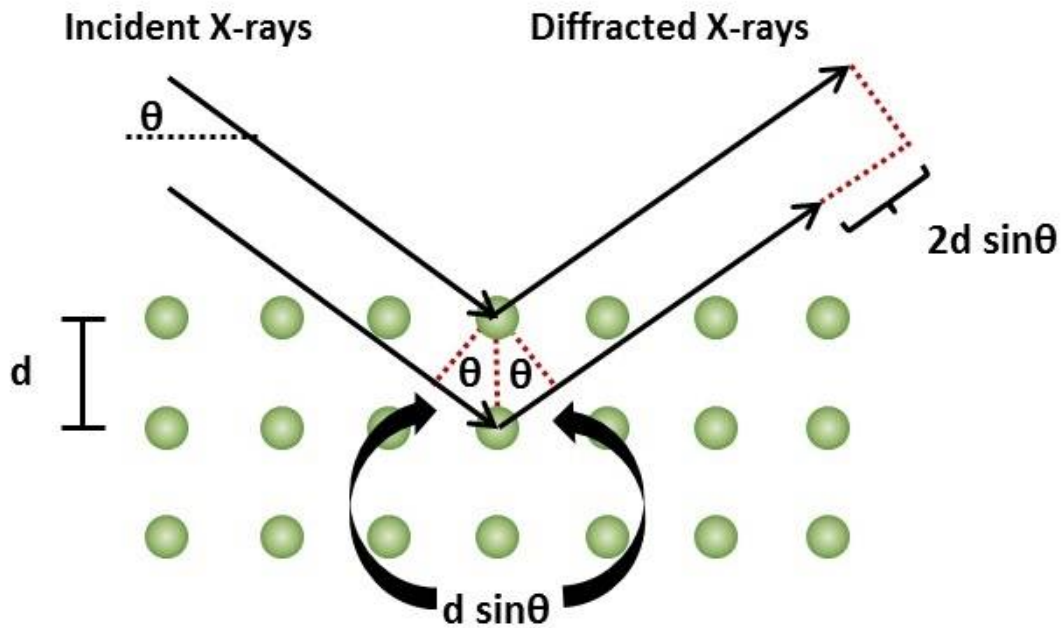


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення рівняння Вульфа-Брегга [25]

Умова має просту фізичну інтерпретацію: рентгенівські хвилі, розсіяні сусідніми атомними площинами кристала будуть при інтерференції підсилюватися в тому випадку, коли різниця ходу між ними дорівнює цілому числу довжин хвиль λ .

Задача виявлення фазового складу включає в себе визначення фаз, присутніх у структурі матеріалу. Фазою вважається однорідна область матеріалу, обмежена границями, за якими властивості матеріалу змінюються стрибкоподібно. Кожна кристалічна фаза характеризується унікальним (лише для неї властивим) набором міжплощинних відстаней. Отже, завдання виявлення фазового складу полягає визначенні кутових положень дифракційних максимумів на дифрактограмі та обчисленні відповідних значень міжплощинних відстаней за допомогою рівняння (2.1), з порівнянням цих значень із відомими табличними. Результатами рентгеноструктурного фазового аналізу є таблична залежність інтенсивності рентгенівського випромінювання від кута 2θ . При побудові цієї залежності на дифрактограмі спостерігаються дифракційні максимуми (рисунок 2.4).

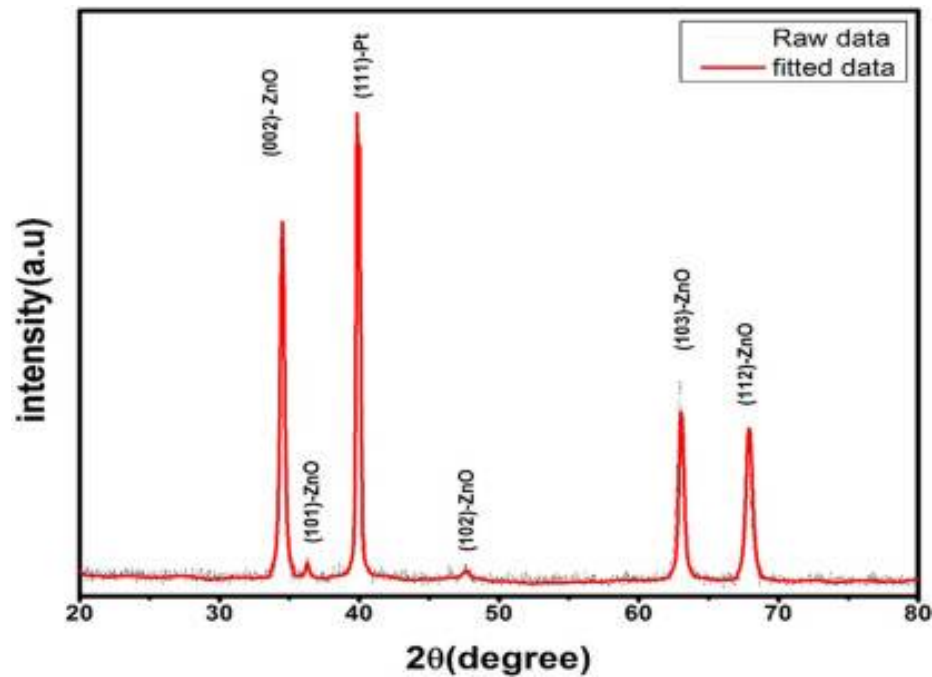


Рисунок 2.4 – Приклад дифрактограми з чітко вираженими максимумами [26]

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

Ступінь орієнтації осі легкого намагнічування c у напрямку $[001]$ перпендикулярному до поверхні плівки визначається по відношенню $I(001)/I(111)$.

Метод рентгеноструктурного фазового аналізу дозволяє не лише виявляти фазовий склад, але й оцінювати розмір зерен різних фаз у плівкових матеріалах. Зерно, в даному контексті, представляє собою певну ділянку полікристалічного матеріалу з конкретною орієнтацією кристалічної ґратки. Границі між зернами, що розділяють їх, мають різні орієнтації кристалічної решітки. Застосування методу рентгеноструктурного фазового аналізу дозволяє оцінити розмір областей когерентного розсіювання (ОКР), який часто асоціюють з розміром зерен у нанорозмірних матеріалах. Область когерентного розсіювання представляє собою характерну зону, в межах якої рентгенівське розсіювання відбувається когерентно (узгоджено). Розмір ОКР визначається за допомогою рівняння Дебая-Шеррера:

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos\theta}, \quad (2.2)$$

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 – це метод дослідження структури кристалічних речовин, заснований на дифракційному розсіюванні прискореними електричним полем електронів. Використовується для вивчення атомної структури кристалів, аморфних тіл і рідин, молекул газів і парів. Існує кілька варіантів методу, але основним є електронографія на просвіт, де використовують дифракцію електронів високих енергій (50–300) кеВ, що відповідає довжині хвилі близько ($5\text{--}10^{-3}$) нм. Електронографію проводять у спеціальних пристроях – електронографах, де утримується вакуум ($10^{-5}\text{--}10^{-6}$) Па, час експозиції приблизно 1 секунда, або у трансмісійних електронних мікроскопах. Зразки для досліджень готують у вигляді тонких плівок товщиною (10–50) нм, осаджуючи кристалічну речовину з розчинів або суспензій, або отримуючи плівки вакуумним розпорошення. Зразки представляють собою мозаїчний монокристал, текстуру або полікристал.

Під час проходження через речовину електрони, обладнані хвильовими властивостями, взаємодіють з атомами, у результаті чого утворюються дифраговані пучки, інтенсивність та розташування яких пов'язані з атомною структурою речовини та іншими структурними параметрами. Розсіювання електронів визначається електростатичним потенціалом атомів, максимумами якого відповідають положенням атомних ядер.

Сильна взаємодія електронів з речовиною обмежує товщину просвічуваних зразків десятками долей мікрметра. Тому методами

електронографії вивчають атомну структуру дрібнокристалічних речовин, структуру поверхонь твердих тіл, наприклад, при вивченні явищ корозії металів, адсорбції та каталізу. Дифракційна картина, електронограма, виникає внаслідок проходження початкового монохроматичного потоку електронів через зразок і представляє собою сукупність упорядковано розташованих дифракційних плям – рефлексів (рисунок 2.5), які визначаються розташуванням атомів у досліджуваному об'єкті [27].

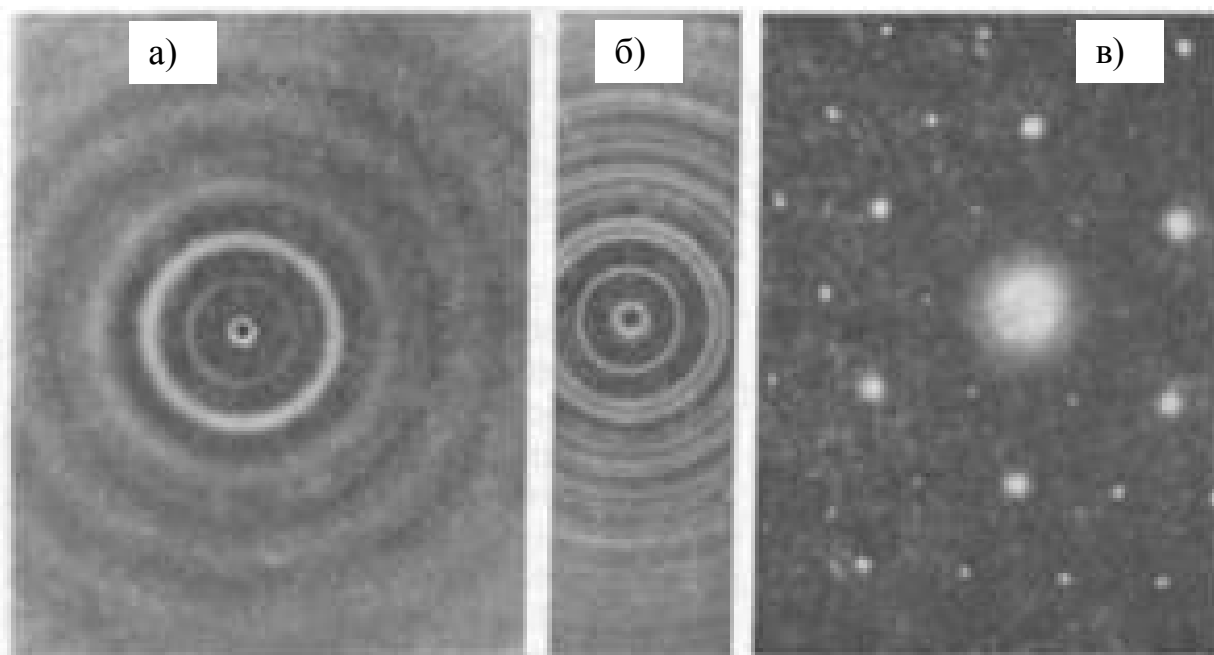


Рисунок 2.5 – Електронограми тонких плівок аморфного (а) та полікристалічного (б) германію і монокристалічного срібла (в) [28]

На електронограмах можна спостерігати рівномірно затемнені кола, а у випадку фотографування на рухомій фотопластині можна помітити паралельні лінії. Якщо електронограма відображає потовщені віддзеркалені дуги, то це свідчить про переважну орієнтацію зерен, або іншими словами – текстуру. Такі електронограми виникають при пружному одноразовому розсіянні.

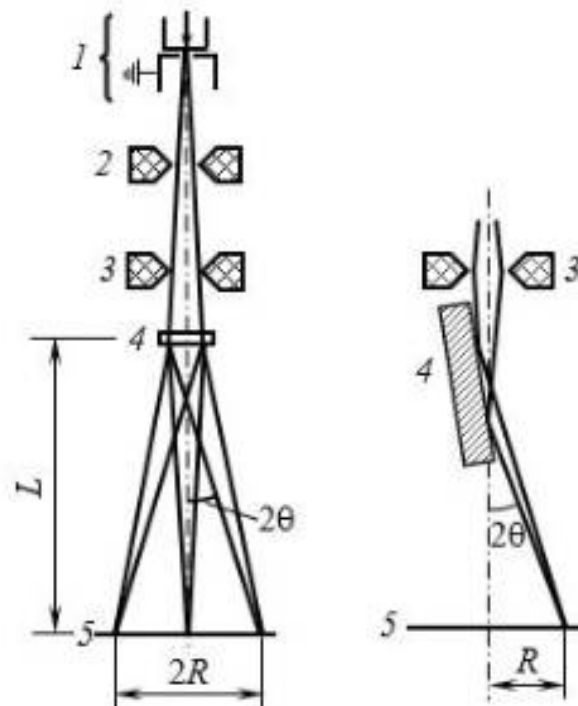
Для визначення фазового складу та фазових перетворень проводиться аналіз інтенсивності та розташування інтерференційних рефлексів, що формуються після дифракції електронів на кристалічній ґратці досліджуваного зразка. Розрахунок міжплощинних відстаней фаз в кристалічній структурі виконується за відношенням між сталою приладу та діаметром характерного інтерференційного рефлексу. Стала приладу визначається відстанню між

розсіюючим зразком та фотопластиною, а також довжиною хвилі де Бройля електрона. Після розрахунків міжплощинних відстаней з використанням ASTM таблиць можна отримати інформацію про фазовий склад досліджуваного зразка та параметри його кристалічної ґратки [29].

Для отримання електроннограм використовують дві геометрії зйомки (рисунок 2.6):

- при проходженні електронного пучка через тонкий (близько 0,1 мкм) зразок (зйомка "на просвіт")
- при "зсуванні" електронного пучка під кутом до 3° вздовж плоскої поверхні масивного зразка (зйомка "на відбиття")

На рисунку 2.6 також вказані основні елементи електроннографу: 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 електроннограм виконують на фотоплівку або на напівпровідникову матрицю із зарядовим зв'язком (ПЗС-матрицю).



а – схема формування дифракційної картини в режимі "на просвіт", б – схема формування дифракційної картини в режимі "на відбиття"

Рисунок 2.6 – Схема формування дифракційної картини в електроннографі в двох режимах [30]

2.3.3 Метод феромагнітного резонансу

Феромагнітний резонанс (ФМР) – широко використовуваний метод для дослідження феромагнітних зразків. Магнітні моменти у зразку збуджуються невеликим змінним магнітним полем з частотою в мікрохвильовому діапазоні, щоб здійснювати обертання навколо своєї рівноважної позиції.

За допомогою феромагнітного резонансу можна досліджувати положення рівноваги намагніченості, магнітні анізотропії або динамічні властивості, такі як гіромагнітне відношення або затухання прецесії намагніченості. Метод феромагнітного резонансу застосовний до широкого діапазону магнітних зразків від макроскопічних зразків до ультратонких шарів з товщиною в діапазоні одноатомних шарів або навіть до наноструктурованих магнітних пристроїв [31].

ФМР виникає внаслідок прецесійного руху (зазвичай досить великої) намагніченості феромагнітного матеріалу в екстернальному магнітному полі. Магнітне поле створює обертальний момент на намагніченості зразка, що спричинює прецесію магнітних моментів у зразку. Частота прецесії намагніченості залежить від орієнтації матеріалу, сили магнітного поля, а також макроскопічної намагніченості зразка; ефективна частота прецесії феромагніту значно менше за частоту прецесії, спостереженої для вільних електронів у ЕПР. Крім того, ширини піків поглинання можуть бути суттєво впливати як ефектами дипольного звуження, так і обмінного розширення (квантовими). Більше того, не всі піки поглинання, спостережені в ФМР, викликані прецесією магнітних моментів електронів у феромагніті.

Основна установка для експерименту ФМР – це резонансна мікрохвильова камера з електромагнітом. Резонансна камера фіксується на частоті в діапазоні надвисоких частот. Детектор розміщується на кінці камери для виявлення мікрохвиль. Зразок феромагнітного матеріалу розташовується між полюсами електромагніта, і магнітне поле змінюється, поки виявляється резонансна інтенсивність поглиблення мікрохвиль. Коли частота прецесії

намагніченості і частота резонансної камери співпадають, поглиблення різко зростає, що вказує на зменшення інтенсивності на детекторі. Спрощена схема феромагнітного резонансу показана на рисунку 2.7.

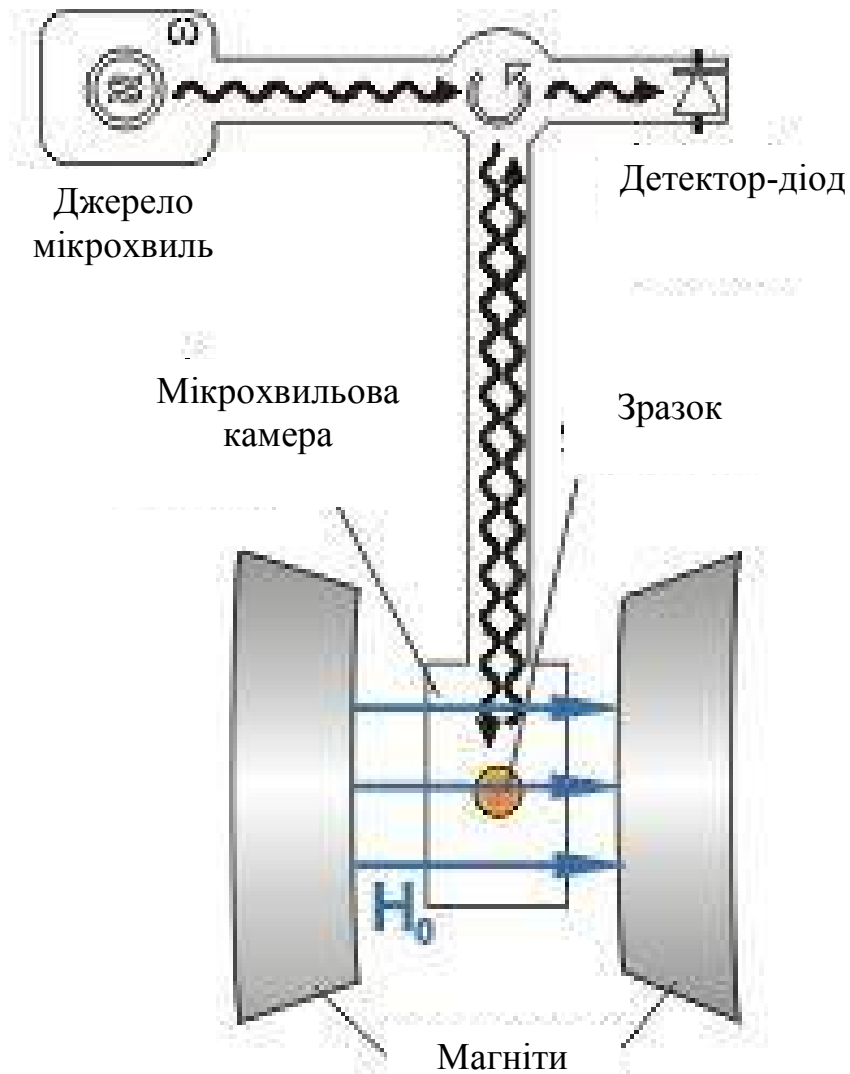


Рисунок 2.7 – Спрощена схема феромагнітного резонансу [32]

Крім того, резонансне поглиблення мікрохвиль енергії призводить до локального нагріву феромагнетика. У зразках з локальними магнітними параметрами, що змінюються на нанометровому рівні, цей ефект використовується для дослідження просторово залежних спектроскопічних досліджень.

Резонансна частота плівки з паралельно прикладеним зовнішнім полем B визначається формулою Кіттеля:

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{B(B + \mu_0 M)}, \quad (2.3)$$

де M — намагніченість феромагнетика,

γ — гіромагнітне відношення.

2.3.4 Раманівська спектроскопія комбінаційного розсіювання

Спектроскопія Рамана ґрунтується на непружному розсіюванні фотонів, відомому як розсіювання Рамана. Використовується джерело монохроматичного світла, зазвичай від лазера в видимому, близькому інфрачервоному або близькому ультрафіолетовому діапазоні, хоча можна використовувати також рентгенівські промені. Світло лазера взаємодіє з молекулярними вібраціями, фононами чи іншими збудженнями в системі, що призводить до зміни енергії фотонів лазера вгору чи вниз. Зміна енергії надає інформацію про вібраційні режими в системі. Інфрачервона спектроскопія, як правило, дає аналогічну, але і додаткову інформацію.

Зазвичай зразок освітлюється лазерним променем. Електромагнітне випромінювання з освітленого місця збирається лінзою і пропускається через монохроматор. Розсіяне пружне випромінювання при довжині хвилі, яка відповідає довжині хвилі лазера (Релеївське розсіювання), відфільтровується або режекторним фільтром, або крайовим фільтром, або смуговим фільтром, тоді як решта зібраного світла потрапляє в детектор.

Спонтанне розсіювання Рамана зазвичай є дуже слабким; таким чином, протягом багатьох років основною складністю в отриманні спектрів Рамана було відокремлення слабого непружного розсіяного світла від інтенсивного світла лазера, що розсіюється (називається "відхиленням лазера"). Історично для високого ступеня відхилення лазера використовувалися голографічні решітки та кілька ступенів розсіювання для досягнення високого ступеня відхилення лазера. У минулому використовувалися фотопомножувачі як

детектори для систем з дисперсійним комбінаційним розсіюванням, що призводило до тривалого часу збору даних. Однак у сучасних приладах майже повсюдно використовуються режекторні або крайові фільтри для придушення лазерного випромінювання. Зараз дисперсійні одноступінчасті спектрографи (аксіально-пропускаючі або монохроматори Черні-Тернера) у парі з детекторами ПЗЗ найбільш поширені, хоча спектрометри з перетворенням Фур'є також використовуються з інфрачервоними лазерами. Роздільна здатність діапазону залежить від ширини лінії використовуваного лазерного джерела. Зазвичай більш короткохвильові лазери дають сильніше комбінаційне розсіювання через частотну залежність ν^4 поперечних перерізів комбінаційного розсіювання, але можуть виникнути проблеми з деградацією зразка або флуоресценцією. Безперервні лазери превалюють у нормальній раманівській спектроскопії, але можуть використовуватися й імпульсні лазери. Вони часто мають ширшу смугу пропускання, ніж у безперервному режимі, але дуже корисні для інших форм раманівської спектроскопії, як-от нестационарна, тимчасова і резонансна раманівська спектроскопія.

Раманівське розсіяне світло зазвичай збирається і розсіюється спектрографом, або використовується спільно з інтерферометром для детектування методами перетворення Фур'є. У багатьох випадках наявні у продажу ІЧ Фур'є-спектрометри можна модифікувати для застосування комбінаційного розсіювання Фур'є.

Найчастіше сучасні раманівські спектрометри використовують матричні детектори, такі як ПЗЗ-матриці. Існують різні типи ПЗЗ-матриць, які оптимізовані для різних діапазонів довжин хвиль. ПЗЗ-матриці з посиленням діапазоном використовуються для дуже слабких сигналів та імпульсних лазерів. Спектральний діапазон залежить від розміру ПЗЗ і фокусної відстані спектрографа, що використовується.

Схема установки для дисперсійної раманівської спектроскопії показана на рисунку 2.8.

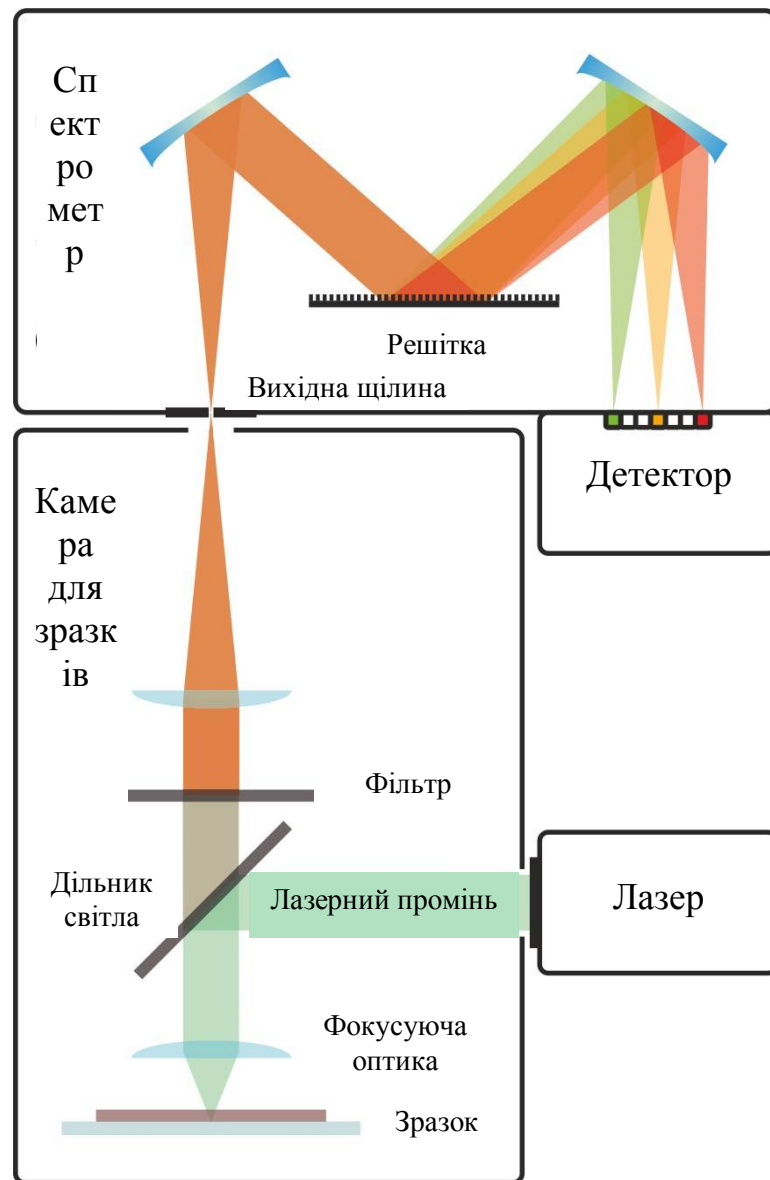


Рисунок 2.8 – Схема установки для дисперсійної раманівської спектроскопії [33]

Фур'є-раманівські спектрометри майже завжди використовуються з лазерами ближнього інфрачервоного діапазону, і в залежності від довжини хвилі збудження відповідними детекторами. Зазвичай використовуються детектори з урахуванням германію чи індію-галію (InGaAs) [34].

Щоб відокремити раманівське розсіяне світло від релеївського сигналу та відбитого лазерного сигналу, та отримати високоякісні раманівські спектри, використовуються режекторні або фільтри низьких частот. До появи голографічних фільтрів було прийнято використовувати монохроматор з

потрійною дифракційною решіткою в режимі віднімання виділення корисного сигналу. Цей метод все ще можна використовувати для запису дуже малих раманівських зсувів, оскільки голографічні фільтри зазвичай відображають деякі з низькочастотних смуг на додаток до незміщеного лазерного світла. Тим не менш, фільтри на основі об'ємної голограми стають все більш поширеними, тому що дозволяють реєструвати зрушення лише на 5 см^{-1} [35].

В роботі використано

Динаміку структурних змін плівок FePt досліджували методом раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання на спектрометрі Renishaw InVia Raman Microscope з довжиною хвилі оптичного збудження 633 нм та аналізом частотного критерію розсіювання випромінювання.

2.4 Висновки до розділу 2

Матеріалами для дослідження в даній роботі обрано нанорозмірні тонкі плівки на основі сплаву $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$ товщиною 5 нм, 10 нм, 20 нм. Термічне оброблення проводилося у атмосфері водню. В якості підкладки використовувався кремній з орієнтацією (001) та шаром SiO_2 (100 нм).

Розглянуто великий спектр методик сучасного фізичного матеріалознавства для використання в роботі: метод магнетронного осадження плівок, рентгеноструктурний фазовий аналіз, електронографічний аналіз, феромагнітний резонанс та раманівська спектроскопія комбінаційного розсіювання. Обрані методики дозволяють отримати достовірну інформацію про зміни фазового складу, структуру та магнітні властивості плівок FePt [36].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У експериментальній частині представлено результати та аналіз досліджень з формування фазового складу і структури та їх вплив на магнітні властивості плівок FePt товщиною 5 нм, 10 нм, 20 нм, які були одержані методом магнетронного осадження. Відпал проводився в водневій атмосфері в інтервалі температур (300–700) °С.

3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз плівок FePt

3.1.1 Формування фазового складу у плівках FePt (5 нм) під час відпалу у водні

На рисунку 3.1 показано дифрактограму плівки FePt (5нм) після осадження. На ній спостерігається єдиний чіткий пік (111) що відповідає неупорядкованій фазі A1.

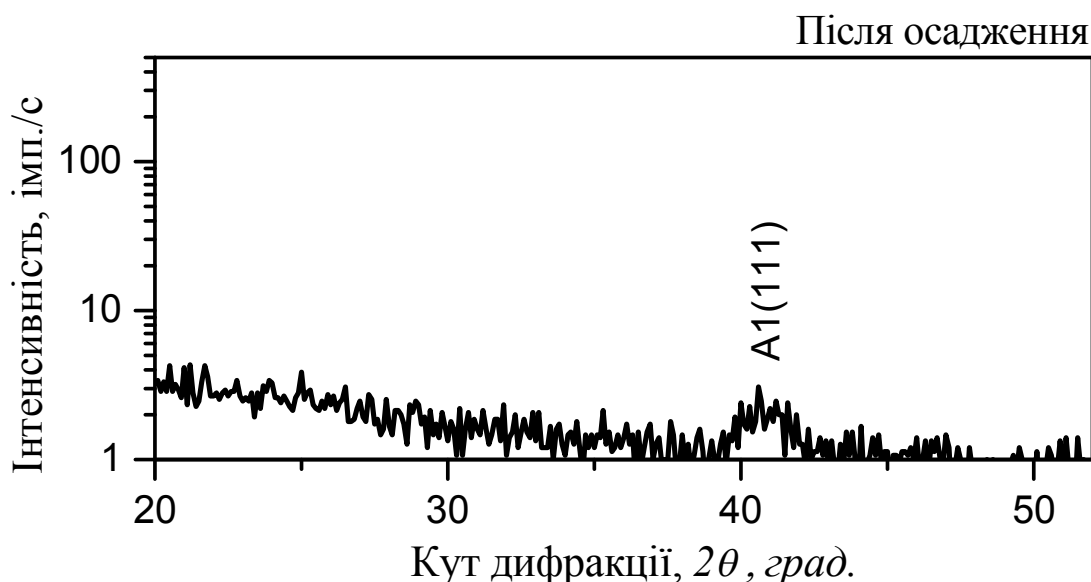


Рисунок 3.1 – Дифрактограма для плівки FePt (5нм) після осадження

Після відпалу за температури 300 °С, дифрактограма плівки FePt має вигляд зображений на рисунку 3.2. На ній бачимо цю ж саму неупорядковану фазу A1 з рефлексом (111) з дещо більшою інтенсивністю. Пік на куті дифракції 33,1° відповідає кремнієвій підкладці.

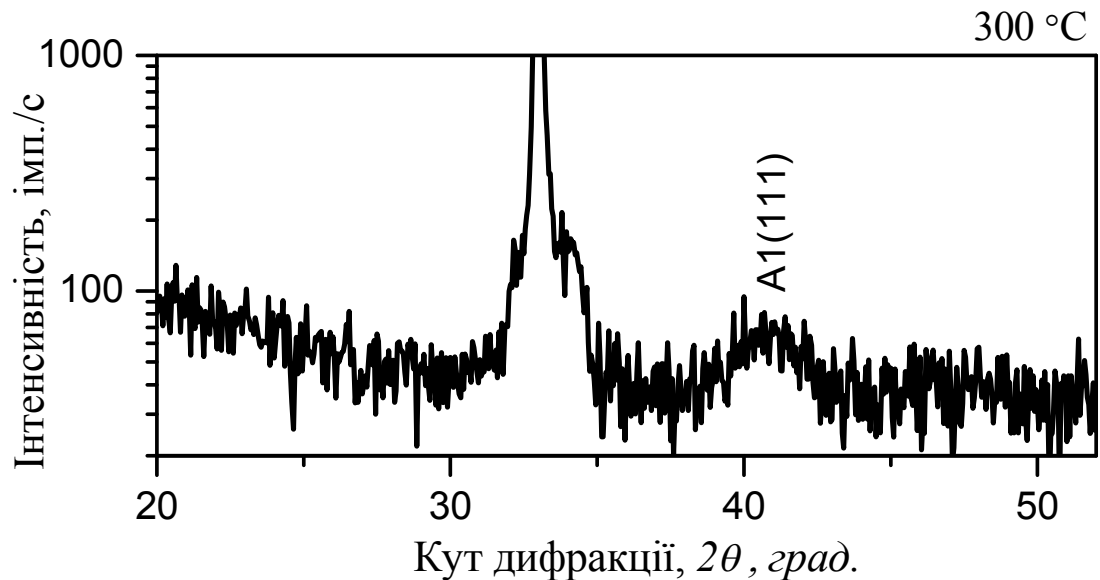


Рисунок 3.2 – Дифрактограма плівки FePt (5нм) після відпалу за температури 300 °С

Збільшивши температуру відпалу до 400 °С бачимо наступну дифрактограму (рисунок 3.3). На ній чітко видно піки, що відповідають неупорядкованій фазі A1: (111) та (200). Інтенсивність піку (111) фази A1 продовжує збільшуватися. Формування впорядкованої фази ще не почало відбуватись. На рисунку 3.4 показано дифрактограму плівки FePt (5 нм) після відпалу за температури 500 °С. На ній з'являється надструктурний рефлекс (001), що належить впорядкованій фазі L1₀, яка починає формуватися. Пік (111) зміщується в бік більших кутів (41,2°) та відповідає двом фазам A1+L1₀. Це також свідчить про початок впорядкування. Інтенсивність рефлексу (200) збільшується.

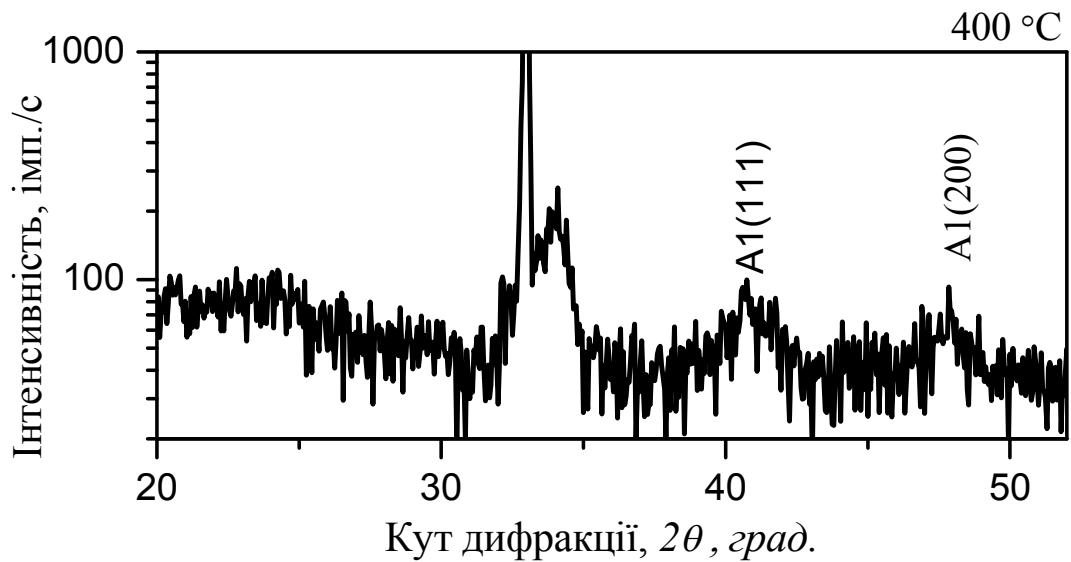


Рисунок 3.3 – Дифрактограма плівки FePt (5нм) після відпалу за температури 400 °С

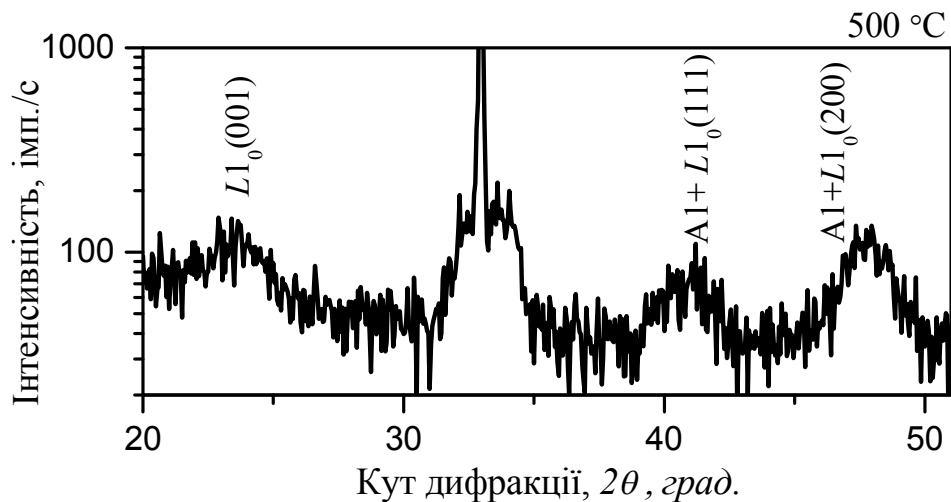


Рисунок 3.4 – Дифрактограма для плівки FePt (5нм) після відпалу за температури 500 °С

Після відпалу за температури 600 °С, дифрактограма плівки FePt має вигляд зображений на рисунку 3.5. На ній бачимо збільшення інтенсивності рефлексу (001) від впорядкованої фази $L1_0$. Також спостерігаємо пік $Al+L1_0(111)$ зі збільшеною інтенсивністю та пік (002), що має велику ширину та зміщується в сторону більших кутів. Цей пік належить до впорядкованої фази $L1_0$.

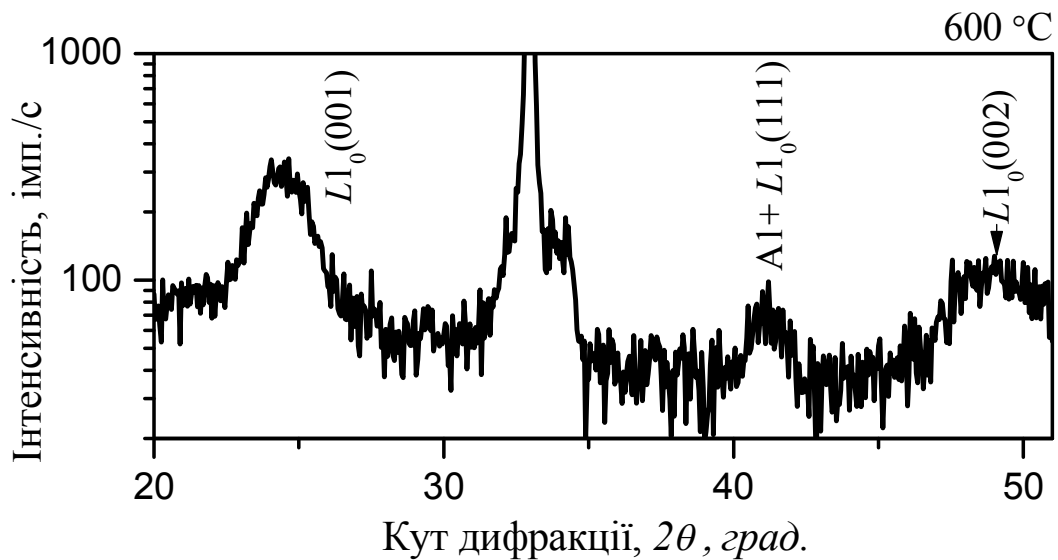


Рисунок 3.5 – Дифрактограма плівки FePt (5нм) після відпалу за температури 600 °C

Подальше збільшення температури відпалу до 700 °C призводить до стрімкого збільшення інтенсивності надструктурного рефлексу (001) впорядкованої фази $L1_0$ (рисунок 3.6).

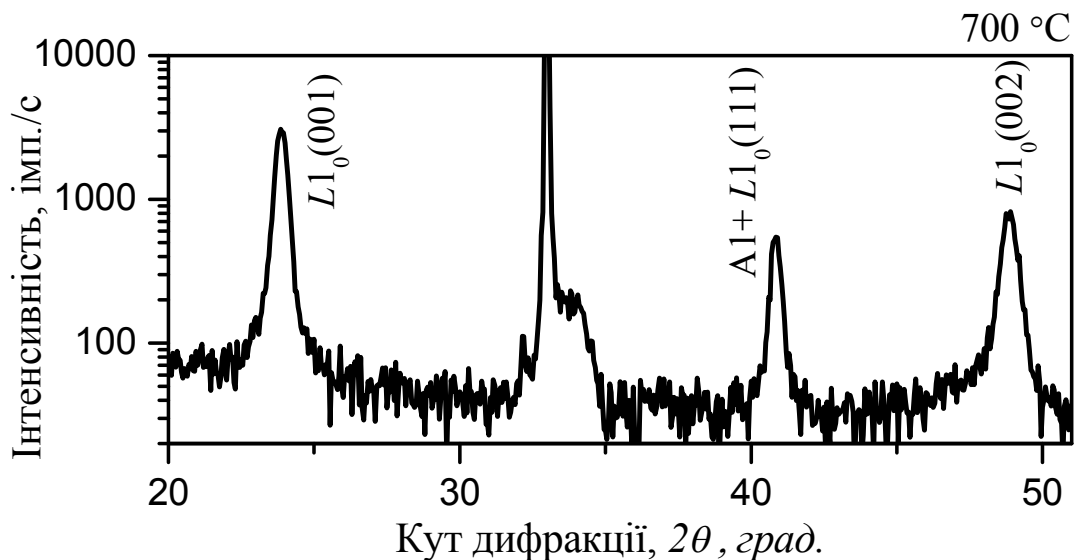


Рисунок 3.6 – Дифрактограма для плівки FePt (5нм) після відпалу за температури 700 °C

Інтенсивність піку (111), який може відповідати обом фазам Al та $L1_0$, продовжує збільшуватись. Рефлекс (002) залишається широким у основі через залишок неупорядкованої фази Al. Інтенсивність його стрімко збільшується та відповідає кутовому положенню рефлексу фази $L1_0(002)$.

Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt у плівці товщиною 5 нм

hkl	Термічна обробка	Кут дифракції, 2Θ , град.	Інтенсивність рефлексу, I , імп./с.	Міжплощинна відстань, d
(111)	Після осадження	40,6	3,067	2,222
	300 °C	40,7	79,61	2,217
	400 °C	40,75	99,76	2,214
	500 °C	41,2	109,83	2,191
	600 °C	41,2	98,36	2,191
	700 °C	40,85	546,46	2,209
(200)	400 °C	47,85	92,85	1,901
	500 °C	47,35	134,89	1,920
	600 °C	47,55	122,65	1,912
	700 °C	47,5	61,03	1,914
(001)	500 °C	23,4	146,17	3,801
	600 °C	24,5	332,11	3,633
	700 °C	23,85	3080,19	3,731
(002)	500 °C	48,5	116,37	1,877
	600 °C	49	127,43	1,859
	700 °C	48,9	821,01	1,863

У таблиці 3.2 представлено розраховані параметри ґратки та відношення параметру c до параметру a для рефлексу (111) FePt у плівці товщиною 5 нм.

Таблиця 3.2 – Параметри ґратки та відношення параметру c до параметру a для рефлексу (111) FePt у плівці товщиною 5 нм

Температурний режим	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å	c/a
Після осадження	3,849	3,849	1
300 °C	3,840	3,840	1
400 °C	3,835	3,835	1
500 °C	3,801	3,792	0,997
600 °C	3,884	3,633	0,935
700 °C	3,878	3,731	0,962

Розглянувши дифракційні картини після осадження та температур 300 °C та 400 °C можемо зазначити, що рефлекс (111) відповідає неупорядкованій фазі A1. З початком формування впорядкованої фази $L1_0$ (при відпалі 500 °C) рефлекс (111) починає відповідати двом фазам та протягом усього відпалу поступово зміщується в сторону більших кутів, що свідчить про збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$.

На рисунку 3.7 представлено залежність міжплощинної відстані d від температури відпалу. Стрімке зниження міжплощинної відстані рефлексу FePt (111) за температури 500 °C у плівці товщиною 5 нм збігаються з температурою початку перебігу впорядкування. Збільшення міжплощинної відстані за температури 700 °C може бути пов'язано з втіленням атомів водню у плівку.

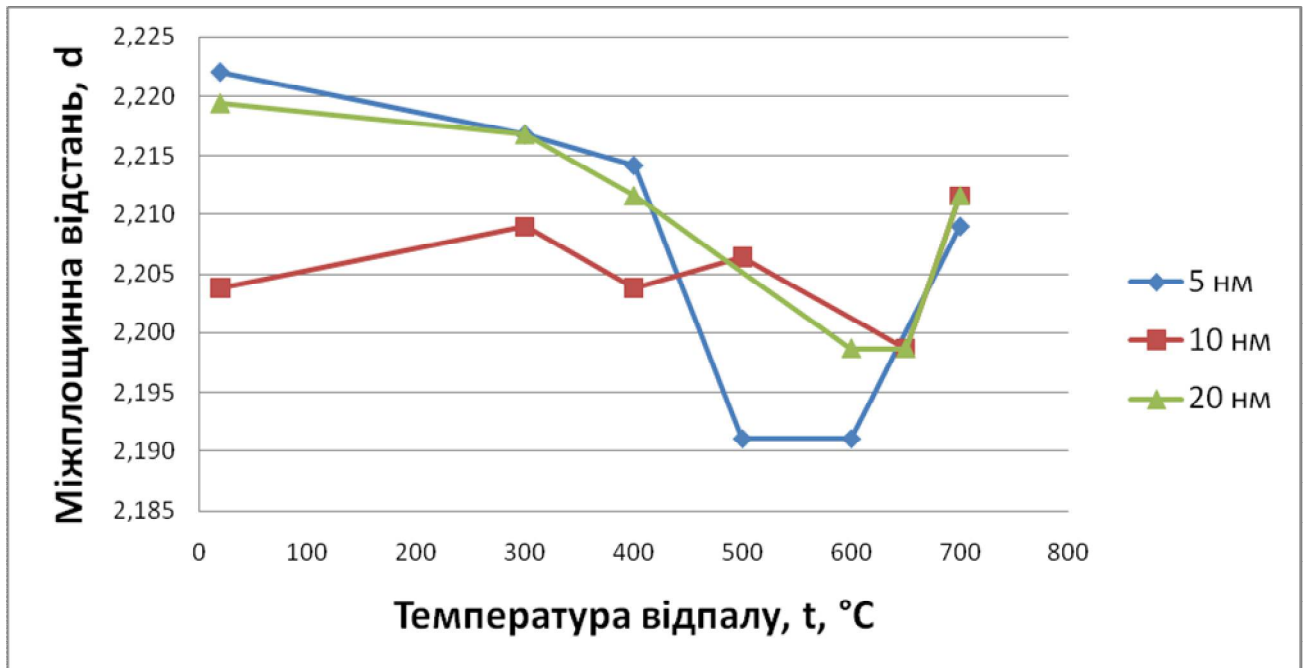


Рисунок 3.7 – Залежність міжплощинної відстані d рефлексу FePt (111) від температури відпалу для плівок FePt різної товщини

Параметр ґратки a фази FePt у плівці товщиною 5 нм зменшується до температури початку упорядкування (500 °C) та потім зростає з температурою відпалу (рисунок 3.8).

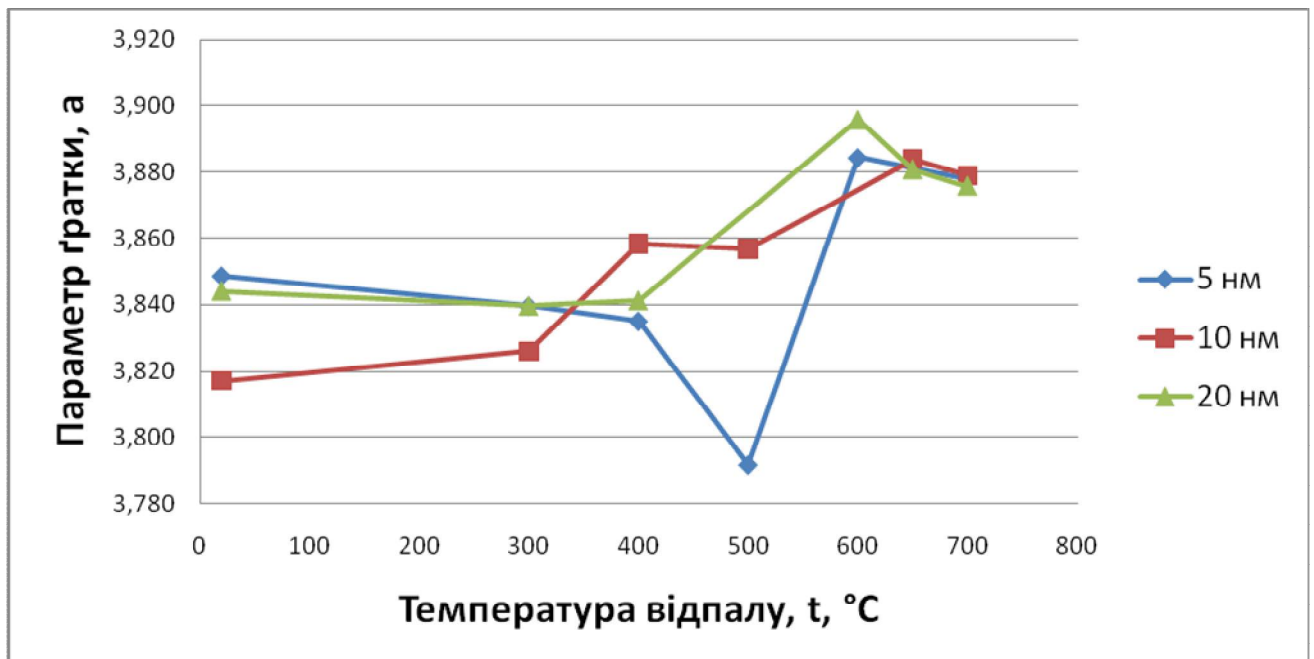


Рисунок 3.8 – Залежність параметру ґратки a фази FePt від температури відпалу для плівки FePt

Параметр ґратки c фази FePt у плівці товщиною 5 нм зменшується до температури 600 °C та зростає за температури відпалу 700 °C (рисунок 3.9).

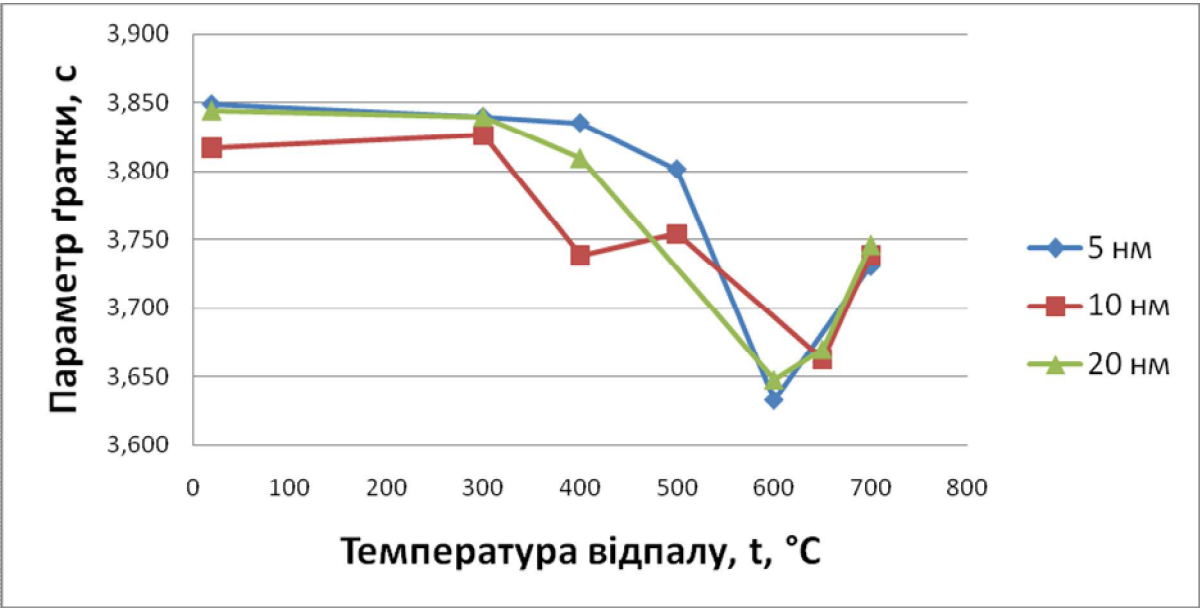


Рисунок 3.9 – Залежність параметру ґратки c фази FePt від температури відпалу для плівок FePt різної товщини

Відношення параметрів ґратки c/a фази FePt від температури відпалу (таблиця 3.2) для плівки FePt (5 нм) зменшується при збільшенні температури відпалу до 600 °C, що вказує на збільшення ступеню тетрагональності та ступеню впорядкування (рисунок 3.10).

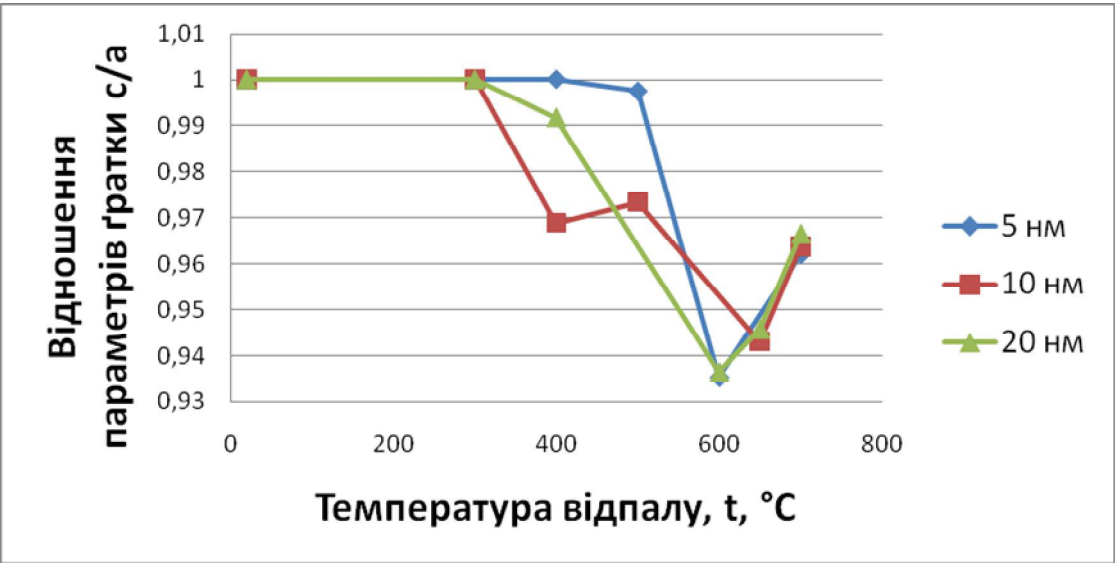


Рисунок 3.10 – Залежність відношення параметрів ґратки c/a фази FePt від температури відпалу для плівки FePt

На збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$ вказує також збільшення відношення інтегральних інтенсивностей рефлексів (001) та (002) з температурою відпалу у водні (рисунок 3.11). Це вказує на збільшення ступеню впорядкування дальнього порядку на вищих температурах відпалу.

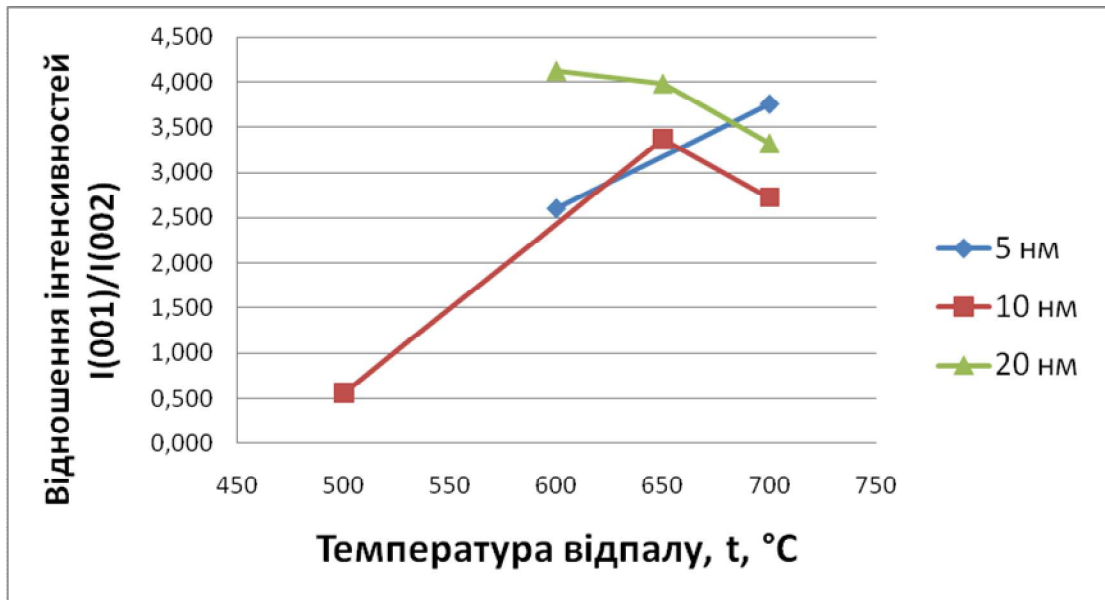


Рисунок 3.11 – Залежність відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$ фази $L1_0$ від температури відпалу для плівок FePt

На рисунку 3.12 показано зміну відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ з температурою відпалу для плівок FePt.

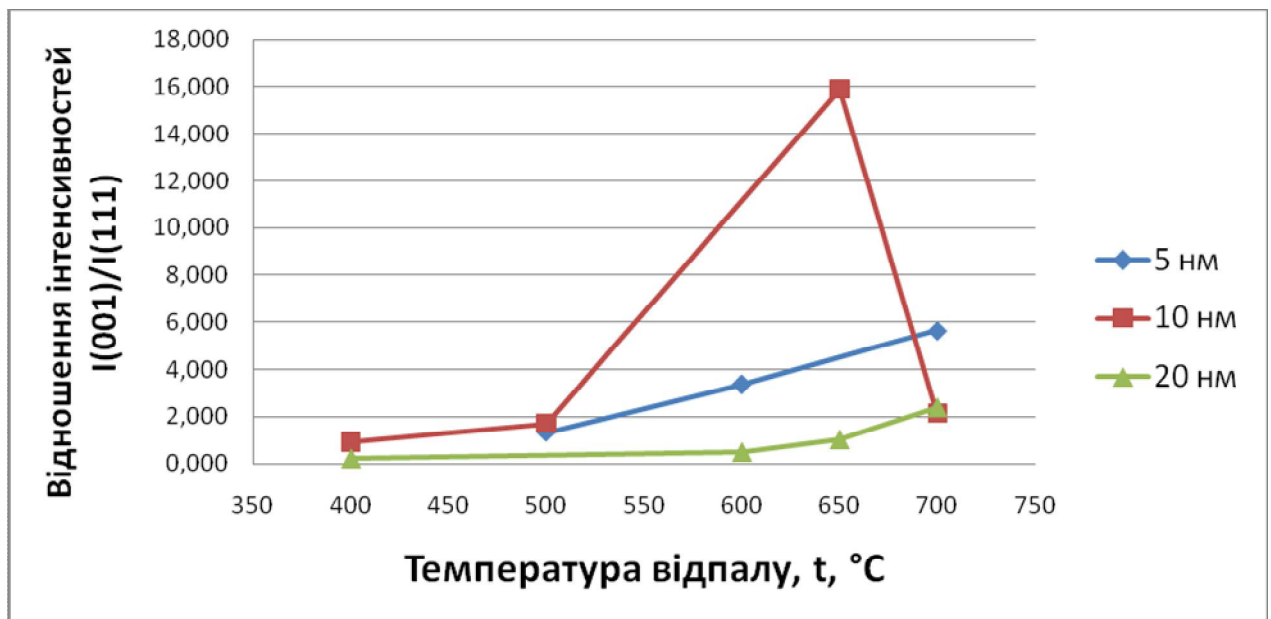


Рисунок 3.12 – Зміна відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ з температурою відпалу для плівок FePt

Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ збільшується з температурою відпалу від 500 °C до 700 °C для плівки товщиною 5 нм, що вказує на збільшення об'ємної долі зерен фази $L1_0$ FePt з віссю легкого намагнічування c перпендикулярній плівці.

3.1.2 Формування фазового складу у плівках FePt (10 нм) під час відпалу у водні

На рисунку 3.13 показано дифрактограму плівки FePt (10 нм) після осадження. На ній спостерігається чіткий пік (111) що відповідає неупорядкованій фазі A1 та рефлекс на куті дифракції 33°, що відповідає кремнієвій підкладці.

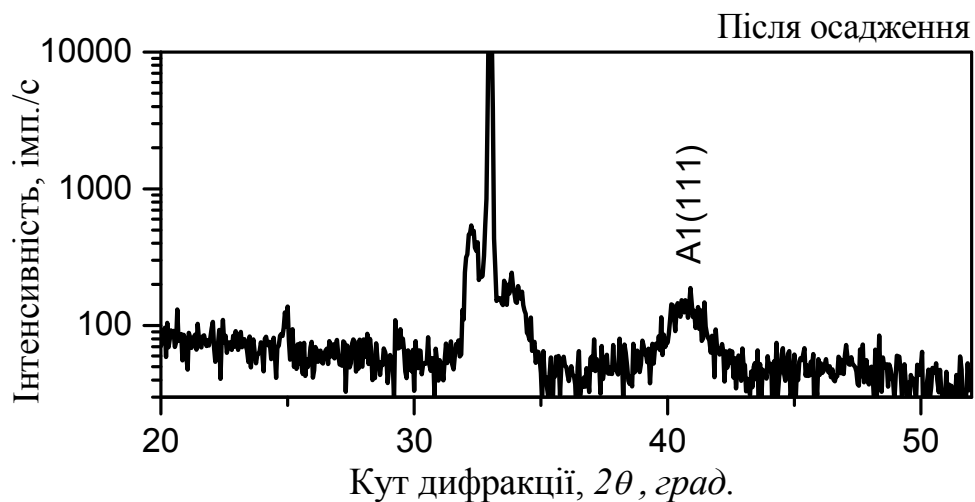


Рисунок 3.13 – Дифрактограма плівки FePt (10 нм) після осадження

Після відпалу за температури 300 °C, дифрактограма плівки FePt має вигляд зображений на рисунку 3.14. На ній бачимо рефлекс (111) від неупорядкованої фази A1 з дещо більшою інтенсивністю, ніж у плівці меншої товщини. Формування впорядкованої фази ще не почало відбуватись.

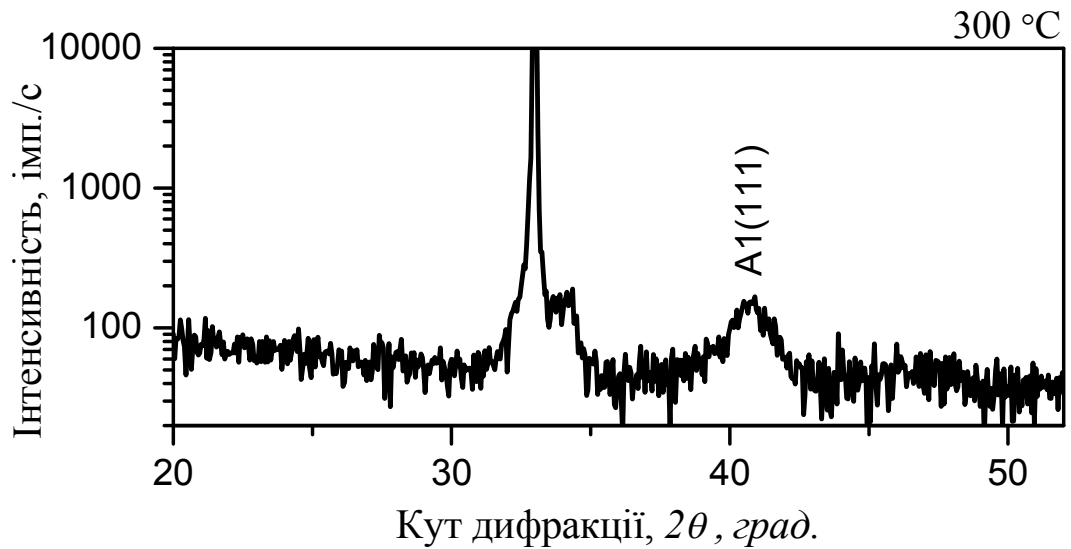


Рисунок 3.14 – Дифрактограма плівки FePt (10 нм) після відпалу за температури 300 °C

Підвищення температури відпалу до 400 °C призводить до появи надструктурного рефлексу (001), що належить впорядкованій фазі $L1_0$, яка починає формуватися (рисунок 3.15).

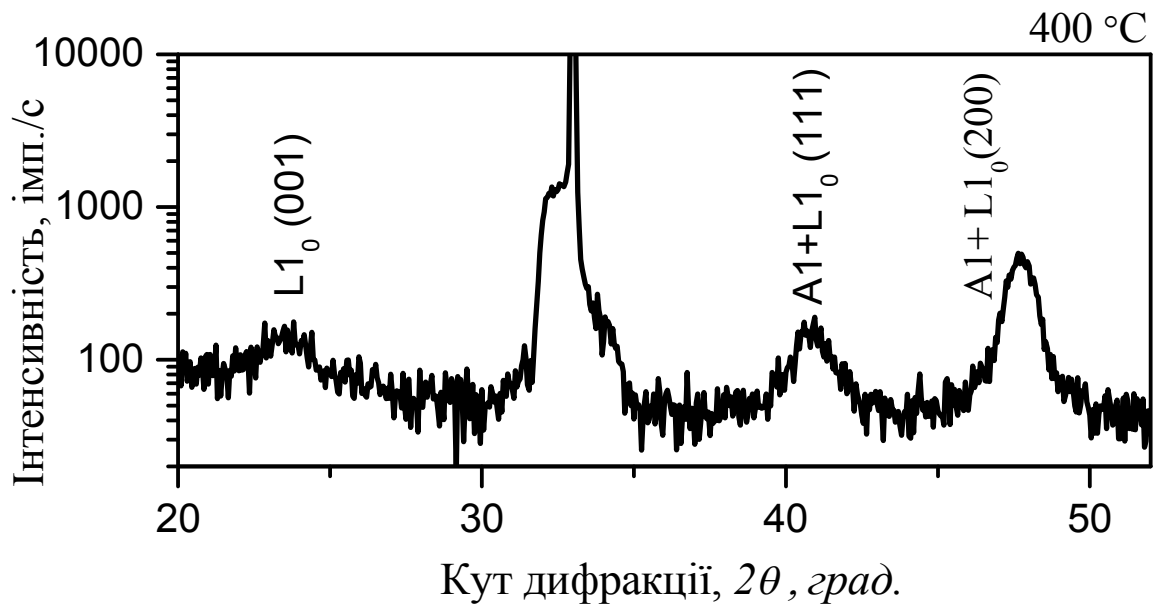


Рисунок 3.15 – Дифрактограма плівки FePt (10нм) після відпалу за температури 400 °C

Рефлекс (111) та (200) значної інтенсивності, який з'являється на дифрактограмі, відповідають двом фазам A1 та $L1_0$, що свідчить про початок впорядкування. На рисунку 3.16 показано дифрактограму плівки FePt (10 нм) після відпалу за температури 500 °C. На ній ми бачимо зростання інтенсивності надструктурного рефлексу (001) впорядкованої фази $L1_0$. Разом з цим пік (002) відповідає впорядкованій фазі.

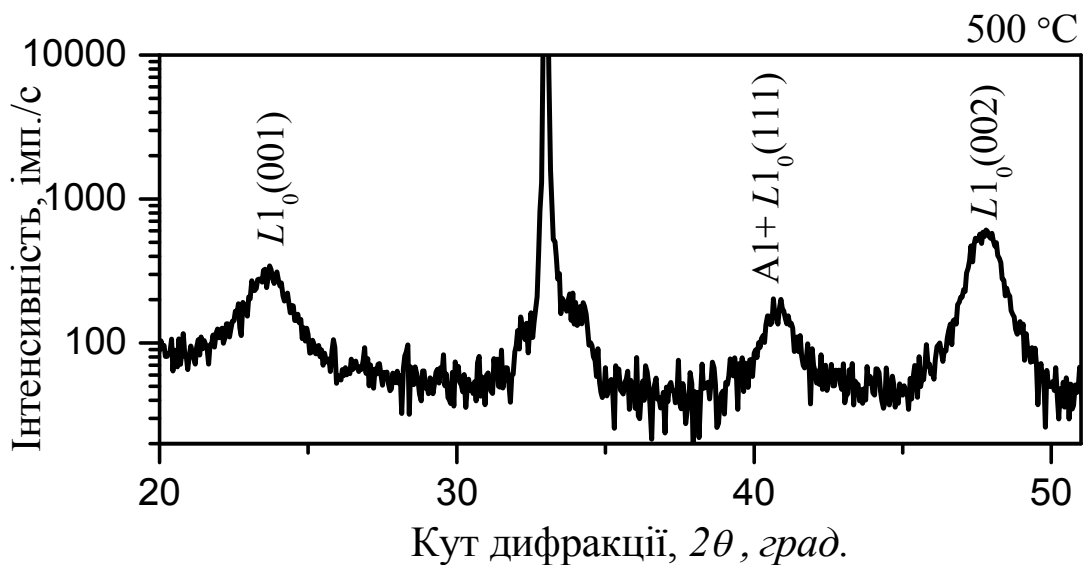


Рисунок 3.16 – Дифрактограма плівки FePt (10нм) після відпалу за температури 500 °C

Після відпалу за температури 650 °C на дифрактограмі плівки FePt бачимо збільшення інтенсивності надструктурного рефлексу (001) від впорядкованої фази $L1_0$ (рисунку 3.17). Також спостерігаємо пік A1+ $L1_0$ (111) та пік великої ширини (002) від впорядкованої фази $L1_0$. Вигин зі сторони менших кутів від нього відноситься до рефлексу (200).

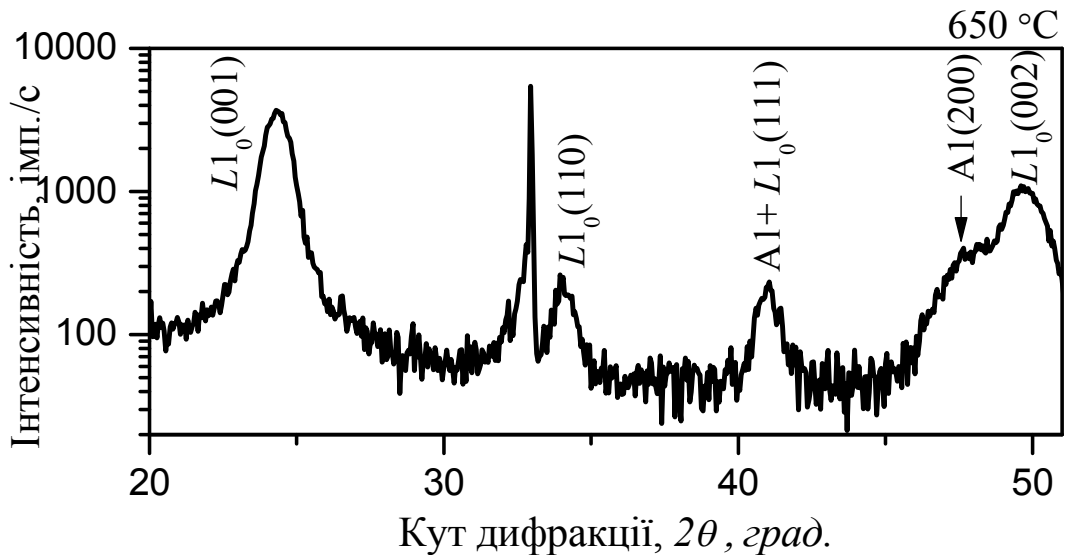


Рисунок 3.17 – Дифрактограма плівки FePt (10нм) після відпалу за температури 650 °С

Збільшивши температуру відпалу до 700 °С спостерігаємо стрімке збільшення інтенсивності рефлексів від впорядкованої фази $L1_0$ за рахунок збільшення її кількості (рисунок 3.18). Внаслідок не повного розщеплення рефлексу (200) на (200) і (002) рефлекс (002) залишається широким.

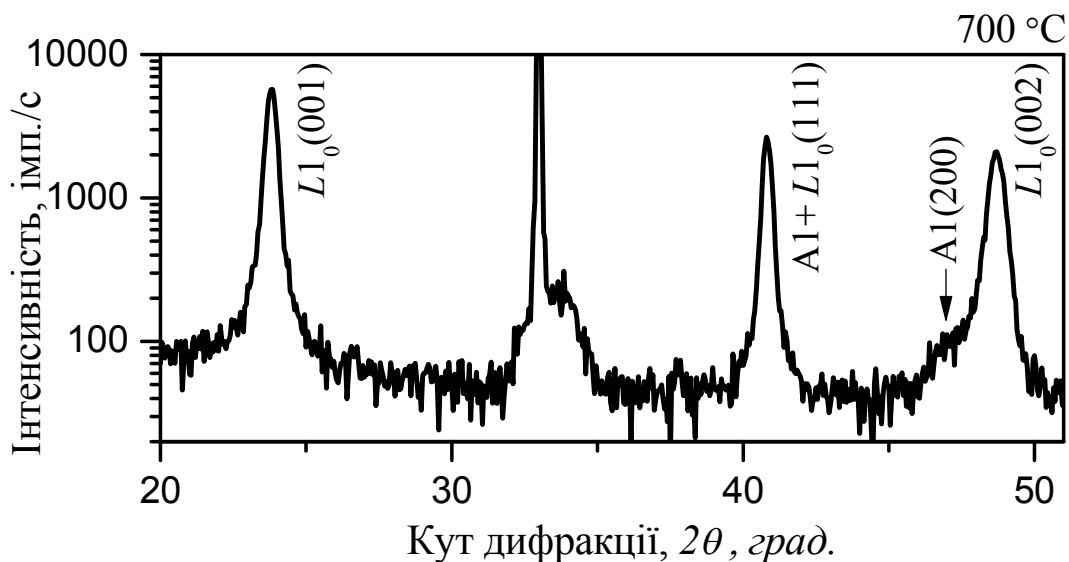


Рисунок 3.18 – Дифрактограма для плівки FePt (10 нм) після відпалу за температури 700 °С

Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt у плівці товщиною 10 нм

Фаза	Температура термообробки	Кут дифракції, 2Θ , град.	Інтенсивність рефлексу, I , імп./с.	Міжплощинна відстань, d
(111)	Після осадження	40,95	148,05	2,204
	300 °C	40,85	155,24	2,209
	400 °C	40,95	189,88	2,204
	500 °C	40,9	200,74	2,206
	650 °C	41,05	232,75	2,199
	700 °C	40,8	2655,52	2,212
(200)	400 °C	47,65	498,76	1,908
	500 °C	46,6	135,51	1,949
	650 °C	47,65	402,11	1,908
	700 °C	47,35	124,98	1,920
(001)	400 °C	23,8	176,7	3,738
	500 °C	23,7	343,01	3,754
	650 °C	24,3	3702,45	3,663
	700 °C	23,8	5701,52	3,738
(002)	500 °C	47,8	610,3	1,903
	650 °C	49,6	1098,27	1,838
	700 °C	48,7	2095,16	1,870

У таблиці 3.4 представлено розраховані параметри ґратки a і c та відношення параметру c до параметру a для рефлексу (111) FePt у плівці товщиною 10 нм.

Таблиця 3.4 – Параметри ґратки a і c та відношення параметру c до параметру a для рефлексу (111) FePt у плівці товщиною 10 нм

Температурний режим	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å	c/a
Після осадження	3,817	3,817	1
300 °C	3,826	3,826	1
400 °C	3,858	3,738	0,969
500 °C	3,857	3,754	0,973
600 °C	3,884	3,663	0,943
700 °C	3,879	3,738	0,964

Розглянувши дифракційні картини для всіх температур відпалу можемо зазначити, що на всіх зразках присутній рефлекс (111). З початком формування впорядкованої фази $L1_0$ (при відпалі 400 °C) рефлекс (111) відповідає двом фазам. Про утворення впорядкованої фази після відпалу за температури 400 °C свідчить поява надструктурного рефлексу (001). Також на 650 °C можемо бачити вигин що відповідає рефлексу (200) який поступово знижується з подальшим підвищенням температури та впорядкуванням.

Стрімке зниження міжплощинної відстані рефлексу FePt (111) за температури 400 °C у плівці товщиною 10 нм пов'язано з початком перебігу впорядкування (рисунок 3.7). Збільшення міжплощинної відстані за температури 700 °C може відбуватися внаслідок втілення атомів водню у плівку.

Параметр ґратки a фази FePt у плівці товщиною 10 нм зростає з температурою відпалу (рисунок 3.8). Параметр ґратки c фази FePt у плівці товщиною 10 нм зменшується до температури відпалу 650 °C та зростає за температури 700 °C (рисунок 3.9).

Параметр ґратки c фази FePt у плівці товщиною 10 нм зменшується до температури 650 °C та зростає за температури відпалу 700 °C (рисунок 3.9).

Відношення параметрів ґратки c/a фази FePt для плівки FePt (10 нм) зменшується при збільшенні температури відпалу до 650 °С, що вказує на збільшення ступеню тетрагональності та ступеню впорядкування (рисунок 3.10).

На збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$ та збільшення ступеню впорядкування дальнього порядку вказує збільшення відношення інтегральних інтенсивностей рефлексів (001) та (002) з температурою відпалу у водні (рисунок 3.11).

Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ збільшується з температурою відпалу до 650 °С для плівки товщиною 10 нм, що вказує на збільшення об'ємної кількості зерен фази $L1_0$ FePt з віссю легкого намагнічування c перпендикулярній плівці. Різке зменшення відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ свідчить про збільшення кількості зерен фази $L1_0$ FePt з текстурою (111).

3.1.3 Формування фазового складу у плівках FePt 20 нм при відпалі у водні

На рисунку 3.19 показано дифрактограму плівки FePt (20 нм) після осадження. Єдиний чіткий пік (111) відповідає неупорядкованій фазі A1.

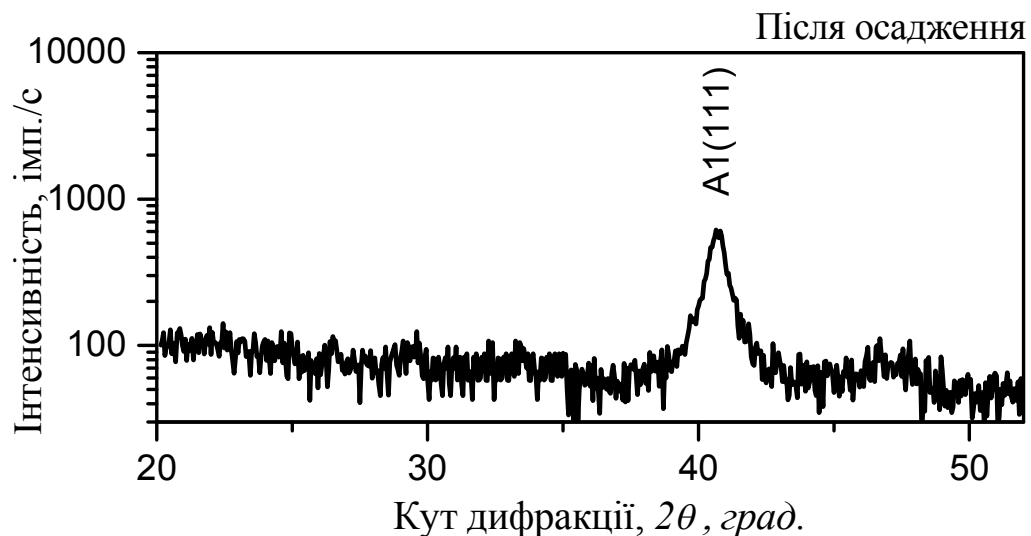


Рисунок 3.19 – Дифрактограма плівки FePt (20 нм) після осадження

Після відпалу за температури 300 °С, дифрактограма плівки FePt має вигляд зображений на рисунку 3.20. На ній бачимо рефлекс (111) від неупорядкованої фази A1 з більшою інтенсивністю, ніж у плівках товщиною 5 нм та 10 нм. Пік на куті дифракції $\sim 33^\circ$ відповідає кремнієвій підкладці. Формування впорядкованої фази ще не почало відбуватись.

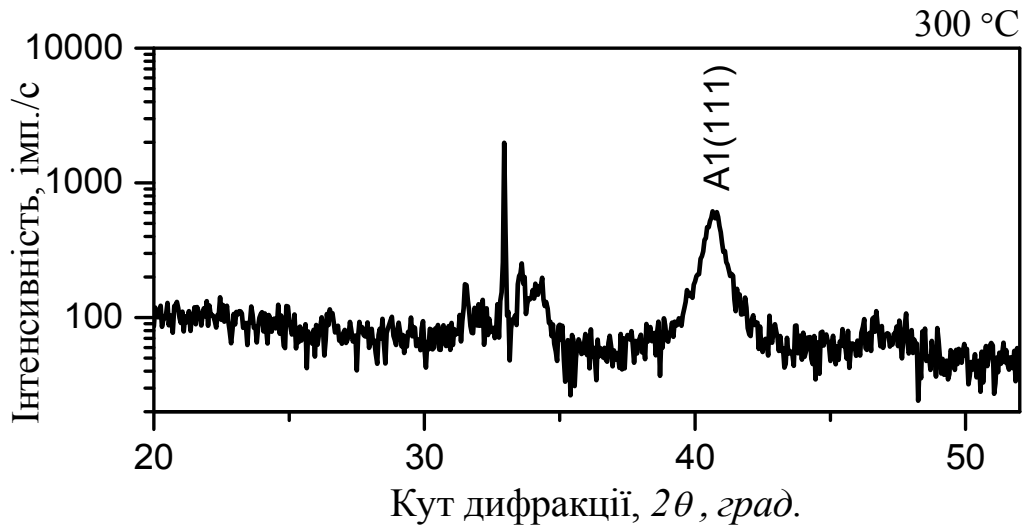


Рисунок 3.20 – Дифрактограма для плівки FePt (20 нм) після відпалу за температури 300 °С

Збільшивши температуру відпалу до 400 °С бачимо наступну дифрактограму (рисунку 3.21). На ній з'являється надструктурний рефлекс (001) малої інтенсивності, що належить впорядкованій фазі $L1_0$, яка починає формуватися.

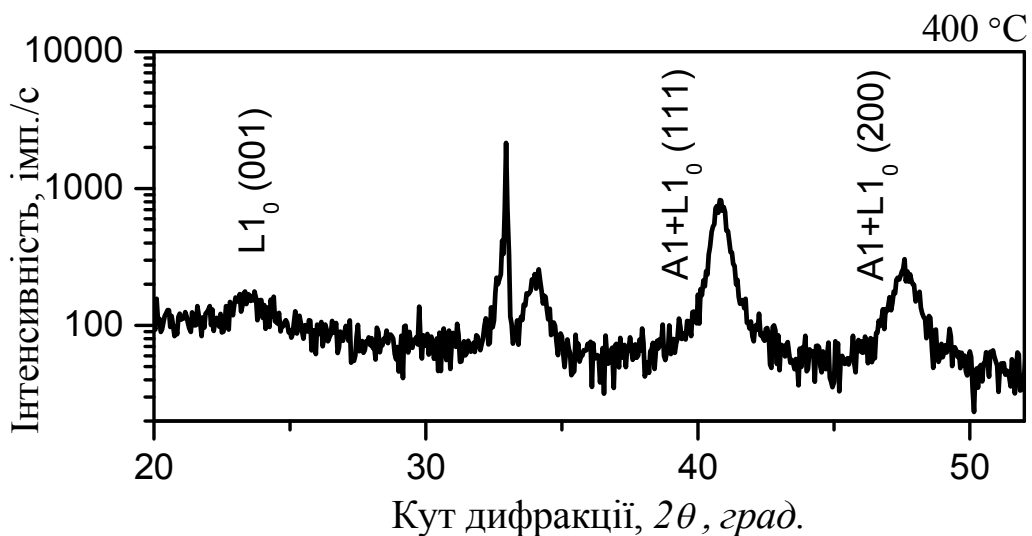


Рисунок 3.21 – Дифрактограма для плівки FePt (20 нм) після відпалу за температури 400 °С

Рефлекс (111) відповідає двом фазам $A1+L1_0$. Також з'являється рефлекс (200) що також може відповідати як неупорядкованій фазі $A1$, так і упорядкованій $L1_0$.

На рисунку 3.22 показано дифрактограму плівки FePt (20 нм) після відпалу за температури 600 °C. На ній ми бачимо зростання інтенсивності надструктурного рефлексу (001) від упорядкованої фази $L1_0$. Разом з цим рефлекс (200) розщепився на (200) та (002) та зменшилась його інтенсивність. Інтенсивність всіх інших піків зростає.

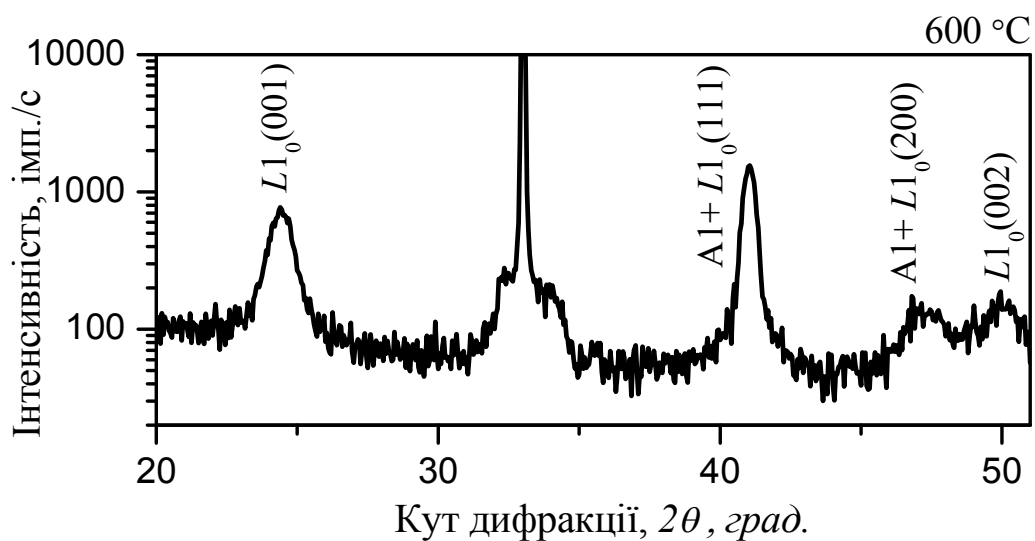


Рисунок 3.22 – Дифрактограма для плівки FePt (20нм) після відпалу за температури 600 °C

Після відпалу за температури 650 °C надалі збільшується інтенсивність рефлексу (001) від упорядкованої фази $L1_0$ (рисунок 3.23). Також спостерігаємо збільшення інтенсивностей рефлексів (111), (200) від фаз $A1$ та $L1_0$ та (002) від фази $L1_0$.

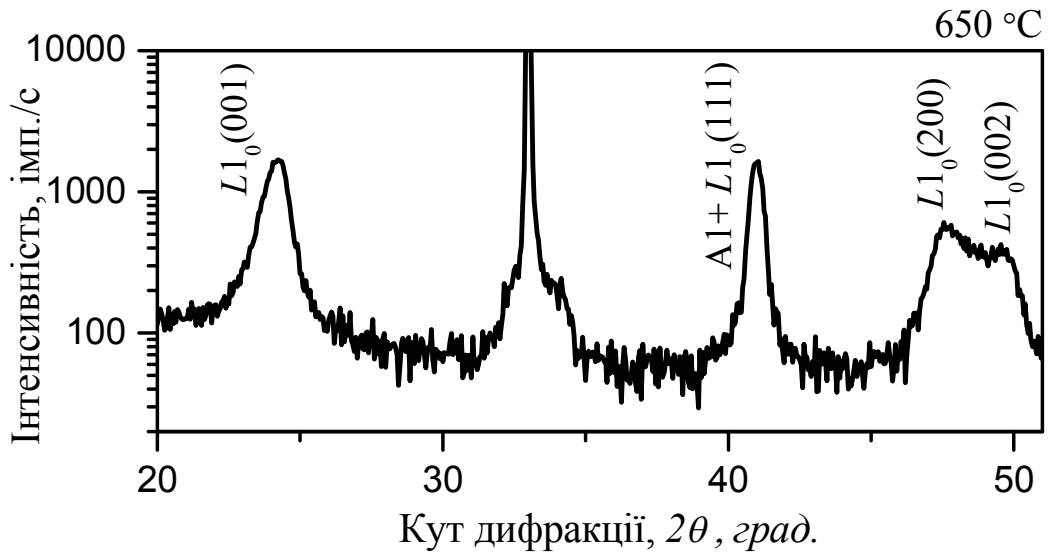


Рисунок 3.23 – Дифрактограма для плівки FePt (20 нм) після відпалу за температури 650 °C

Підвищення температури відпалу до 700 °C викликає стрімке збільшення інтенсивності рефлексів впорядкованої фази $L1_0$ (рисунок 3.24).

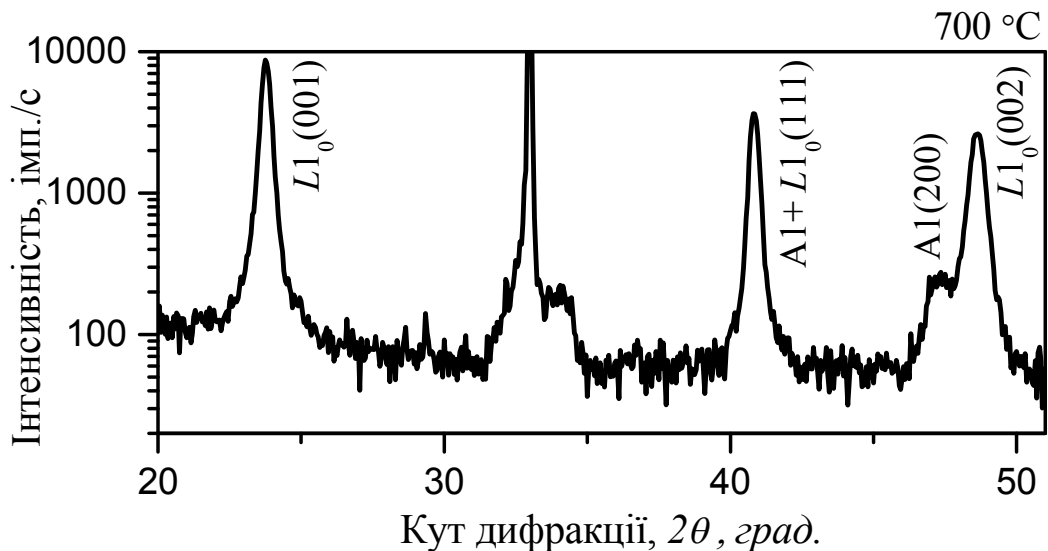


Рисунок 3.24 – Дифрактограма плівки FePt (20 нм) після відпалу за температури 700 °C

Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt плівки товщиною 20 нм представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Кут дифракції, інтенсивності різних рефлексів FePt, розраховані міжплощинні відстані після осадження та термічної обробки у атмосфері водню для фази FePt у плівці товщиною 20 нм

Фаза	Температурний режим	Кут дифракції, 2Θ , град.	Інтенсивність рефлексу, I , імп./с.	Міжплощинна відстань, d
(111)	Після осадження	40,65	615,3	2,219
	300 °C	40,7	620,45	2,217
	400 °C	40,8	824,62	2,212
	600 °C	41,05	1554,03	2,199
	650 °C	41,05	1639,95	2,199
	700 °C	40,8	3649,48	2,212
(200)	400 °C	47,6	304,36	3,809
	600 °C	46,8	173,48	1,941
	650 °C	47,55	607,54	1,912
	700 °C	47,35	275,76	1,920
(001)	400 °C	23,35	176,94	3,809
	600 °C	24,4	773,34	3,648
	650 °C	24,25	1683,81	3,670
	700 °C	23,75	8725,48	3,746
(002)	600 °C	49,95	187,89	1,826
	650 °C	49,55	423,57	1,840
	700 °C	48,65	2627,3	1,871

У таблиці 3.6 представлено розраховані параметри ґратки a і c та відношення параметру c до параметру a для рефлексу (111) FePt у плівці товщиною 20 нм.

Таблиця 3.6 – Параметри ґратки та відношення параметру c до параметру a для фази (111) FePt товщиною 20 нм

Температурний режим	Параметр ґратки, a , Å	Параметр ґратки, c , Å	c/a
Після осадження	3,844	3,844	1
300 °C	3,840	3,840	1
400 °C	3,841	3,809	0,992
500 °C	3,896	3,648	0,936
600 °C	3,881	3,670	0,946
700 °C	3,876	3,746	0,967

Стрімке зменшення міжплощинної відстані рефлексу FePt (111) за температури 400 °C у плівці товщиною 20 нм пов'язано з початком перебігу впорядкування (рисунок 3.7). Збільшення міжплощинної відстані за температури 700 °C може відбуватися внаслідок втіленням атомів водню у плівку.

Параметр ґратки a фази FePt у плівці товщиною 20 нм зростає до температури 600 °C) та зменшується в інтервалі температур (650–700) °C (рисунок 3.8).

Відношення параметрів ґратки c/a фази FePt від температури відпалу для плівки FePt (20 нм) зменшується при збільшенні температури відпалу до 650 °C, що вказує на збільшення ступеню тетрагональності та ступеню впорядкування (рисунок 3.10). На збільшення кількості впорядкованої фази $L1_0$ та ступеню впорядкування дальнього порядку вказує також збільшення відношення інтегральних інтенсивностей рефлексів (001) та (002) з температурою відпалу (рисунок 3.11).

Відношення інтенсивностей $I(001)/I(111)$ збільшується з підвищенням температури відпалу до 650 °C для плівки товщиною 20 нм, що вказує на збільшення об'ємної долі зерен фази $L1_0$ FePt, які ростуть з віссю легкого намагнічування c перпендикулярній плівці (рисунок 3.12).

Розмір областей когерентного розсіювання в нанорозмірних матеріалах часто ототожнюють з розміром зерен. Як бачимо з температурної залежності розміру областей когерентного розсіювання плівок FePt, розмір зерен починає зростати з температурою відпалу. У найтовщій плівці FePt (20 нм) більший розмір областей когерентного розсіювання (рисунок 3.25).

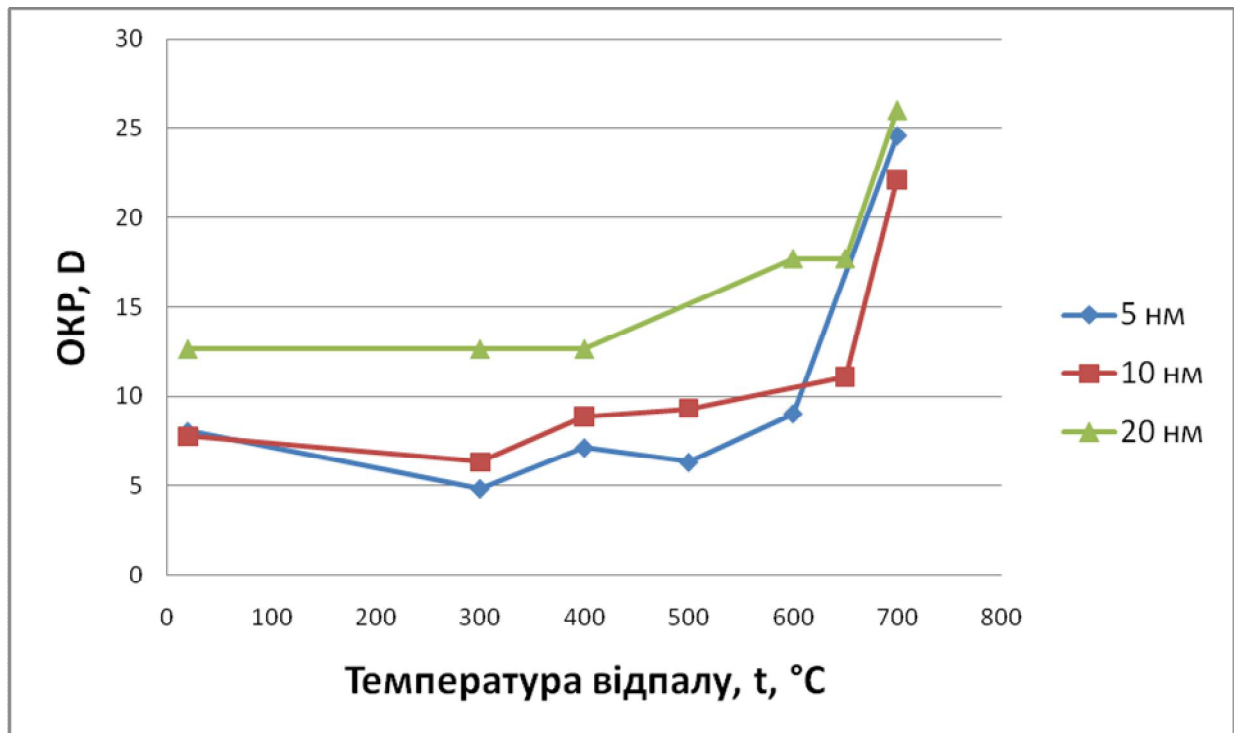


Рисунок 3.25 – Залежність розмірів областей когерентного розсіювання D від температури відпалу для плівок FePt

3.2 Електронографічний аналіз

На серії рисунків представлені електронограми плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температур (300–700) °C. Дифракційна картина після відпалів за температур 300 °C та 400 °C розмита, що може бути пов'язано з малою товщиною плівки та великих напружень у ній (рисунок 3.26 та 3.27).

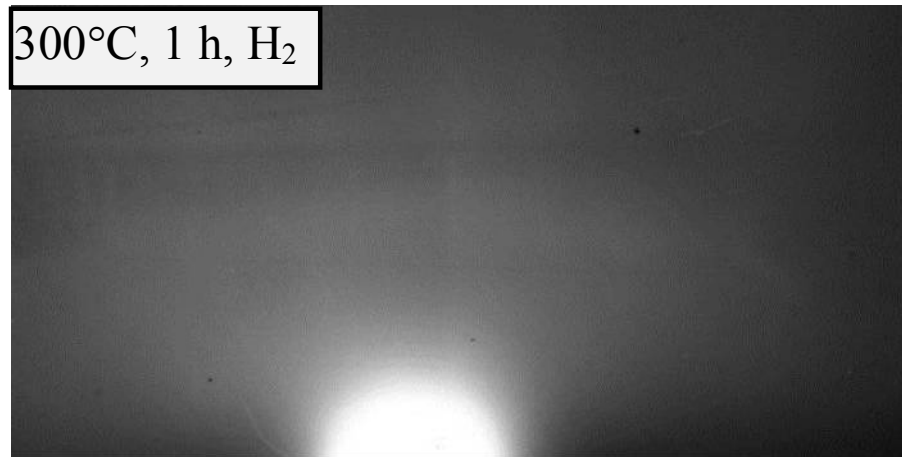


Рисунок 3.26 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 300 °C

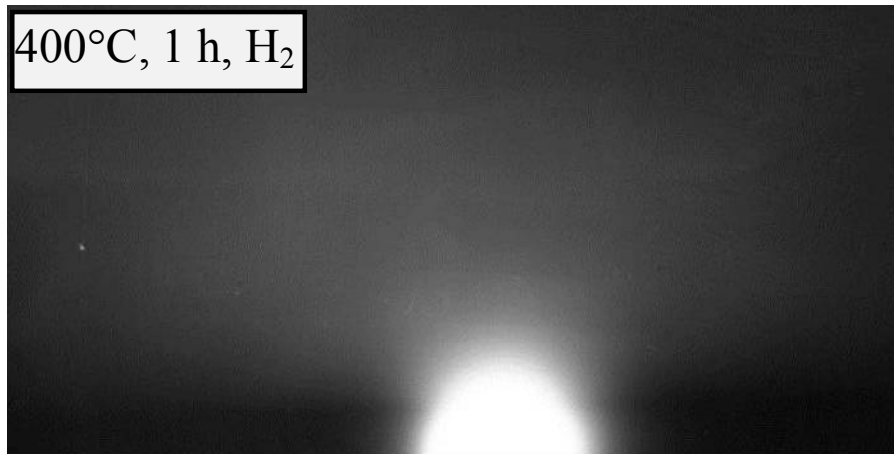


Рисунок 3.27 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 400 °C

Після відпалу за 500 °C з'явилися рефлекси (111) та (200) дуже слабкої інтенсивності, які можуть належати як до неупорядкованої фази A1 FePt, так і до впорядкованої фази L1₀-FePt (рисунок 3.28). Така слабка інтенсивність пояснюється дуже малою кількістю сформованої магнітно-твердої фази L1₀.

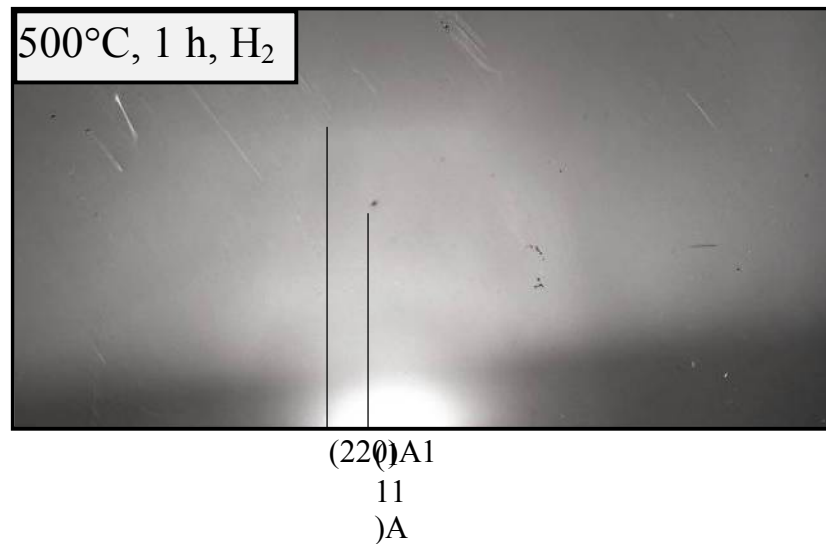


Рисунок 3.28 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 500 °С

Після відпалу за температури 600 °С дифракційна картина майже не змінюється (рисунок 3.29).

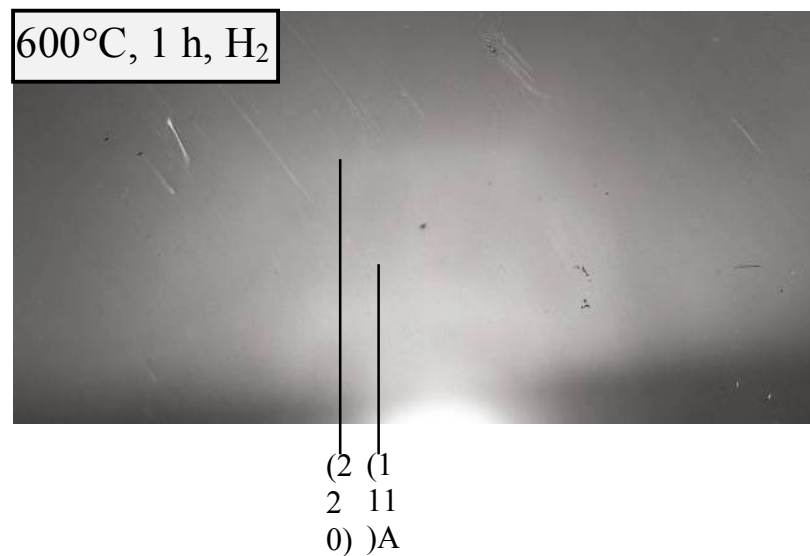


Рисунок 3.29 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 600 °С

Відпал у водні за 650 °С протягом години призводить до збільшення кількості рефлексів на електронограмі внаслідок перебігу процесу упорядкування у плівці. З'являється надструктурний рефлекс (110) та рефлекси,

(002), (112), (201), (331), (222), (202) що належать впорядкованій фазі $L1_0$ -FePt (рисунок 3.30). Рефлекс (111) може належати, як до неупорядкованої фази A1, так й до впорядкованої магнітно-твердої фази $L1_0$.

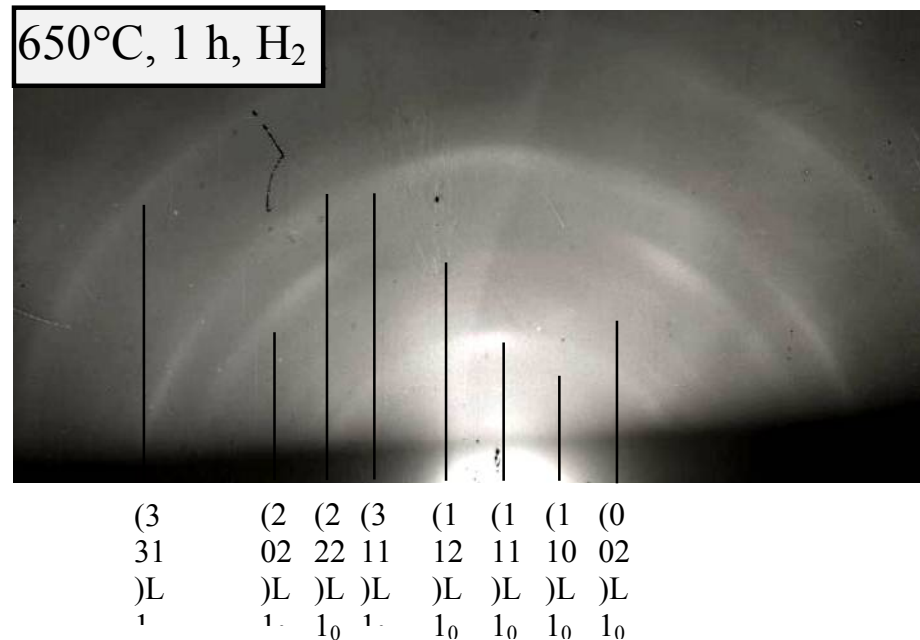


Рисунок 3.30 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 650 °C

Після відпалу плівки FePt (5 нм) за температури 700 °C на електронограмі, яка зображена на рисунку 3.31, збільшується інтенсивність рефлексів (110), (112), (201), які належать до впорядкованої фази $L1_0$, що свідчить про збільшення її кількості.

На електронограмі плівки FePt товщиною 20 нм за температури 650 °C присутні рефлекси, що належать впорядкованій фазі $L1_0$, але дифракційні кільця розмиті, що може свідчити про великі напруження у плівці (рисунок 3.32).

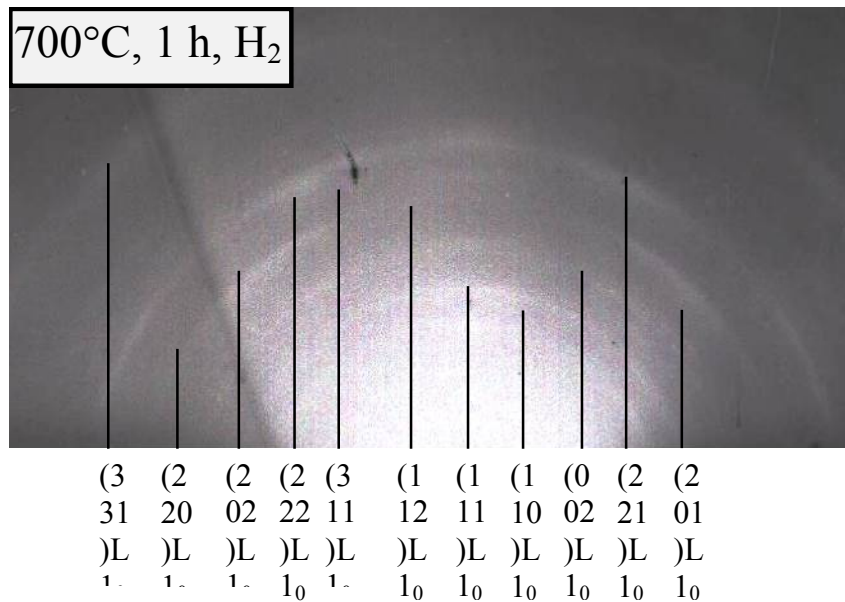


Рисунок 3.31 – Електронограма плівки FePt (5 нм) після відпалу у водні за температури 700 °С

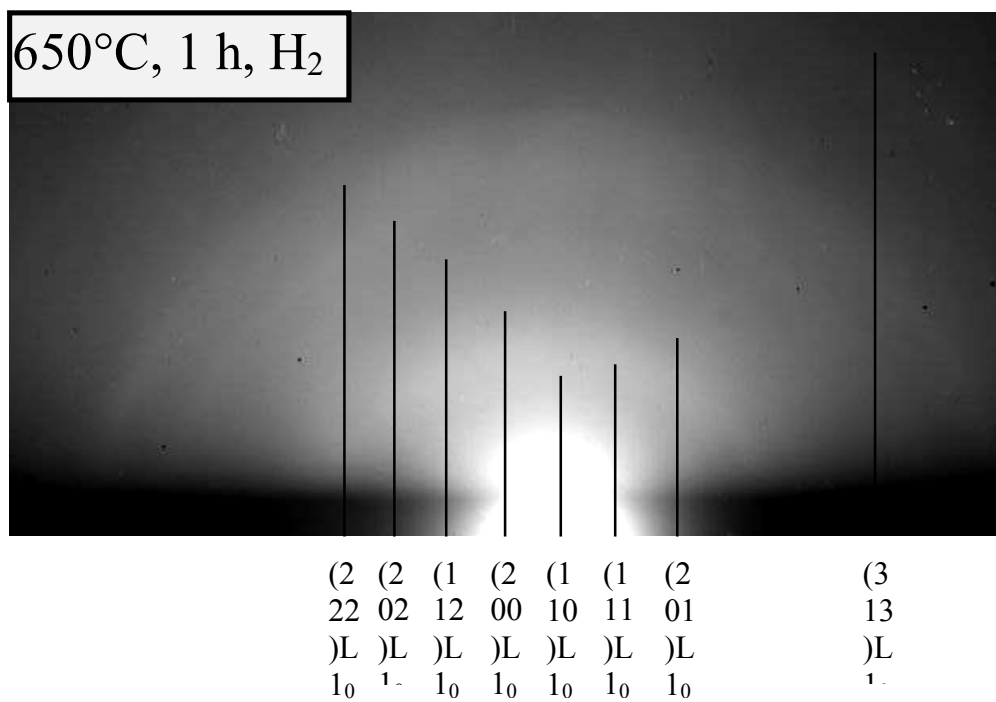


Рисунок 3.32 – Електронограма плівки FePt (20 нм) після відпалу у водні за температури 650 °С

Проведені електронографічні дослідження для плівок FePt товщиною 5 нм та 20 нм підтверджують дані, які було отримано методом рентгеноструктурного фазового аналізу.

3.3 Дослідження фазових та структурних перетворень у плівках FePt (10 нм) методом раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання

Для досліджень плівок FePt було використано раманівську спектроскопію комбінаційного розсіювання (СКР) з лазерним джерелом світла з $\lambda=633$ нм. Як відомо, при взаємодіях світла з речовиною, основними фізичними процесами є розсіювання та поглинання, внаслідок якого молекули речовини переходять у збуджений стан. СКР дозволяє ідентифікувати вібраційні стани молекул (фононів). Метод не чутливий до смуг поглинання, не вимагає спеціальної підготовки зразків, але супроводжується фотолюмінесценцією зразка або підкладки, що потребує додаткового аналізу.

На рисунку 3.33 наведені спектри СКР плівки після осадження, опроміненої з двох сторін – з боку підкладки та зі сторони плівки.

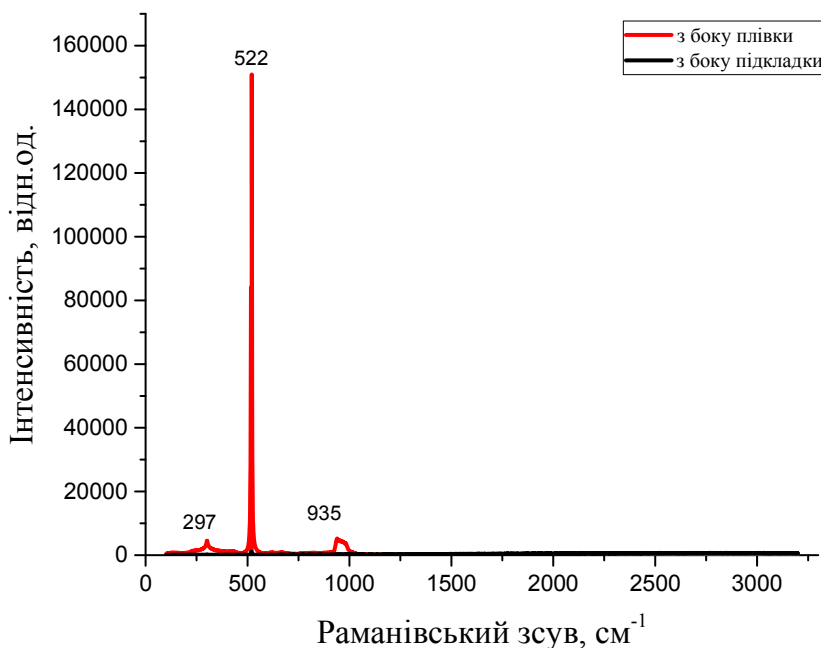


Рисунок 3.33 – Спектри комбінаційного розсіювання магнітної плівки FePt (10 нм) після осадження з боку підкладки та плівки

З боку плівки вузький спектр на частоті 522 см^{-1} відповідає кремнію. Два резонансних піки спектру малої інтенсивності можна віднести до неупорядкованої

фази Al або оксидів (шар SiO_2 , який знаходиться поверх $\text{Si}(001)$). З боку підкладки резонансних рефлексів після осадження не спостерігається. Такий ефект відбувається при посиленні люмінесценції плівкою зразка.

Спектри комбінаційного розсіювання магнітної плівки FePt (10 нм) після відпалу за температур 500 °C та 700 °C з боку підкладки представлені на рисунку 3.34 (інтенсивністю 100% від потужності лазера).

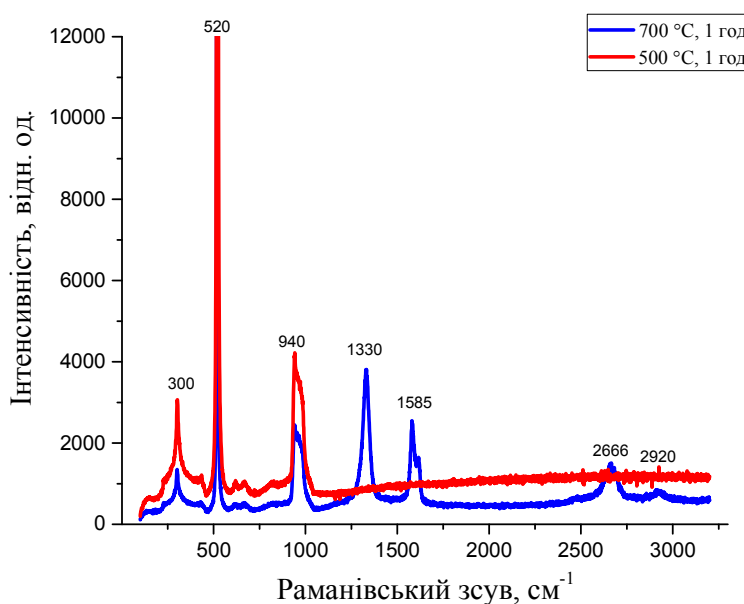


Рисунок 3.34 – Спектри комбінаційного розсіювання магнітної плівки FePt (10 нм) після відпалу за температур 500 °C та 700 °C з боку підкладки (КР спектри інтенсивністю 100 % від максимальної потужності лазера)

Інтенсивність рефлексів в області значень хвильових чисел 300 см^{-1} та 940 см^{-1} збільшується після відпалу у водні. За вищої температури відпалу 700 °C спостерігається подальше збільшення інтенсивності і кількості резонансних рефлексів, що свідчить про протікання процесів упорядкування. Нелінійна зміна інтенсивності спектрів є проявом ефектів вимушеного комбінаційного розсіювання внаслідок якого відбувається посилення коливань атомів чи молекул.

Максимуми на $\sim 2666 \text{ см}^{-1}$ на спектрах свідчать про збудження зв'язаних мод Е коливань Pt и FePt. Незначне збільшення ширини піка в спектрі КР (рисунок 3.34) в області значень хвильових чисел 940 см^{-1} , 1330 см^{-1} та 1585 см^{-1} свідчить про високу ступінь впорядкування плівки FePt та прояву розмірних ефектів, які викликані малими розмірами зерен. Піки резонансної частоти в діапазоні частот $1300 \text{ см}^{-1} - 2920 \text{ см}^{-1}$ зі сторони підкладки мають майже симетричну форму.

На рисунку 3.35 наведені результати спектроскопії комбінаційного розсіювання плівок FePt, сформованих при різних температурах відпалу з боку плівки.

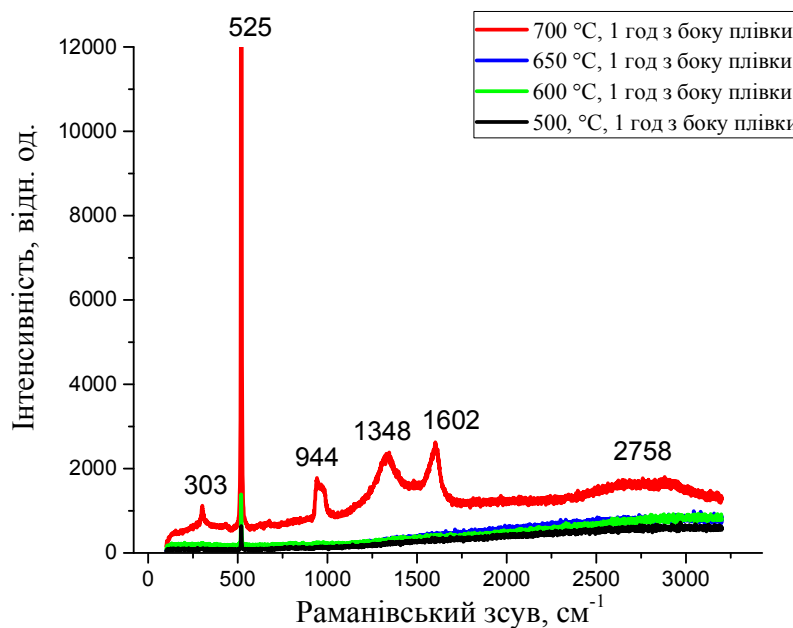


Рисунок 3.35 – Спектри комбінаційного розсіювання магнітної плівки FePt (10 нм) після відпалу в інтервалі температур $500 \text{ }^{\circ}\text{C} - 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ з боку плівки (КР спектри інтенсивністю 100 % від максимальної потужності лазера)

Дослідження спектрів комбінаційного розсіювання світла зразків FePt демонструють характерні максимуми, які розташовані в області хвильових чисел $\sim 1348 \text{ см}^{-1}$, 1602 см^{-1} , та 2758 см^{-1} , що відповідають двофазному стану

плівки ($A1 + L1_0$). Піки резонансної частоти з боку плівки мають асиметричну форму в діапазоні частот $1330 \text{ см}^{-1} - 2600 \text{ см}^{-1}$. Асиметрія спектра СКР пов'язана з двофазним станом плівки. З підвищенням температури відпалу до 700°C інтенсивність резонансних піків збільшується, що вказує на збільшення ступеню впорядкування плівки. Методи комбінаційного розсіювання і ефект люмінесценції дозволяють ідентифікувати зміни у структурі магнітних плівок після термічної обробки у атмосфері водню.

3.4 Метод феромагнітного резонансу

На рисунку 3.36 показано ФМР-спектри плівки FePt (20 нм) після відпалу у атмосфері водню в інтервалі температур ($500-700$) $^\circ\text{C}$. Кут θ_H між напрямком прикладеного поля H відносно нормалі до плівки становить $\theta_H = 0^\circ$. Сигнал ФМР реєстрували як залежність першої похідної інтенсивності спектру поглинання від напруженості поля. Чутливість спектрометра в цьому випадку на декілька порядків вища порівняно з реєстрацією сигналу в інтегральній формі [37]. За формою спектрів ФМР плівки FePt (20 нм) можна зробити висновок про втілення водню у плівку, про що свідчить пік більшої інтенсивності при прикладеному магнітному полі $\sim 283 \text{ мТл}$. Зі збільшенням температури відпалу до 700°C збільшується ширина цього піку. Менший за інтенсивністю пік при прикладеному магнітному полі $\sim 173 \text{ мТл}$ відповідає феромагнітній фазі A1. Плівка має у своїй структурі фази A1 + L1₀.

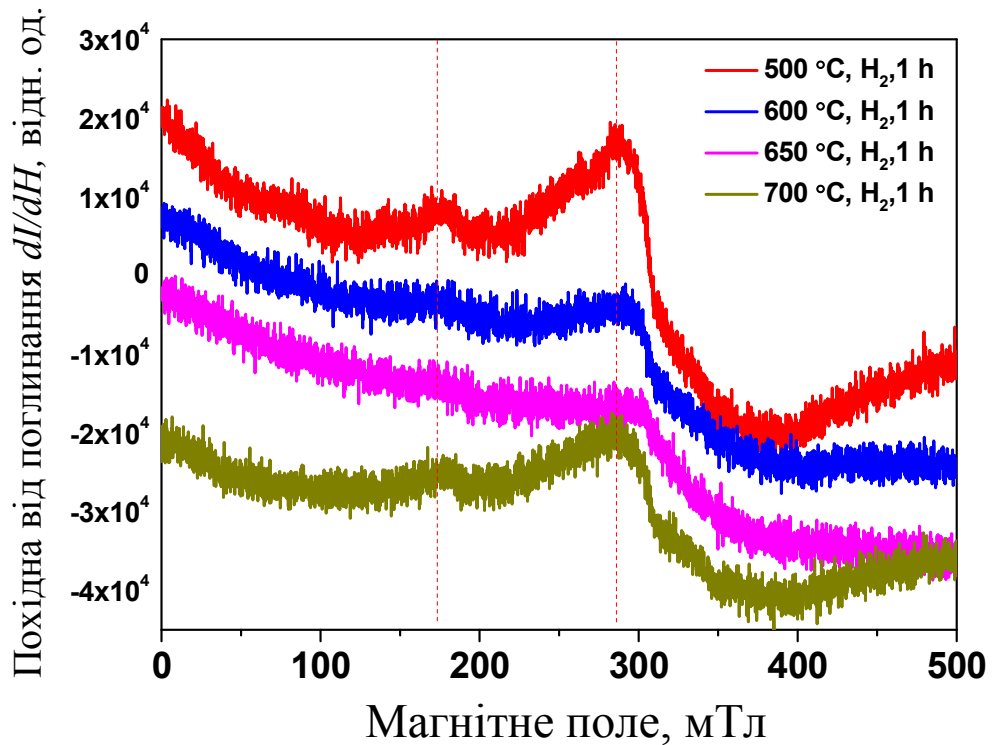


Рисунок 3.36 – Спектри ФМР плівки FePt (20 нм) після відпалу у атмосфері водню в інтервалі температур 500–700 °С, отримані в перпендикулярно прикладеному до зразка магнітному полі

3.5 Висновки до розділу 3

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Формування впорядкованої фази $L1_0$ FePt у плівках FePt (5 нм) починається під час відпалу у водні за температури 500 °С.
2. Збільшення товщини плівки до 10 нм призводить до зменшення температури упорядкування.
3. Різке зменшення міжплощинної відстані у плівках FePt корелює з початком упорядкування.
4. Відношення інтенсивностей $I(001)/I(002)$ фази FePt збільшується з підвищенням температури відпалу від 500 °С до 700 °С для плівки товщиною 5 нм, що свідчить про збільшення ступеню упорядкування фази $L1_0$.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Метою даного розділу є дослідження негативних та потенційно шкідливих та небезпечних факторів, які можуть призвести до негативного впливу на організм під час отримання та вивчення структурних і фазових характеристик нанорозмірних плівкових систем FePt. Такі умови можуть викликати захворювання та травмування. Крім того, метою є розробка заходів для усунення цих факторів та впровадження безпеки в надзвичайних ситуаціях. Тонкоплівкові зразки були отримані за допомогою методу магнетронного осадження, використовуючи металеві мішені заліза та платини високої чистоти. Відпал проводився в атмосфері водню за допомогою установки ВУП 5М. При аналізі умов праці у процесі виконання даної дисертаційної роботи важливо враховувати такі аспекти, як мікроклімат, склад повітря в робочій зоні, рівень шуму, вібрації та питання електричної та пожежної безпеки [38].

4.1 Характеристики приміщення

Науково-дослідницька робота виконувалась у відділі фізики фазових перетворень на базі інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова в лабораторії електроннографії. Схема лабораторії та розташування всіх елементів представлено на рисунку 4.1. Проведено вимірювання приміщення та вікон лабораторії:

- лабораторія: довжина – 6 м; ширина – 8 м; висота – 3,8 м.
- вікна: ширина – 2,8 м, висота – 2,6 м.

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

Приміщення, в якому виконувався електроннографічний аналіз, має наступні установки:

1, 2 – стіл письмовий з комп'ютером; 3 – установка для електронографії ЕМР – 100; 4 – електронний мікроскоп ЕМВ – 100Л; 5 – книжкова шафа; 6 – стелаж для інструментів; 7, 8 – пост вакуумний універсальний ВУП 5М.

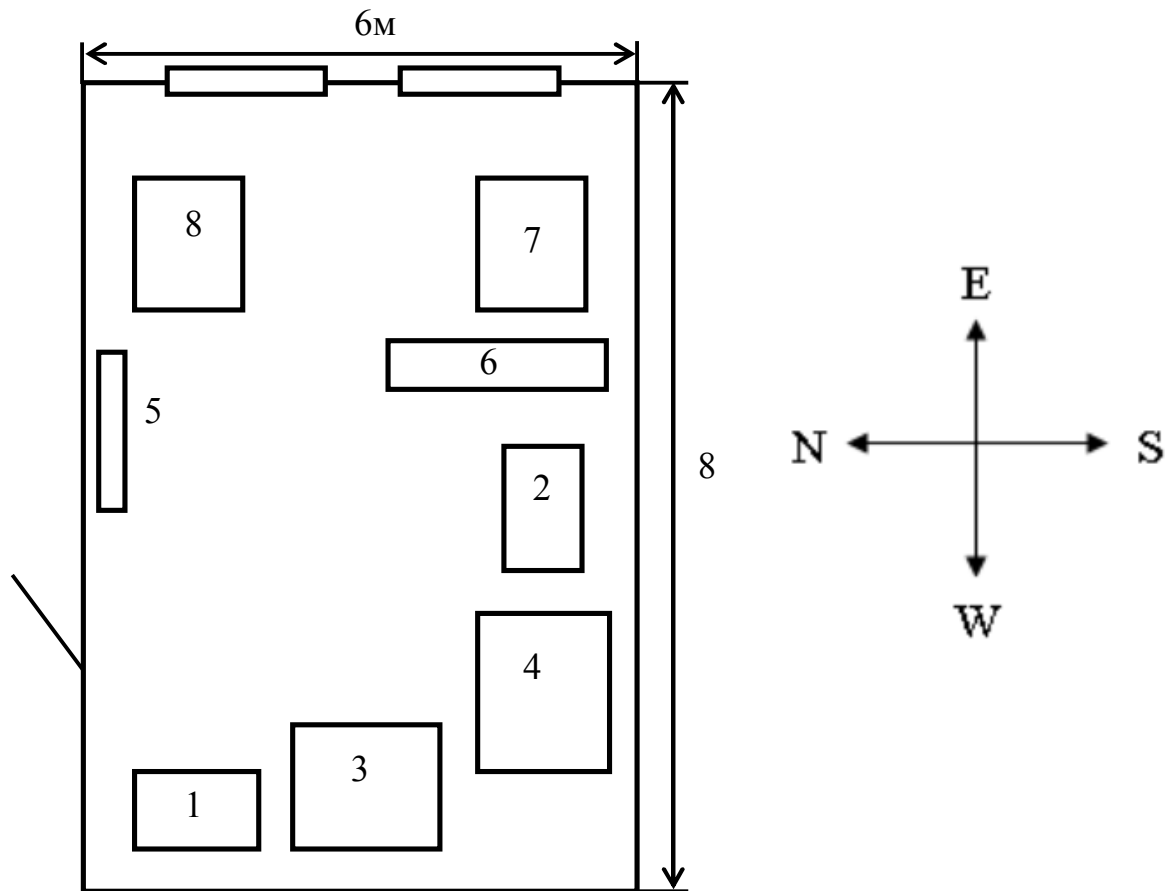


Рисунок 4.1 – Схема лабораторії в якій виконувався електронографічний аналіз

Таким чином, площа та об'єм приміщення, згідно з ДСанПІН 3.32-007-98, де на одну людину повинно припадати не менше 4,5 м² площі та 15 м³ об'єму, відповідають нормам [39].

4.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

4.2.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення

Однією з важливих умов для нормальної та комфортної праці людини є чисте повітря з оптимальною температурою, необхідною вологістю та відповідною швидкістю руху повітря. З метою забезпечення оптимального

мікроклімату у виробничих приміщеннях встановлені «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» (ДСН 3.3.6.042-99), які визначають оптимальні та допустимі параметри для температури, вологості та швидкості повітря в робочій зоні, залежно від сезону та рівня фізичних навантажень [38 – 41].

Дослідження, проведене згідно з ДСН 3.3.6.042-99 для лабораторії електронографії, відповідає категорії I б. Дана категорія передбачає легкі фізичні роботи (до 150 ккал/год), які виконуються сидячи або стоячи і можуть супроводжуватись незначним фізичним напруженням, а також роботи пов'язані з ходьбою. Результати 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.

4.2.2 Виявлення і аналіз наявності шуму та вібрації

Шум представляє собою комплекс звуків різної частоти та інтенсивності, які виникають внаслідок коливань частинок у пружному середовищі. В ході науково-дослідницької роботи, що проводилась на установці ВУП 5М, був зафіксований деякий рівень шуму.

Під впливом шуму відбувається зниження слухової чутливості, що, в свою чергу, призводить до суттєвого зниження продуктивності на робочому місці. Для ефективного контролю за шумового забруднення рекомендується здійснювати його зменшення на рівні джерела певними заходами, такими як: заміна технологічних процесів або обладнання менш шумними, використання засобів звуковбирання та звукоізоляції, екранування, оснащення шумних

машин засобами дистанційного та автоматичного управління, і використання засобів індивідуального захисту. Регулювання максимальних рівнів шуму на робочих місцях визначається стандартом ДСТУ 2867-94, що базується на класифікації приміщень за їх призначенням для трудової діяльності різних видів, встановленої згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [42].

Вібрація представляє собою механічні коливання пружних тіл чи коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація може мати негативний вплив на організм. Джерелами технологічної вібрації є різноманітне обладнання, таке як верстати, електричні машини, стаціонарні електричні установки, насосні агрегати та вентилятори, в тому числі й вакуумний пост ВУП 5М під час проведення науково-дослідницьких робіт [42].

Для зменшення впливу вібрацій на працівників та обладнання рекомендується використовувати методи віброгасіння. Це включає встановлення динамічного навантаження на вібруючі пристрої та їх розташування на окремому віброізованому фундаменті. Джерела коливань ізолюються від опорних конструкцій за допомогою гумових прокладок, пружин чи інших віброізоляторів.

4.2.3 Розрахунок і аналіз освітленості приміщення

У залежності від джерела світла, освітлення може бути:

- природним (світло розсіяне від неба або прямі сонячні промені);
- штучним (освітлення електричними пристроями);
- суміщеним (компенсація недостатньої природної освітленості штучно).

У лабораторії електронографії реалізована схема суміщеного освітлення. Протягом світлого періоду доби приміщення отримує природне освітлення через вікна. У разі нестачі природного світла для зорової роботи застосовується штучне освітлення, що відповідає нормам ДБН В.2.5-28 2006 [38, 40–42].

Неправильне, надмірне або нерівномірне освітлення у полі зору може викликати втомленість очей, що спричиняє зниження продуктивності праці. Це

також може створювати потенційні ризики виникнення помилок та нещасних випадків. Надто яскраве освітлення може призводити до порушення гостроти зору та головного болю, а відблиски від поверхонь можуть заважати роботі [38, 43, 44].

Загальне освітлення здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп ЛБ-40 (18 одиниці), розташованих на стелі приміщення, що мають номінальний світловий потік 2340 лм кожна. Для місцевого – лампи розжарювання. Природне освітлення забезпечується двома вікнами розміри яких складають: ширина – 2,8 м, висота 2,6 м.

Враховуючи ці фактори, а також можливість використання ламп ЛБ-40, за допомогою трьох вмикачів, в різних зонах кімнати (по 6 ламп в західній, східній та центральній частині кімнати) освітлення знаходиться в межах норми для середньої точності (IV розряд зорових робіт) – категорія робіт, які виконуються у приміщенні.

4.2.4 Електробезпека

Відповідно до чинних вимог щодо будівництва електричних пристроїв згідно з правилами устрою електроустановок (ПУЕ) - 2017, лабораторне приміщення відноситься до класу безпечних від електротравм, тобто до приміщень без підвищеної небезпеки [42]. Це сухе приміщення з оптимальною температурою та непровідною підлогою. Електричні пристрої, використовувані в рамках даної дослідної роботи, живляться напругою 220 В (вакуумний універсальний пост ВУП 5М) та 380 В (електронограф ЕМР–100) при частоті 50 Гц.

Можливими причинами ураження електричним струмом є:

- ушкодження ізоляції (наприклад, розплавлений метал), що призводить до доступу до струмоведучих частин обладнання;
- наявність напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки;

- невиконання або неправильне виконання вимог техніки безпеки, необережність під час роботи.

Вплив електричного струму на організм людини може призвести до небезпечних наслідків для здоров'я та навіть смерті. Під час проходження через тіло людини, струм може:

- викликати термічні ушкодження (опіки, пошкодження судин);
- мати електролітичний ефект (розкладання органічних сполук);
- впливати на біологічні процеси.

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

У лабораторії належним чином виконане захисне заземлення електроустаткування і приладів. Можливою причиною ураження електричним струмом може бути пробій на корпусі установки або пошкодження ізоляції кабелів.

4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Організація праці на робочому місці визначається системою заходів, спрямованих на ефективне використання знарядь та предметів праці під час трудового процесу [38, 40]. Робоче місце – це зона, де відбувається трудова діяльність працівників. З метою забезпечення максимальної ефективності та збереження здоров'я працівників на виробництвах, дотримуються норм організації праці на робочому місці відповідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 27.0-1.01-08.

Відповідно до цих норм вибирається оптимальна робоча поза (сидяча, стояча або вільна), і на цій основі розробляється оптимальний графік праці та відпочинку, а також організовується робочий простір. Для даної НДР обрано сидячу робочу позу, оскільки основна діяльність виконується сидячи за столом використовуючи комп'ютер [45]. Робоча зона працівника в правильній сидячій

робочій позі перед екраном та її характеристики наведена на рисунку 4.2. Робоче місце з екраном що стоїть на столі в лабораторії електронографії має наступні характеристики:

- висота столу: 700 мм;
- офісний стілець з регулюванням по висоті: 480–580 мм;
- місце для ніг: висота – 600 мм, глибина (на рівні колін) – 450 мм, глибина (на рівні стопи) – 650 мм. Передбачена підставка для ніг;
- відстань від екрана ПК до очей користувача – 600 мм;
- матовий робочий стіл та антиблікове покриття на моніторі.

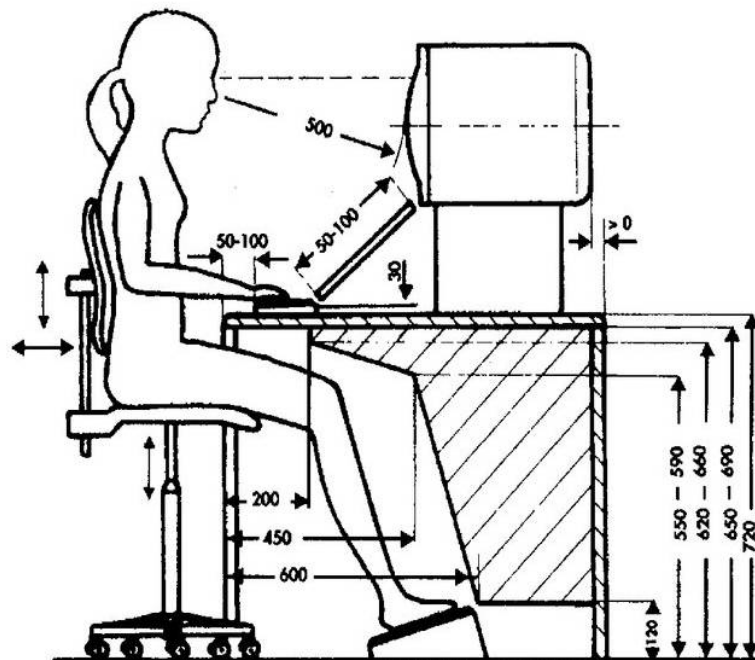


Рисунок 4.2 – Робоча зона працівника в правильній сидячій робочій позі перед екраном [46]

Організація робочих місць у лабораторії електронографії відповідає санітарним нормам і забезпечує комфортні умови для працівників. Установки ВУП 5М спеціально розташовані в іншому від робочого столу кінці приміщення щоб утворюваний шум найменше заважав процесу. Також для зменшення шумового забруднення між робочим місцем та установками розташовані шафи та стелажі. Що поглинають частину звукових коливань. У процесі роботи на установці ВУП 5М також виникає вібрація, яка може негативно впливати на робочий процес та стан здоров'я працівника. Для

захисту від вібрацій застосовуються засоби для їхнього гасіння (гумові прокладки, ізолюючі матеріали корпусу, надійне кріплення до підлоги без ковзання), що полягають в ізоляції джерел коливань та частковому поглинанні вібрацій. Пружинні, гумові чи комбіновані ізолятори виступають в ролі таких заходів.

4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До різновидів потенційної небезпеки на виробництві відносяться: пожежа; вибух (всередині обладнання, в будівлях або навколишньому середовищі); розрив або руйнування обладнання; викид шкідливих речовин; а також можливі поєднання цих видів небезпеки [47, 48].

Для уникнення та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві слід розробляти план локалізації та ліквідації аварій відповідно до встановлених положень [49]. В ході аналізу ризиків підприємства (об'єкта) важливо визначити всі можливі аварійні ситуації, включаючи ті, що малоімовірні, але можуть мати катастрофічні наслідки. Розглянуті сценарії розвитку подій слід оцінити наслідки. Виявлення можливих умов та факторів аварій має базуватися на аналізі роботи як окремого обладнання (апаратів, машин, тощо), так і їх групи (технологічних блоків). При цьому враховуються небезпечні властивості використовуваних речовин і матеріалів (зокрема, вибухонебезпечних, пожежонебезпечних та шкідливих). Важливим є врахування параметрів стану речовин (температура, тиск, агрегатний стан тощо) і стану обладнання як при нормальному технологічному режимі, так і в умовах, які можливі під час аварій.

4.4.1 Пожежна безпека

Згідно з вимогами НАПБ Б.07.005-86, лабораторія з пожежної безпеки віднесена до категорії В через наявність твердих та важкогорючих матеріалів, і не достатньо підстав відносити її до категорій А чи Б [50–52].

У випадку виникнення пожежі у лабораторії може спалахнути:

- електроустановки та їхній провідник;
- паркет і штори;
- шафи та паперові документи, які розташовані всередині.

Можливі причини виникнення пожежі в лабораторії включають:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електрообладнання;
- недбале поводження з вогнем;
- проведення ремонтних робіт на обладнанні під час його роботи;
- неправильне користування обладнанням.

У випадку виникнення пожежі в лабораторії доступні засоби для гасіння, такі як водопровід, вогнегасник вуглекислотний ОУБ-3, а також на сходових клітках та в коридорах розташовані шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б і пожежні крани. Також приміщення оснащено автоматичною пожежною сигналізацією комбінованого типу (оповісник КИ-1). Кожен поверх корпусу має план евакуації (див. рисунок 4.3).

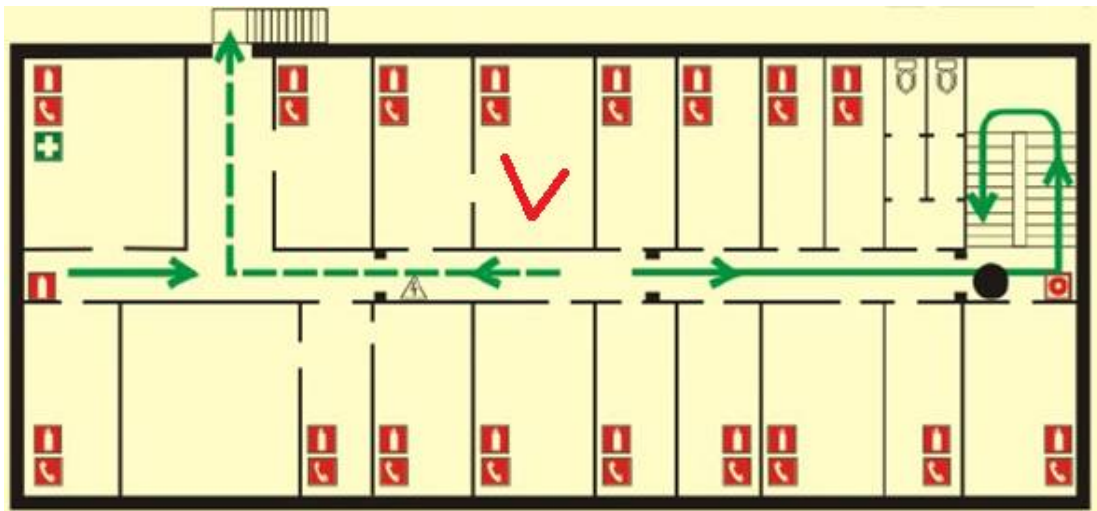


Рисунок 4.3 – План евакуації під час пожежі

4.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус будь якого з приладів слід відключити рубильник і повідомити інженера відповідального за обладнання та або керівника відділу.

Якщо людина потрапила під напругу, необхідно відключити прилад від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, при необхідності, здійснити штучне дихання.

У випадку загорання приладу треба відключити рубильник і негайно розпочати гасіння пожежі, використовуючи вогнегасник.

Будь-який працівник чи службовець, який виявив пожежу або загорання, повинен:

1. Негайно повідомити служби з надзвичайних ситуацій за телефоном 101;
2. Розпочати гасіння вогню з використанням наявних засобів пожежогасіння у відділі, таких як вогнегасник, пісок, пожежний кран чи водопровід.
3. Викликати відповідальних та посадових осіб (голову відділу, відповідального за техніку безпеки чи головного інженера) на місце події.

4.5 Висновок до розділу 5

Проведено аналіз параметрів робочого приміщення, таких як мікроклімат, склад повітря робочої зони, шум, вібрація, а також електрична та пожежна безпека. Усі виміряні значення знаходяться в межах допустимих норм.

Установлено, що при дотриманні санітарних норм та правил безпеки у приміщенні для проведення дослідження не виявлено порушень правил та заходів охорони праці.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ

5.1 Опис ідеї проєкту

Загальний опис ідеї проєкту поданий у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея полягає у використанні плівкових технологій FePt для поліпшення характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису для малогабаритних гаджетів	1. Виробництво пристроїв магнітного запису. 2. Проєктування комп'ютерних систем. 3. Розробка пристроїв інтернету речей.	1. Висока щільність запису; висока стабільність даних 2. Підвищена продуктивність; низька витрата енергії 3. Маленькі розміри та вага пристрою запису; висока стабільність даних

Використання плівкових технологій FePt відрізняється великою щільністю запису, високою стійкістю даних, енергоефективністю, компактним розміром та низькою вагою. Властивості, такі як висока магнітна анізотропія, роблять цей матеріал привабливим для виробництва пристроїв магнітного запису, проєктування комп'ютерних систем та розробки пристроїв Інтернету речей. Порівняно з аналогами, FePt може забезпечити велику ефективність та надійність даних.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів наведений у формі таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Продукція конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	SanDisk	Transcend	Toshiba			
1.	Цінова конкурентоспроможність	Рівноцінна	Стандартна, ринкова	Стандартна, ринкова	Стандартна, ринкова		+	
	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Дещо дешевша	Стандартна	Стандартна	Стандартна	+		
	Розмір магнітного домену	Менший	Більший	Більший	Більший		+	
	Шорсткість поверхні	Висока	Стандартна	Стандартна	Стандартна			+
	Інноваційність	Новітня технологія що розвивається	Сучасний стандарт	Сучасний стандарт	Сучасний стандарт	+		

5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Проведений аналіз технологічної здійсненості ідеї проєкту передбачає що показано в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Використання плівкових технологій FePt для поліпшення характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису для малогабаритних гаджетів	Поздовжній запис	Технологія наявна, але застаріла. Щільність запису за допомогою поздовжнього методу має межу 40 Гбіт/см ²	Доступна
		Перпендикулярний запис	Технологія наявна, але застаріла. Щільність запису за допомогою перпендикулярного методу має межу 60 Гбіт/см ²	Доступна
		Термічно активований запис	Технологія наявна, але не широко впроваджена. Щільність запису за допомогою цього методу оцінюються в десять терабіт на квадратний дюйм	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Термічно активований запис				

Перспективи термічно активованого запису полягають у поліпшенні щільності запису на магнітних носіях за допомогою використання тепла для зміни магнітних властивостей. Ця технологія дозволяє подолати традиційні обмеження і забезпечити величезне збільшення обсягу зберігання на жорстких дисках. Термічно активований запис є перспективним напрямком розвитку в області магнітного запису, спрямованим на забезпечення високої щільності даних та покращеної продуктивності.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

У таблиці 5.4 наведено результати проведеного аналізу попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Виробництвом технологічних жорстких дисків зараз займаються чотири компанії: 1) Western Digital; 2) Seagate Technology; 3) Toshiba; 4) Samsung Electronics.
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	407 млн. од. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільно зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Мінімальна ємність жорсткого диску.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	(10– 15) %

На підставі попереднього оцінювання, можна сказати, що на перший погляд, ринок може бути привабливим з огляду на постійний розвиток технологій зберігання даних та зростаючу потребу у великому обсязі даних. Проте, важливо ретельно дослідити кожний сегмент ринку, його тенденції та особливості, щоб зрозуміти його привабливість для входження та успішного конкурування.

У таблиці 5.5 визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба в поліпшенні характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису	Виробництво пристроїв магнітного запису.	Пріоритетні: висока щільність запису; висока стабільність даних	Усі споживачі будуть ставити вимоги до високої ємності і швидкості запису/читання; надійності і довговічності; сумісності та легкості інтеграції а також економічності при покупці та експлуатації
		Проектування комп'ютерних систем.	Підвищена продуктивність; низька витрата енергії	
		Розробка пристроїв інтернету речей.	Пріоритетні: маленькі розміри та вага пристрою запису; висока стабільність даних	

Після визначення потенційних клієнтів проведений аналіз ринкового середовища що складаються з таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 5.6 та 5.7).

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність економіки та фінансів виробництва	Зменшення інвестицій та попиту	Пошук інвесторів, державне фінансування, нові стратегії маркетингу
		Зменшення енергетичних та сировинних ресурсів,	Пошук та заміна нових партнерів для отримання матеріалів та послуг. Розгляд

		ріст цін на вихідні послуги та матеріали	можливостей заміни сировини на доступнішу.
--	--	--	--

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Співпраця та використання виробничих потужностей компаній які не конкурентні або вийшли з ринку	Швидкий старт впровадження технології на основі великих виробничих потужностей	Збільшення обсягів продаж.
2	Лише 4 потенційні компанії з конкурентною продукцією	Не велика конкуренція по світу, можливість вигідних контрактів з брендами гаджетів	Агресивніший маркетинг та збільшення обсягу виробництва

У таблиці 5.8 наведений ступеневий аналізу конкуренції на ринку пристроїв магнітного запису.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції ☐ чиста	Основні конкуренти: 1) Western Digital; 2) Seagate Technology; 3) Toshiba; 4) Samsung Electronics.	Акцент на проривних технологіях щоб бути помітним серед конкурентів
2. За рівнем конкурентної боротьби	Лідер на світовому ринку Samsung Electronics станом на	Адаптація до національних потреб. Підписання

☐ національний	2020р.	контрактів на дистриб'юцію
---------------------------------------	--------	----------------------------

Продовження таблиці 5.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
3. За галузевою ознакою ☐ внутрішньогалузева	Основна галузь – виробництво магнітних дисків запису	Акцентування уваги на поліпшенні виробничих процесів, впровадженні новаторських рішень і оптимізації витрат виробництва.
4. Конкуренція за видами товарів: ☐ товарно-видова	Конкуренція відбувається між різними видами одного і того ж роду товарів, що мають різні технічні характеристики, якості, функціональні особливості тощо.	Фокусування на проривних технічних характеристиках та інноваціях
5. За інтенсивністю ☐ марочна	Присутня фіксація на конкретних брендах	Правильні акценти на маркетингу та створенні іміджу бренду для впізнаваності

Ідея використання плівкових технологій FePt для поліпшення характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису, враховуючи конкурентну ситуацію має перспективи на ринку. Для успіху важливо, щоб проєкт ставив акценти у виробництві та маркетингу на свою технологічну інноваційність, забезпечував ефективні витрати ресурсів, розвивав міжнаціональне партнерство, та гарантував високу якість виготовлених.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фак ☐
---	--------	--

п/п	конкурентоспроможності	тор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Інноваційність	Висока технологічна інноваційність відкриває перспективи для виготовлення надсучасних пристроїв магнітного запису

Продовження таблиці 5.9

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
2	Технічні характеристики	Щільність запису за допомогою цієї технології приблизно в десять разів більша ніж у попереднього покоління
3	Ефективне партнерство	Пропозиції партнерства до компаній з вже наявною виробничою базою

За визначеними факторами конкурентоспроможності (таблиця 5.9) проведений аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1–20	Рейтинг товарів конкурентів у порівнянні з проєктом						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Інноваційність	16			+				
2	Технічні характеристики	17		+					
3	Ефективне партнерство	12				+			

В таблиці 5.11 представлено SWOT- аналіз сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз стартап проєкту.

Таблиця 5.11 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Кращі технічні характеристики: - низька температура формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt; - менша коерцитивна сила.	Слабкі сторони: - необхідність впроваджень технології та подальші дослідження; - відсутність впізнаваності бренду
---	--

Можливості: - низький рівень конкуренції серед високотехнологічних компаній - використання компаній з наявною виробничою базою	Загрози: - розробка перспективних технологій у відомих брендів; - слабка зацікавленість в новій технології
---	---

5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Необхідно визначити стратегії охоплення ринку для розробки ринкової стратегії, що передбачає опис цільових груп споживачів, який відображається у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробництва пристроїв магнітного запису.	Важке сприйняття інновацій через напрацьовані схеми виробництва	Наявний попит на технології з кращими характеристиками	Конкуренція у вигляді більш старих але добре вивчених технологій магнітного запису	Складніше середньої
2	Компанії, що розробляють компактні пристрої інтернету речей.	Можуть сприйняти продукт при правильній подачі	Наявний попит на інноваційні технології з кращою компактністю	Конкуренція у вигляді більш старих але добре вивчених технологій магнітного запису	Середня
Які цільові групи обрано: Компанії, що розробляють пристрої інтернету речей та компактні прилади з потребою у зберігання даних.					

Стратегія розвитку компанії базується на стійкому та поступовому розширенні глибини взаємодії з цільовою аудиторією, відповідно до обраного

концепту концентрованого маркетингу. Це включає не лише вдосконалення наявних продуктів, але й активний розвиток нових продуктів та послуг, які спеціально адаптовані до унікальних потреб та очікувань цільового сегмента. Особливий акцент буде приділено підтримці та розвитку власного бренду з метою зміцнення лояльності серед цільових клієнтів.

У таблиці 5.13 було розглянуто стратегію конкурентної поведінки. Цей етап має визначити як компанія взаємодіятиме з іншими конкурентами на ринку та як буде реагувати на тиск.

Таблиця 5.13 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так, технологія ще не впроваджена в масове виробництво	Компанія буде шукати нових споживачів та спонукати їх до вибору нашої технології шляхом грамотного маркетингу	Компанія буде виробляти свій унікальний продукт	Обрана стратегія диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача унікальних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів.

Наразі ще тривають дослідження, що стосуються впливу підкладок та газових середовищ відпалу на процеси формування впорядкованої фази, тому надати повну оцінку ринкової придатності та маркетингової програми цього продукту досить складно. Сплав FePt з впорядкованою структурою L1₀

вважається перспективним матеріалом для використання в системах надщільного магнітного запису. Проте, дослідження його властивостей ще не завершені, і в даний момент використовується в основному для наукових експериментів.

5.5 Висновки до розділу 5

Проаналізовано ринкові можливості стартап-проєкту "Використання плівкових технологій FePt для поліпшення характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису для малогабаритних гаджетів". Після досконального вивчення, запровадження цієї технології в виробництво носіїв інформації призведе до збільшення щільності запису, що в свою чергу позитивно впливає на попит на продукцію та обумовить потребу у відповідних інвестиціях та зацікавленості в новій технології.

Виявлено, що проєкт є перспективним, на основі аналізу потреб та вимог потенційних клієнтів. Вдале подолання бар'єрів для входження на ринок обумовлено технологічною перевагою та здатністю ефективно задовольняти потреби клієнтів. Доцільність подальшого втілення підтверджена аналізом ринкових умов, конкурентоспроможності та потенційного попиту. Проєкт проявив життєздатність та адаптованим до вимог ринкового середовища, що створює міцну основу для стабільної та прибуткової діяльності на ринку у майбутньому.

ВИСНОВКИ

Визначено, що тонкоплівкові матеріали на основі еквіатомного сплаву FePt з впорядкованою структурою $L1_0$ є перспективним матеріалом для використання в якості середовища магнітного запису наступного покоління з підвищеною щільністю, завдяки їх високим значенням магнітної анізотропії, коерцитивної сили та намагніченості насичення.

Підібрано та використано низку сучасних методів фізичного матеріалознавства для створення та дослідження властивостей.

Виявлено, що під час термічної обробки у атмосфері водню в інтервалі температур 300 °C – 700 °C збільшення товщини плівки до 10 нм призводить до зменшення температури впорядкування на 100 °C (до 400 °C).

Встановлено, що при підвищенні температури відпалу до 700 °C у плівках FePt збільшується об'ємна доля зерен фази $L1_0$ FePt з віссю легкого намагнічування с перпендикулярній плівці.

Методами Раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання та феромагнітного резонансу підтверджено наявність двофазного стану ($A1+L1_0$) у плівках FePt після відпалу в інтервалі температур 500 °C – 700 °C у середовищі водню.

Проведено аналіз робочої лабораторії, а саме, чинників, які мають вплив на безпеку та працездатність людини (мікроклімат, освітленість, шум, вібрації, електрична та пожежна безпеки). Усі досліджувані показники знаходяться в межах допустимих норм згідно сучасних стандартів з охорони праці.

Виявлено, що проєкт «Використання плівкових технологій FePt для поліпшення характеристик зберігання і обробки даних у пристроях магнітного запису для малогабаритних гаджетів» є перспективним, на основі аналізу потреб та вимог потенційних клієнтів. Вдале подолання бар'єрів для входження на ринок обумовлено технологічною перевагою, інноваційністю продуктів та здатністю ефективно задовольняти потреби клієнтів.

CONCLUSIONS

It was determined that thin-film materials based on the equiatomic FePt alloy with an ordered $L1_0$ structure are a promising material for use as a next-generation magnetic recording medium with increased density, due to their high values of magnetic anisotropy, coercivity, and saturation magnetization.

A number of modern methods of physical materials science have been selected and used for the creation and investigation of properties.

It was found that during heat treatment in a hydrogen atmosphere in the temperature range of 300 °C – 700 °C, an increase in the film thickness to 10 nm leads to a decrease in the ordering temperature by 100 °C (to 400 °C).

It was established that when the annealing temperature is increased to 700 °C in FePt films, the volume fraction of grains of the $L1_0$ FePt phase with the c -axis of easy magnetization perpendicular to the film increases.

The presence of a two-phase state ($A1+L1_0$) in FePt films after annealing in the temperature range of 500 °C – 700 °C in a hydrogen environment was confirmed by Raman spectroscopy and ferromagnetic resonance methods.

An analysis of the working laboratory was carried out, namely, factors that have an impact on human safety and performance (microclimate, lighting, noise, vibrations, electrical and fire safety). All the studied indicators are within the limits of permissible norms according to modern labor protection standards.

It was found that the project "Using FePt film technologies to improve the characteristics of data storage and processing in magnetic recording devices for small-sized gadgets" is promising, based on the analysis of the needs and requirements of potential customers. Successfully overcoming barriers to market entry is due to technological advantage, product innovation and the ability to effectively meet customer needs.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методи запису на HDD: відмінності SMR від стандартних PMR/CMR [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/oplec> Дата звернення: 24.10.2023
2. Архітектура комп'ютерів Магнітне зберігання даних [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://archcom.ptngu.com/10.html> Дата звернення: 20.10.2023
3. Перспективні матеріали [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/2851341/page:25/> Дата звернення: 24.10.2023
4. Superparamagnetism Encyclopedia, Science News & Research Reviews [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://academic-accelerator.com/encyclopedia/superparamagnetism> Дата звернення: 21.10. 2023
5. On low-temperature ordering of FePt films / A. Hafarov, O. Prokopenko, S. Sidorenko [et al.] // Scripta Materialia / Volume 53, Issue 4. – 2005. – P. 403–409.
6. Намагнічування феромагнітних матеріалів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/326/210.html> Дата звернення: 22.10. 2023
7. Подгорная Е.А. Современные методы магнитной записи сигналов: Учебное пособие. / Е.А. Подгорная –СПб.: изд. СПбГУККиТ, 2010. 64с., 19 илл.
8. Як працює жорсткий диск (HDD): пристрій і принцип роботи жорсткого диска в 6 розділах [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/opldv> Дата звернення: 29.10. 2023
9. Varaprasad B. L1(0)-Ordered FePt-Based Perpendicular Magnetic Recording Media for Heat-Assisted Magnetic Recording / B. Varaprasad, M. Chen, Y. Takahashi, K. Hono // IEEE Transactions on Magnetics E, – 2013 – Vol. 49. – P. 718-722.

10. Лебедь О. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ / О. Лебедь, В. Ф. Орленко, О. Д. Кочергіна // Рівне : навчальний посібник. – 2013. – 132 с.
11. Платина [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B0> Дата звернення: 24.10.2024
12. Залізо модифікації [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу: <https://chem21.info/info/132774/>. Дата звернення 26.10.2024
13. Єлліот Р. П. Структура подвійних сплавів / Р. П. Єлліот. – М.:Металлургия, 1970. – с.498.
14. Магнитные материалы и элементы / М. В. Преображенский, В. Г. Бишард– М.:Металлургия, 1986. – 481с.
15. Entel P. First-principles investigations of multimetallic transition metal clusters / P. Entel, M. Gruner, G. Rollmann, F. Hucht, S. Sahoo, A. Zayak, H. Herper, A. Dannenberg // Philosophical Magazine ER, 2008. –Vol. 88. – P. 2725-2738.
16. Yu G. Pressure-induced two magnetic collapses in the ferromagnetic L_{12} -Fe₃Pd alloy and related elasticity and lattice dynamics anomalies / G. Yu, T. Cheng, X. Zhang, W. Gong // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2021. – Vol. 538. – P. 168322.
17. Mokhtari P. Microstructure and Magnetic Properties of FePt Thin Films on SiO₂/Si (100) and Si Substrates Prepared Under External Magnetic Field / P. Mokhtari, P. Kameli, M. Ehsani, A. Esmaeily, H. Kalhori, H. Salamati // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism ER, – 2017. – Vol. 30. – P. 7.
18. Wang Hao. FePt based advanced magnetic recording media. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy // University of Minnesota Ph.D. dissertation, – 2013. – P. 166.
19. Shima T. Coercivity exceeding 100kOe in epitaxially grown FePt sputtered films / T. Shima, K. Takanashi, Y. Takahashi, H. - C. - e. in f. sputtere // Applied Physics Letters JA - Appl. Phys. Lett., – 2004. – Vol. 85. – P. 2571-2573.

20. Effects of Cr underlayer and Pt buffer layer on the interfacial structure and magnetic characteristics of sputtered FePt films / An-Cheng Sun, Jen-Hwa Hsu, H.L. Huang, P.C. Kuo // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2006. – 304. – P.106-110.
21. Фазова діаграма системи Fe-H [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ispatguru.com/hydrogen-in-steels/>
22. Maaß R. Influence of hydrogen on the growth of FePt thin films / R. Maaß, M. Weisheit, S. Fahler, L. Schultz // Journal of Applied Physics ER, – 2006. – Vol. 100. – P. 7.
23. Осадження тонкої плівки. Принципи та застосування технології магнетронного розпилення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.accscicn.com/en/solutions/nanofabrication/what-is-magnetron-sputtering/>
24. Wicher B. Surface sintering of tungsten powder targets designed by electromagnetic discharge: A novel approach for film synthesis in magnetron sputtering / B. Wicher, K. Zdunek, R. Chodun, I. Haj K. // Materials & Design, – 2020. – Vol. 191. – P. 108634.
25. Рентгенівська дифракція (XRD) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/>
26. 16 - Zinc-Oxide based EGFET pH sensors / P. Sharma, R. Sharma, R. Mukhiya, K. Awasthi, M. Kumar, K. Awasthi, Z. Nanostructured E. // – 2021. – P. 459-481.
27. Electron diffraction [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/>
28. ЕЛЕКТРОНОГРАФІЯ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://leksika.com.ua/14060704/ure/elektronografiya>
29. Кожура В. С. Термічне окиснення тонких шарів вакуумно осажденного хрому // Магістерська дисертація. –2018. – С. 1–74.

30. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТВЕРДИХ ТІЛ / В. В. Ожерельєв, А. В. Костюченко, С. В. Каннікин, А. І. Донцов // Навчальний посібник. –2021. – с. 1–101.
31. Meier Thomas Ferromagnetische Resonanz (FMR) / Thomas Meier // Physik-Department Technische Universität München. –2020. – P. 1–28.
32. Ferromagnetic Resonance (FMR) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/ouzwaa>
33. Raman Microspectroscopic Imaging of Binder Remnants in Historical Mortars Reveals Processing Conditions / T. Schmid, P. Dariz, M. Raman R. Binder R. Mortars //, – 2019. – Vol. 2. – P. 1662-1683.
34. Zhao X. Raman Spectroscopy Application in Anisotropic 2D Materials / X. Zhao, Z. Li, S. Wu, M. Lu, X. Xie, Da Zhan, J. Yan // Advanced Electronic Materials ER, – 2023. – P. 1–8.
35. Synetos A. Chapter 3.5.2 – Invasive Imaging Techniques / A. Synetos, D. Tousoulis, D. Tousoulis, A. Coronary A. - 3. - PY 376 - DA 9. //, – 2018. – P. 359–376.
36. Ferromagnetic Resonance in FePt Thin Films at Elevated Temperatures / C. Liu, K. Srinivasan, A. Ajan, E. McCollum, A. Kalitsov, V. Kalappattil, M. Wu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials ER, – 2022. – Vol. 563. – P. 169988.
37. Ferromagnetic Resonance - Theory and Applications / Y. Orha //, – 2013. – P. 25–78.
38. Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний та ін. // За ред. О.Г. Левченка. – К.: Основа, 2021. – 25 с.
39. Документація. Будинки і споруди. Інклюзивність будівель і споруд [Текст] : ДБН В.2.2-40:2018. – [Чинний від 01.07.2019]. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, 2018. – 68 с.
40. 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.
41. Закон України «Про охорону праці» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст.668

42. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Текст] : ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 01.12.1999]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 34 с.

43. Вібрація та захист від неї [Електронний доступ] – Режим доступу до ресурсу <https://www.diagram.com.ua/info/ohrana/ohrana-truda187.shtml>.

44. Документація. Інженерне обладнання будинків і споруд. ПРИРОДНЕ І ШТУЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ [Текст] : ДБН В.2.5.28-2006. – [Чинний від 15.05.2006]. – Київ : Мінбуд, 2006. – 78 с.

45. Документація. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до компонування робочого місця та до робочої пози [Текст] : ДСТУ ISO 9241-5:2004. – [Чинний від 28.10.2004]. – Київ : Держспоживстандарт, 2004. – 34 с.

46. Безпека життєдіяльності людини / В.М. Лапін // Навчальний посібник. – 6-те вид., перероб. і доп. – К.:Знання, 2007, – 332 с.

47. Документація. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій [Текст] : ДНАОП 0.00-4.33-99. – [Чинний від 17.06.1999]. – Київ : Міністерство юстиції, 1999. – 30 с.

48. Документація. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги [Текст] : ДСТУ 3273-95. – [Чинний від 01.07.1996]. – Київ: Держспоживстандарт, 1995. – 7 с.

49. Документація. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за пожежною небезпекою [Текст] : НАПБ Б.03.002-2007. – [Чинний від 03.12.2007]. – Київ : МНС України, 2007. – 28 с.

50. Документація. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [Чинний від 01.01.2017]. – Київ : УкрНДІЦЗ, 2016. – 34 с.

51. Документація. Системи протипожежного захисту. Зміна № 1 [Текст] : ДБН В.2.5-56:2014. – [Чинний від 01.11.2019]. – Київ : ПП «НТЦ УСВППП», 2018. – 27 с.

52. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с