

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ МЕТАЛІВ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
_____ Є.В. Іващенко
(підпис)
“ ___ ” _____ 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 132 – Матеріалознавство**

на тему: «Дифузійне формування структури і фазового складу в плівкових композиціях Pt/Tb/Fe»

Виконав

студент VI курсу, групи ФМ-61м

Пефті Дмитро Володимирович _____

Керівник:

асистент КФМ, к.т.н., Владимирський І.А. _____

Консультант з нормоконтролю:

асистент К ФМ, Шаповалова Н.А. _____

Консультант з охорони праці:

доцент, к.т.н., Зацарний В.В. _____

Рецензент:

асистент ФХОТМ, к.т.н., Ворон М.М. _____

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

Київ – 2018 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 132 «Матеріалознавство» (Фізичне
матеріалознавство)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Є.В. Іващенко

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Пефті Дмитру Володимировичу

1. Тема дисертації «Дифузійне формування структури і фазового складу в плівкових композиціях Pt/Tb/Fe», науковий керівник дисертації Владимирський І.А. к.т.н., затверджені наказом по університету від «22»березня 2018 р. № 994-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) осаджені на підкладинки термічно окисленого монокристалічного Si(001).

4. Предмет дослідження: формування структури і фазового складу в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Tb/Fe при їх термічній обробці у вакуумі в широкому інтервалі температур.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1) провести термічну обробку у вакуумі нанорозмірних плівкових композицій Pt/Tb/Fe при різних температурах;

2) визначити температурні інтервали фазових переходів шляхом аналізу перегинів на температурній залежності електричного опору досліджуваних плівкових композицій;

3) виявити закономірності дифузійного фазоутворення при термічній обробці у вакуумі в широкому інтервалі температур, використовуючи методи рентгеноструктурного фазового аналізу та мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Тема роботи (слайд); актуальність роботи (слайди); мета роботи (слайд); методи дослідження (слайд); результати (слайди); висновки (слайд).

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття: Пефті Д.В. Вплив типу монокристалічної підкладинки і введення проміжних шарів Ag та Au на формування структури і фазового складу тонких плівок Pt/Fe / Д.В. Пефті, М.М. Ворон, І.А. Владимирський // Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства. – 2016. – №25. – С. 163–171.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Шаповалова Н. А., ас		
ОП та безпека в НС	Зацарний В. В., доц.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

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

Студент

Д.В. Пефті

Науковий керівник дисертації

І.А. Владимирський

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 73 сторінки, 11 таблиць, 17 рисунків, 51 літературне джерело.

ВІДПАЛ, ДИФУЗИЯ, ІНТЕРМЕТАЛІД, ПОВЕРХНЕВИЙ ЕЛЕКТРООПІР, СТРУКТУРА, ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ, ФАЗА.

Об'єкт досліджень: нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) осаджені методом магнетронного розпорошення на підкладинки термічно окисленого монокристалічного Si(001).

Мета роботи: дослідження закономірностей дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) при їх термічній обробці у вакуумі.

Методи досліджень: резистометричний аналіз (чотирьохзондовий метод) *in situ* при відпалі у вакуумі, рентгеноструктурний фазовий аналіз, мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток.

Результати досліджень та їх новизна: при відпалі до температури 280 °С перебіг процесів взаємної дифузії обумовлює формування хімічно неупорядкованої фази $A1$ -FePt з вихідних шарів окремих компонентів Fe та Pt. Подальше підвищення температури термічної обробки приводить до ініціалізації процесу впорядкування і утворення хімічно впорядкованої фази $L1_0$ -FePt вже при 500 °С. Показано, що в температурному інтервалі 215 °С – 500 °С в структурі плівкової композиції Pt/Tb/Fe існує проміжна інтерметалідна фаза Pt₂Tb. При відпалі у вакуумі за температури 280 °С тербій дифундує у напрямку поверхні плівкового композиції, а при подальшій термічній обробці до 400 °С окислюється з утворенням оксиду TbO₂.

Сфера застосування: матеріал для надщільного магнітного запису.

ABSTRACT

Master dissertation: 73 pages, 11 tables, 17 figures, 51 references.

ANNEALING, DIFFUSION, INTERMETALLIC, SURFACE RESISTIVITY, STRUCTURE, THIN FILM COMPOSITION, PHASE.

The object of research: Pt(15 nm)/Tb(10 nm)/Fe(15 nm) film compositions were deposited on a SiO₂(100 nm)/Si(001) monocrystalline substrates

The purpose of research: Study the diffusion phase formation patterns of thin film compositions Pt(15 nm)/Tb(10 nm)/Fe(15 nm) after thermally treated in vacuum.

Research methods: Electrical resistivity measurements (four-probe method) in situ while annealing in vacuum, X-ray diffraction analysis, secondary neutral mass spectrometry.

Research results and novelty: it was determined that annealing to the temperature of 280 °C contributes to the processes of mutual diffusion cause the formation of a chemically disordered phase *A1*-FePt from the initial layers of the individual components of Fe and Pt. A further temperature increasing lead to the initialization of the ordering process and the chemically ordered phase *L1₀*-FePt formation at 500 °C already. In the temperature range of 215 °C to 500 °C in the structure of Pt/Tb/Fe film composition there is Pt₂Tb intermetal phase. At annealing in a vacuum at 280 °C temperature the terbium moving to the surface of the film composition direction, and at further heat treatment to 400 °C TbO₂ oxide is formed.

Field of application: ultrahigh density magnetic recording medium.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Формування фазового складу в двокомпонентній системі Fe-Pt.....	12
1.2 Особливості тонких плівок FePt як перспективного матеріалу для надщільного магнітного запису.....	14
1.3 Фактори, що впливають на структуру тонких плівок на основі FePt.....	15
1.4 Висновки до розділу 1	18
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	19
2.1 Метод магнетронного розпорощення	19
2.2 Профілометричний аналіз	20
2.3 Фізико-технологічні параметри термічної обробки.....	21
2.4 Методи дослідження.....	22
2.4.1 Резистометричний аналіз.....	22
2.4.2 Рентгеноструктурний аналіз	24
2.4.3 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток.....	25
2.5 Висновки до розділу 2	27
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	29
3.1 Фазовий склад і кристалічна структура плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO ₂ після осадження і термічної обробки у вакуумі	29
3.2 Особливості розподілу елементів по товщині плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO ₂ після осадження і термічної обробки у вакуумі	32
3.3 Температурна залежність поверхневого електричного опору плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO ₂	35
3.4 Висновки до розділу 3	38

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ	39
4.1 Мета розділу	39
4.2 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату в приміщенні.....	40
4.3 Аналіз освітлення приміщення лабораторії.....	41
4.3.1 Розрахунок природного освітлення.....	42
4.3.2 Розрахунок штучного освітлення	45
4.4 Виробничі випромінювання	47
4.4.1 Випромінювання від рентгенівського дифрактометра.....	47
4.4.2 Випромінювання від ЕОМ	48
4.5 Виявлення і аналіз наявності шуму, вібрації, інфра - та ультразвуку..	48
4.6 Електричний струм	48
4.7 Забезпечення безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям.....	52
4.8 Висновки до розділу 4	54
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	55
5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	55
5.2 Висновки до розділу 5:	63
ВИСНОВКИ.....	64
CONCLUSIONS	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТОК А.....	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГЦК – гранецентрована кубічна гратка

ГЦТ – гранецентрована тетрагональна гратка

ВУП – вакуумний універсальний пост

МСВІ – мас-спектрометрії вторинних іонів

МСВН – мас-спектрометрія вторинних нейтральних частинок

НДР – науково-дослідна робота

КПО – коефіцієнт природного освітлення

ЕОМ –електронно-обчислювальна техніка

РЕА – радіоелектронної апаратури

HDD (hard disk drive) – жорсткий диск

SSD (solid-state drive) – твердотільний накопичувач

ВСТУП

Сучасний світ майже неможливо уявити без комп'ютерних технологій. З розвитком науки та техніки зростають і потреби людства в інформаційно-цифровій сфері, що в свою чергу висуває все більші вимоги до новітніх пристроїв.

Однією з основних складових сучасного комп'ютера є магнітний носій інформації – жорсткий диск. Для збільшення щільності магнітного запису необхідне вдосконалення існуючих та створення нових матеріалів для магнітного запису. Окрім того, ці матеріали повинні володіти високою термічною та часовою стабільністю зберігання даних при досить великій щільності запису та можливості швидкого доступу до інформації. Таким чином, дослідження матеріалів, що могли б задовольнити ці вимоги, є актуальною задачею сучасного фізичного матеріалознавства.

Саме це обумовлює актуальність в дослідженнях нанорозмірних плівкових композицій на основі Fe/Pt. Цей матеріал може мати в своїй структурі хімічно впорядковану фазу $L1_0$ -FePt, яка володіє високими значеннями магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили. Ці параметри дозволяють навіть при екстремально малих зернах забезпечити достатньо великий енергетичний бар'єр, при перевищенні якого може відбуватись самовільне перемагнічування матеріалу носія, що забезпечує його термічну стабільність.

Однак при осадженні плівкового матеріалу FePt за кімнатної температури в його структурі формується магнітно-м'яка фаза $A1$ -FePt, що не володіє властивостями, які могли б задовольнити сучасні потреби, що висуваються до матеріалів надщільного магнітного запису. Для утворення магнітно-твердої фази $L1_0$ -FePt необхідне проведення термічного відпалу плівки або осадження її на нагріту підкладку, що ускладнює практичне застосування матеріалу і обумовлює зменшення потенційно можливої щільності магнітного запису через збільшення розміру зерен впорядкованої фази при підвищених температурах.

Таким чином, актуальною задачею сучасного фізичного матеріалознавства є зменшення температури формування хімічно впорядкованої фази $L1_0$ -FePt та стримування росту зерен даної фази.

Передбачається, що введення проміжних шарів легуючих елементів (Cu, Ag, Au, Tb) може сприяти зниженню температури фазового переходу (за рахунок пришвидшення дифузійних процесів, що пов'язане з невідповідністю параметрів кристалічної ґратки та термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів і виникненням відповідних механічних напружень) та перешкоджати росту зерен (нерозчинні в кристалічній решітці фази $L1_0$ -FePt елементи дифундують по границях зерен та затримують процеси дифузійного зростання зерен).

Однак процеси структуро- та фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях на основі Fe/Pt з додатковими шарами легуючих елементів не можна вважати дослідженими в повній мірі.

Метою роботи є дослідження закономірностей дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) при їх термічній обробці у вакуумі.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних **задач дослідження**:

1) проведення термічної обробки у вакуумі нанорозмірних плівкових композицій Pt/Tb/Fe при різних температурах;

2) визначення температурних інтервалів фазових переходів шляхом аналізу перегинів на температурній залежності електричного опору досліджуваних плівкових композицій;

3) виявлення закономірностей дифузійного фазоутворення при термічній обробці у вакуумі в широкому інтервалі температур, використовуючи методи рентгеноструктурного фазового аналізу та мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток.

Предмет дослідження: формування структури і фазового складу в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Tb/Fe при їх термічній обробці у вакуумі в широкому інтервалі температур.

Об'єкт дослідження: нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) осаджені на підкладинки термічно окисленого монокристалічного Si(001).

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Формування фазового складу в двокомпонентній системі Fe-Pt

Відомо, що в системі FePt при $T > 835$ °C існує серія твердих розчинів $(\text{Fe}, \text{Pt})_{\text{ss}}$, а в субсолідусній області – три впорядкованих з'єднання: FePt_3 , FePt , Fe_3Pt . $(\text{Fe}, \text{Pt})_{\text{ss}}$ характеризуються неупорядкованою кубічною структурою типу Cu (просторова група $Fm\bar{3}m$). Структура фази FePt_3 – впорядкована кубічна типу Cu_3Au (просторова група $Fm\bar{3}m$). Фаза FePt має тетрагональну кристалічну будову (просторова група $P4/mmm$) (рис. 1.1) [1].

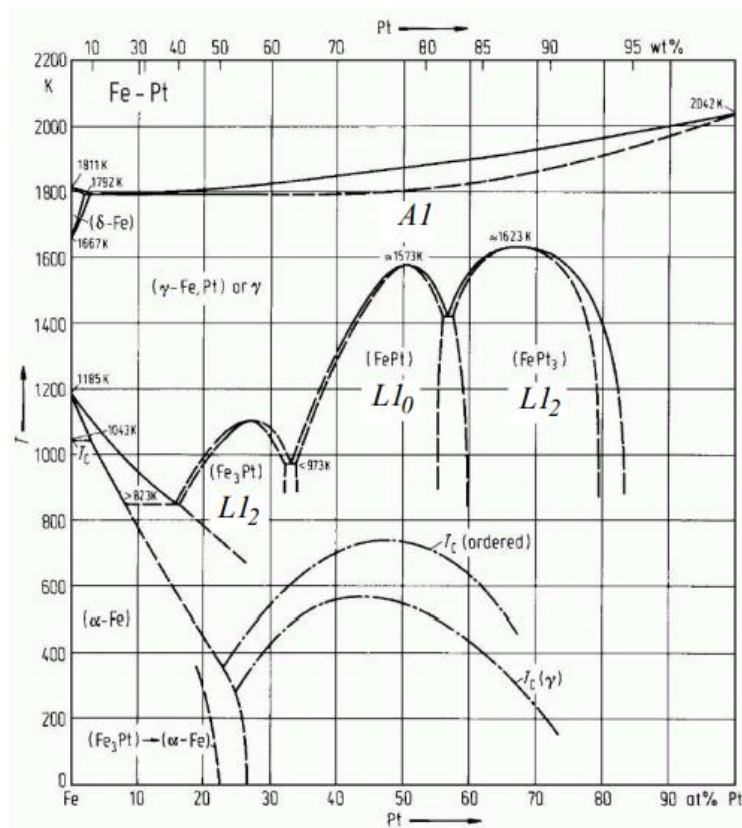


Рисунок 1.1 – Фазова діаграма стану системи Fe-Pt [2]

Загалом, сплави Fe-Pt мають високу стабільність надструктурних фаз, особливо $L1_0\text{-FePt}$ і $L1_2\text{-FePt}_3$. Для масивних матеріалів фазова діаграма подвійної системи Fe-Pt (рис 1.1) засвідчує, що структура $L1_0$ є термодинамічно

стійкою при низьких температурах. При 1300 °С відбувається фазовий перехід до впорядкованої фази від неупорядкованої $A1$.

Для використання матеріалу в якості носія магнітного запису потрібне формування монокристалічних наночастинок в феромагнітному стані з орієнтацією спіну в одному напрямку. Як перспективний матеріал в цьому відношенні розглядаються нанорозмірні композиції на основі FePt, що мають в своїй структурі фазу $L1_0$ [2 – 4]. Надструктурна фаза $L1_0$ сформована на основі гранецентрованої кубічної кристалічної структури (ГЦК). Насправді хімічно впорядкована фаза $L1_0$ -FePt має не правильну кубічну гранецентровану гратку, вона дещо спотворена тетрагонально(має ГЦТ гратку). Експериментальні значення констант решітки складають: $a = 0,3886$ нм, $c = 0,3788$ нм, а параметр тетрагональності $c/a = 0,981$ [5]. Елементарна комірка гранецентрованої тетрагональної структури $L1_0$ зображена на рис. 1.2. Вона побудована з шарів атомів Fe і Pt, розташованих по чергово один за одним в напрямку (001) [2]. Відповідно до напрямку осі симетрії надструктури c існує 3 можливих орієнтації фази $L1_0$. У кожному розглянутому варіанті можливі два протифазних домени, що дозволяє розглядати в цілому 6 різних варіантів фази (рис. 1.2).

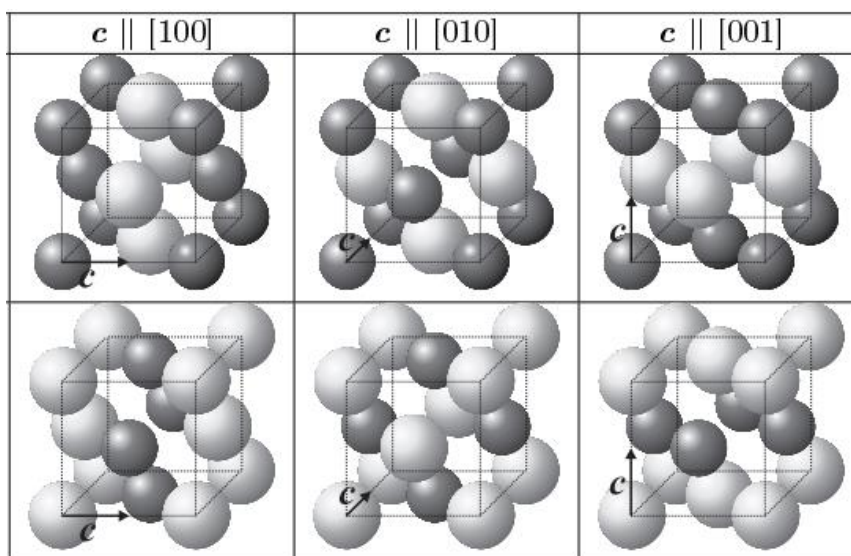


Рисунок 1.2 – Варіації розміщення атомів в елементарній комірці фази $L1_0$ -FePt [5]

1.2 Особливості тонких плівок FePt як перспективного матеріалу для надщільного магнітного запису

Тонкоплівкові матеріали на основі Fe/Pt, що мають в своїй структурі хімічно впорядковану фазу $L1_0$ -FePt можуть володіти великим значенням енергії магнітокристалічної анізотропії ($K_u \approx 7$ МДж/м³) та високими магнітно-твердими характеристиками (коерцитивна сила – біля 792 кА/м [6] (до 30 кЕ [7,8])). Через тетрагональні спотворення магнітні властивості фази $L1_0$ характеризуються дуже високою одноосьовою енергією магнітокристалічної анізотропії. Це зумовлює перспективу зменшення розміру частинок до декількох нанометрів при збереженні високої термічної стабільності магнітного носія. Якщо прийняти константу часу зберігання 10 років і енергію магнітокристалічної анізотропії $7 \cdot 10^7$ ерг/см³, стабільна намагніченість може бути збережена у сферичних частинках FePt діаметром менше 4 нм [2].

Це викликає інтерес у використанні даних плівок в якості магнітних носіїв інформації з надвеликою щільністю запису. Принципи створення таких магнітних плівок, що володіють намагніченістю, орієнтованою перпендикулярно площині плівки, інтенсивно вивчаються з метою отримання нових матеріалів, носіїв інформації з надвисокою щільністю магнітного запису [9, 10].

Однак плівки на основі FePt осаджуються на достатньо дорогі монокристалічні підкладинки MgO та для формування в них впорядкованої структури необхідна висока температура обробки – вище 600 °С [6].

Для використання при технології перпендикулярного запису інформації необхідне отримання тонких плівок FePt з впорядкованою ГЦТ структурою типу $L1_0$, з вираженою текстурою зерен [001] та малим розміром зерен [11]. Однак безпосередньо після осадження плівки мають текстуру [111], тому що площина [111] є найбільш щільнопакованою площиною плівок FePt, невпорядковану кубічну (ГЦК) структуру $A1$ з низькою енергією магнітокристалічної анізотропії ($1,1 \cdot 10^6$ ерг/см³), малою коерцитивною силою і орієнтацією легкої вісі

намагнічування під кутом 37° до площини плівки [12, 13]. Для формування впорядкованої фази $L1_0$ -FePt необхідне проведення термічної обробки або осадження плівки на підігріту підкладку, що ускладнює практичне використання даного матеріалу через ріст зерен при підвищених температурах, та, відповідне, зменшення потенційно можливої щільності магнітного запису інформації. Тому актуальним завданням сучасного тонкоплівкового матеріалознавства є питання зменшення температури формування хімічно впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

Окрім того, однією з основних проблем при створенні носіїв інформації для перпендикулярного магнітного запису є розробка методів отримання плівок FePt, в яких вісь легкого намагнічування була б орієнтована по нормалі до поверхні. Як правило, для отримання плівок FePt з такою орієнтацією використовується ряд підходів, зокрема осадження після лазерного розпорошення [14]; епітаксіальне зростання на монокристалічних підкладках [15,16]; епітаксіальне зростання на різних підкладках або на проміжному між підкладкою і плівкою шарі [17,18]. Широко використовується метод магнетронного осадження [19], а також почергове осадження шарів Fe і Pt [20].

1.3 Фактори, що впливають на структуру тонких плівок на основі FePt

Передбачається, що застосування новітніх технологічних прийомів дозволить реалізувати потенційні можливості носіїв інформації з шарами FePt при створенні магнітних накопичувачів з поверхневою щільністю запису 1 Тбіт/дюйм^2 [6, 21].

Дослідження [6] показали, що порівняно велика коерцитивна сила може бути отримана в композитних двошарових плівках FePt-MgO з перпендикулярною магнітною анізотропією. Їх коерцитивна сила в перпендикулярному до площини плівок напрямку досягає 800 кА/м , що приблизно на 160 кА/м більше, ніж для плівок FePt та FePt-SiO₂. Дослідження також виявили, що розміри магнітних доменів тонкоплівкових зразків FePt-MgO

знаходяться в межах 60 нм – 95 нм. При цьому для даних зразків зі зростанням розміру доменів від 60 нм до 95 нм спостерігається монотонний ріст коерцитивної сили від 40 кА/м до 800 кА/м.

Для магнітного запису з поверхневою щільністю інформації, що дорівнює 1 Тбіт/дюйм², робочий шар магнітного носія повинен мати високу коерцитивну силу – не менше 950 кА/м – при середньому розмірі кристалічних зерен біля 8 нм. До таких магнітних та структурних характеристик наближаються тонкоплівкові матеріали, в яких магнітні частинки FePt розподілені в одній з немагнітних матриць – С, SiO₂ та В₂O₃. Зокрема, коерцитивна сила тонкоплівкових зразків FePt(10 нм)/SiO₂(1,5 нм) досягає 950 кА/м після термічної обробки при температурі 650 °С. Однак в даних зразках розмір зерен більше 40 нм. Розмір зерен зменшується приблизно до 10 нм при зменшенні температури відпалу до 600 °С та дещо змінюється при подальшому зменшенні температури відпалу до 550 °С. Нажаль, зі зниженням температури відпалу від 650 °С до 550 °С коерцитивна сила зменшується приблизно від 950 кА/м до 80 кА/м. Для порівняння: при тій самій зміні температури відпалу плівок FePt товщиною 50 нм без діелектричної матриці SiO₂ коерцитивна сила зменшується від 1190 кА/м до 634 кА/м, а розмір зерен – від 58 нм до 28 нм, тобто в структурі даних плівок переважають кристалічні зерна великих розмірів [6].

В роботі [22] досліджено вплив проміжних шарів Cu, Ag, Au на формування впорядкованої структури $L1_0$ та розмір її зерен в плівкових композиціях на основі Fe/Pt. Отримані результати вказують, що Au та Ag при термічній обробці сегрегують на границях поділу FePt, а Cu може утворювати потрібну фазу з FePt. Плівки, леговані Au та Ag, мають коерцитивну силу на 1 кЕ – 2 кЕ більшу, ніж коерцитивна сила плівок FePt без додаткових шарів, відпалених при температурі 550 °С та більше протягом 10 хв. Додавання 20 об.% Cu до сплаву FePt підвищило середнє значення коерцитивної сили та сприяло зростанню відношення інтенсивностей дифракційних рефлексів (001)/(002), що свідчить про прискорений процес впорядкування. Отримані

значення середнього розміру зерна в плівках, що містять в своєму складі Au та Ag виявились нижчими, ніж в плівках FePt без легування. Додавання Cu збільшило середній розмір зерен і шорсткість плівки [22].

Авторами [23] методами фізичного матеріалознавства (рентгеноструктурного фазового аналізу і вимірювання магнітних властивостей на SQUID-магнетометрі) досліджено вплив додаткового проміжного шару Au завтовшки 30 нм у нанорозмірній плівковій композиції Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Au(30 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) на процеси дифузійного фазоутворення – перехід хімічно неупорядкованої магнітно-м'якої фази *A1*-FePt у хімічно впорядковану магнітно-тверду фазу *L1₀*-FePt при відпалі у вакуумі при температурі 600 °C з різною тривалістю. Встановлено, що в нанорозмірній плівковій композиції Fe₅₀Pt₅₀(15 нм)/Au(30 нм)/Fe₅₀Pt₅₀(15 нм) фазовий перехід *A1*-FePt → *L1₀*-FePt починається під час відпалу при температурі 600 °C тривалістю 30 с, що на 100 °C нижче в порівнянні з плівковою композицією Fe₅₀Pt₅₀. Атоми Au при термічній обробці дифундують по границям зерен фази *L1₀*-FePt, обмежують їх зростання і магнітну взаємодію. Це супроводжується збільшенням коерцитивної сили, але зберігається ізотропія магнітних властивостей незалежно від напрямку магнітного поля [23].

Таким чином, дослідження закономірностей структуро- та фазоутворення в нанорозмірних плівках на основі Fe/Pt викликають велику зацікавленість науковців в області фізичного матеріалознавства. В той же час, вплив легуючих компонентів на формування магнітно-твердої фази *L1₀*-FePt не можна вважати таким, що досліджений в повній мірі.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Одним із шляхів розвитку технологій магнітного надщільного запису інформації є використання в якості матеріалу носія нанорозмірних плівкових композицій на основі Fe/Pt. Це обумовлено тим, що в структурі даного плівкового матеріалу може існувати впорядкована фаза $L1_0$ -FePt, яка володіє високими значеннями магнітних характеристик.

2. Для промислового використання тонкоплівкових композицій на основі Fe/Pt необхідним є вирішення ряду матеріалознавчих задач: зменшення температури утворення впорядкованої фази $L1_0$ -FePt, підвищення коерцитивної сили та енергії магнітокристалічної анізотропії, що здатна забезпечити достатню термічну стабільність магнітних носіїв навіть при екстремально малих розмірах кристалічних зерен, створення текстури зерен фази $L1_0$ -FePt в напрямку перпендикулярному площині плівки.

3. Введення проміжних шарів легуючих елементів з подальшою термічною обробкою у вакуумі може впливати на фазо- та структуроутворення в тонкоплівкових композиціях на основі Fe/Pt.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

В даній роботі досліджено закономірності дифузійного структуро- та фазоутворення в плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм), осаджених на підкладки термічно окисленого монокристалічного Si(001). Всі зразки отримано методом магнетронного розпорощення. Товщини шарів плівкових композицій визначено, зважаючи на швидкість розпорощення кожної мішені, і верифіковано профілометричним методом. Подальша термічна обробка плівкових зразків проведена в широкому інтервалі температур з метою визначення закономірностей дифузійної взаємодії між Pt, Fe і Tb, а також формування в структурі досліджуваних плівкових композицій впорядкованої фази $L1_0$ -FePt.

2.1 Метод магнетронного розпорощення

Магнетронний метод заснований на розпорощенні матеріалу за рахунок бомбардування поверхні мішені іонами робочого газу (зазвичай аргону), що утворюються в плазмі тліючого розряду. Цей метод має широкі можливості застосування і є досить перспективним.

Основними елементами магнетронних систем є катод-мішень, анод і магнітна система (рис. 2.1) [24].

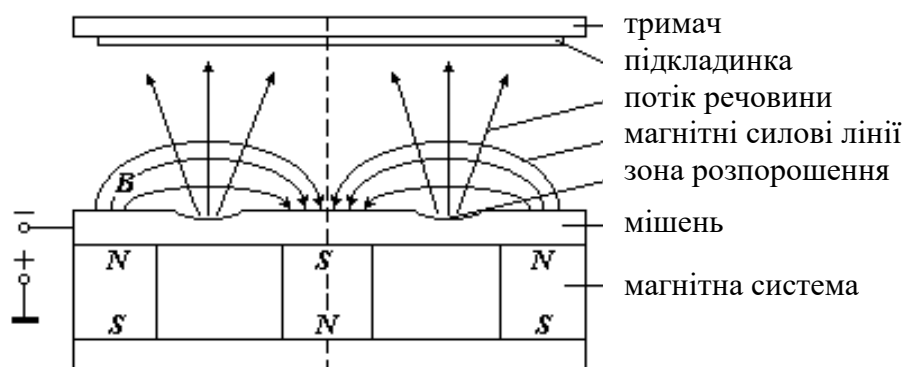


Рисунок 2.1 – Схема магнетронної системи розпорощення [25]

При подачі постійної напруги між анодом (3) і катодом (1) між ними виникає неоднорідне електричне поле \vec{E} , яке збуджує тліючий розряд в середовищі робочого газу. Утворені іони бомбардують катод. Бомбардування катода іонами призводить до двох основних ефектів: емісії електронів і розпорощення поверхні катода-мішені. Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони прискорюються електричним полем \vec{E} і починають рухатися у напрямку до анода. При наявності магнітного поля \vec{B} на заряджену частинку із зарядом q , що рухається зі швидкістю \vec{V} , діє сила Лоренца (2.1):

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{V} \times \vec{B}], \quad (2.1)$$

де \vec{F} – сила Лоренца;

q – заряд частинки;

\vec{E} – напруженість електричного поля;

\vec{V} – швидкість частинок;

\vec{B} – індукція магнітного поля.

Важливою перевагою методу магнетронного осадження є відсутність бомбардування підкладинки високоенергетичними вторинними електронами через їх захоплення магнітною пасткою. Це дозволяє уникнути перегріву поверхні підкладинки (4), і, отже, дає можливість отримувати плівки матеріалів з низькою термостійкістю, причому з високою швидкістю осадження [24].

2.2 Профілометричний аналіз

Профілометричний метод вимірювання товщини покриття заснований на вимірюванні сходинок, утвореного краєм плівки з підкладинкою, за допомогою профілометра.

Сходінка для вимірювання товщини може бути отримана в процесі нанесення плівки ізоляцією ділянки основного металу. Після видалення ізоляційного матеріалу проводиться вимірювання.

Принципова схема профілометра представлена на рисунку 2.2:

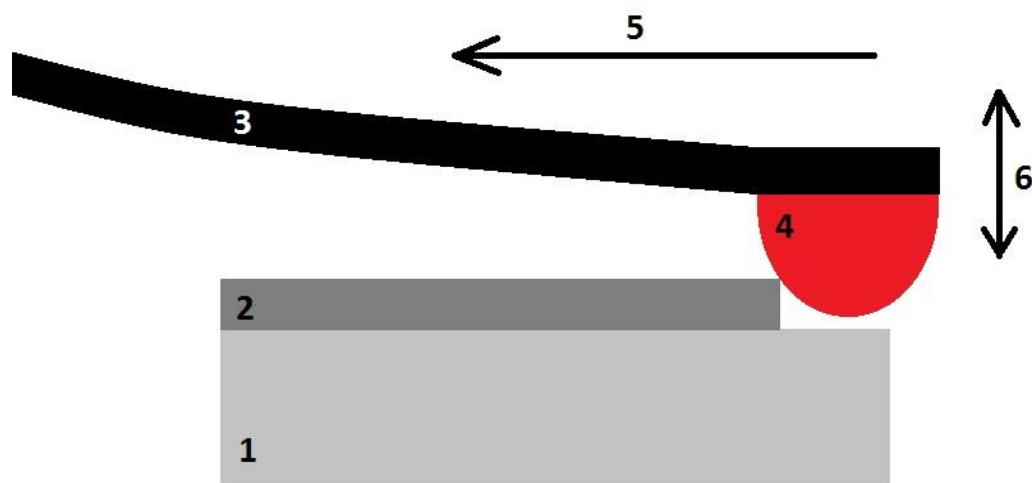


Рисунок 2.2 – Схема роботи профілометра

Жорстка консоль (3), на якій закріплено голку (4) переміщується в напрямку (5) по поверхні підкладки (1) та плівки (2). Вертикальна позиція (6) записується як змінений профіль, що характеризує товщину покриття.

Товщину тонкоплівкових композицій даним методом можливо визначити з абсолютною похибкою ± 1 нм.

2.3 Фізико-технологічні параметри термічної обробки

В роботі проводилась термічна обробка зразків у камері вакуумного універсального поста (ВУП-5М). В якості джерела тепла використовується вольфрамова спіраль, через яку пропускається електричний струм. Швидкість нагрівання складала близько 0,3 К/с. Відпали проводились у вакуумі 10^{-2} Па. Контроль температури зразка проводився з використанням термопари Ni-NiCr, підведеної до поверхні плівки.

2.4 Методи дослідження

Процеси структуро- та фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях на основі Fe/Pt з додатковим проміжним шаром Tb досліджено з використанням наступних методів фізичного матеріалознавства: резистометричний аналіз (чотирьохзондовий метод) під час відпалу *in situ* у вакуумі, рентгеноструктурний фазовий аналіз та методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток зразків до та після термічної обробки.

2.4.1 Резистометричний аналіз

Поверхневий електроопір досліджуваних зразків визначали чотирьохзондовим методом. Цей метод завдяки своїм високим метрологічним показникам та простоті набув найбільш широкого застосування в лабораторній і промисловій практиці [26].

Пристрій являє собою чотири вістря (зонди), розташовані в один ряд на однакових відстанях один від одного, що торкаються поверхні досліджуваного матеріалу (рис. 2.3). Через два зонди пропускається електричний струм (частіше за все між крайніми вістрями), а між двома іншими вимірюється різниця потенціалів U [27].

Верхній шар має товщину d_1 і електропровідність σ_1 , нижній шар – товщину d_2 і електропровідність σ_2 .

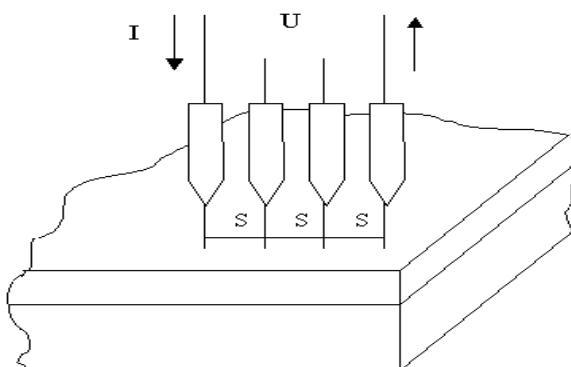


Рисунок 2.3 – Вимірювання питомого та поверхневого електроопору в двошаровій структурі [26]

Оскільки шари досить тонкі, то легко можна реалізувати умову $d_1, d_2 < S$. В цьому випадку обидва шари по відношенню до зондів включені паралельно і виконується рівність (2.2):

$$\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2 = (U/I) \ln(2/\pi), \quad (2.2)$$

де U – різниця потенціалів;

I – сила струму.

Якщо електропровідність верхнього шару значно перевищує електропровідність нижнього, то $\sigma_2 d_2 \ll \sigma_1 d_1$ і нижній шар не буде впливати на протікання струму, то поверхневий опір верхнього шару може бути визначено за формулою (2.3):

$$R_s = (U/I)(\pi/\ln(2)) \approx 4,53(U/I), \quad (2.3)$$

де R_s – поверхневий опір.

При вимірюванні багат шарових структур обмежених розмірів, коли d та відстань від зонду до границі зразка приблизно дорівнює S необхідно враховувати вплив границь на електроопір. Це досягається введенням допоміжного множника.

Джерелами випадкових похибок можуть бути фотопровідність та фото-е.р.с. на контактах. Тому вимірювання слід проводити в затемненій камері. Щоб виключити ефект нагрівання зразка при проходженні струму через зонди та вплив термо-е.р.с., виникаючих на контактах, робочий струм вибирають мінімальним.

Виконання всіх заходів по зменшенню похибок дозволяють витримувати випадкову похибку на рівні $\pm 5\%$ [28].

В даній роботі резистометричний аналіз проводився *in situ* при відпалі плівкових композицій Pt/Tb/Fe у вакуумі в широкому інтервалі температур. В

результаті отримано температурні залежності поверхневого електроопору плівок. Це дозволяє визначити температурні інтервали фазових та структурних змін в тонкоплівкових композиціях шляхом аналізу перегинів на кривих температурних залежностей.

2.4.2 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурні дослідження зразків виконувались за допомогою дифрактометра Rigaku ULTIMA IV у випромінюванні мідного аноду (довжина хвилі $\lambda_{Cu K\alpha}=1,54184 \text{ \AA}$).

Рентгенівський аналіз проводився з метою визначення фазового складу плівок на основі Fe/Pt з додатковим шаром Tb після різних режимів термічної обробки по розрахункам міжплощинних відстаней.

Кожна фаза має свою кристалічну ґратку. Атомні площини, що утворюють цю ґратку, мають свій характерний тільки для даної ґратки комплекс значень міжплощинних відстаней d_{hkl} . Визначення фазового складу полікристалічних речовин по їх міжплощинним відстаням є одним з найбільш поширених та порівняно легких завдань, що вирішуються за допомогою рентгенівського аналізу [29].

Для того, щоб хвилі, розсіяні сімейством рівнобіжних площин кристала дали максимум інтенсивності необхідним є виконання наступного співвідношення між довжиною хвилі рентгенівського випромінювання λ , міжплощинною відстанню d , та кутом падіння рентгенівських променів на дану кристалографічну площину [30]:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.4)$$

де d – міжплощинна відстань;

θ – брегівський кут;

λ – довжина хвилі випромінювання;

n – порядок відбиття.

Рівняння (2.4) виражає основний закон дифракції рентгенівських променів у кристалах і називається умовою Вульфа-Брегга.

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

Так як λ для даного випромінювання відома, то задача визначення міжплощинних відстаней і параметра кристалічної ґратки зводиться до знаходження кутів θ для всіх рефлексів рентгенограми [31]. Ідентифікація фаз проводилась за порівнянням розрахованих міжплощинних відстаней з картотекою ASTM.

Наявність текстури даної фази позитивно впливає на чутливість методу. Деякі лінії на дифрактограм посилюються, а деякі зникають, що дозволяє виявити фазу при її меншій кількості, ніж за відсутністю переважної орієнтації [32].

2.4.3 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток

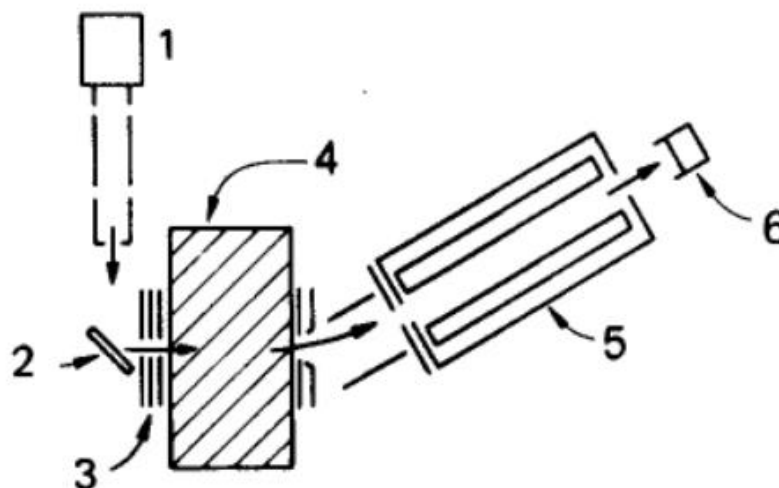
Пошаровий хімічний аналіз проводився методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток (МСВН). Цей метод є високочутливим методом аналізу поверхні твердого тіла, що широко застосовується в фізичному матеріалознавстві, біології, геології [33].

В порівнянні з методом мас-спектрометрії вторинних іонів, мас-спектрометрія вторинних нейтральних часток має значні переваги. Великим недоліком методу мас-спектрометрії вторинних іонів (МСВІ) є той факт, що ймовірність іонізації при видаленні атома з поверхні дуже сильно залежить від її хімічного складу (так званий «матричний ефект»). Крім того, ймовірність іонізації для атомів різного сорту в одній і тій самій матриці, так само як і для атомів одного сорту в різних матрицях, може відрізнятись на кілька порядків. Це значно ускладнює кількісний аналіз твердих тіл. Подолати цей недолік дозволяє

метод МСВН, що аналізує нейтральну компоненту розпорошених частинок, яка є домінуючою в загальному потоці (близько 90 % – 99 % від всіх вибитих частинок). У методі мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток нейтральні атоми розпорошуються з поверхні зразка за допомогою газів Ar, Kr, Ne з енергією в діапазоні 0,5 кеВ – 5,0 кеВ. Імовірність розпорошених іонізованих атомів вирватися з поверхні змінюється в межах 10^{-5} – 10^{-1} і залежить від поверхневого складу. Для того, щоб нейтральні частинки можна було аналізувати мас-спектрометричними методами, після розпорошення вони повинні бути іонізовані (так звана «постіонізація» нейтральних частинок). Це можна виконати лазерним випромінюванням або плазмою. Завдяки розподілу процесів іонізації і розпорошення часток в просторі і часі, чутливість приладу по відношенню до досліджуваного елемента є константою для даних умов експерименту. Це робить можливим кількісну інтерпретацію результатів, тобто кореляцію між мас-спектрометричними сигналами і відповідними їм концентраціями елементів [33, 34].

Основні ж недоліки методу мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток – це те, що іонізуються всі частинки, присутні в газовому середовищі приладу, а ефективність відбору іонізованих частинок в аналізатор значно менша, ніж методом МСВІ [33].

На рисунку 2.4 зображено приклад системи мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток, головна відмінність якої від стандартної системи мас-спектрометрії вторинних іонів визначається у встановленні іонізаційної плазменної камери перед мас-спектрометром. Сітки між зразком та камерою діють як електричні діафрагми, не дозволяючи іонам обох знаків входити в камеру чи покидати її. Ось чому в іонізаційну камеру потрапляють тільки нейтральні частинки, а іонізаційні атоми в камері не можуть повернутися на зразок [33].



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

Рисунок 2.4 – Принципова схема установки для мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток, в якій розпорошені нейтральні частинки потрапляють у плазмове середовище для постіонізації [33]

Іонізація нейтральних частинок у камері може проводитися з використанням високоякісної розрідженої плазми. Роздільна здатність по глибині ≤ 2 нм. При визначенні концентрації хімічних елементів враховано лінійну залежність концентрації від інтенсивності, яка визначена у дослідженнях [33].

В результаті експериментів можна отримати графіки концентраційного розподілу хімічних елементів по глибині досліджуваного матеріалу.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Методом магнетронного розпорошення отримано тонкоплівкові композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) на підкладках термічно окисленого монокристалічного Si(001). Товщина плівок контролювалась, зважаючи на швидкість розпорошення мішені, та перевірено методом профілометричного аналізу.

2. Після осадження зразки піддано термічній обробці в широкому інтервалі температур у вакуумі. Безпосередньо під час відпалу виміряно поверхневий електроопір чотирьохзондовим методом з метою виявлення температурних інтервалів фазових перетворень в досліджуваних плівкових композиціях.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Фазовий склад і кристалічна структура плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂ після осадження і термічної обробки у вакуумі

Для отримання інформації про наявні фазові та структурні складові тонкоплівкових композицій Pt/Tb/Fe усі зразки досліджувались методом рентгеноструктурного фазового аналізу у вихідному стані та після термічної обробки у вакуумі в температурному інтервалі 155 – 620 °С. Дані індиціювання результатів дифрактометричного аналізу наведено таблиці 3.1.

На дифрактограмі зразка у вихідному стані спостерігаються рефлекси від окремих шарів плівкової композиції: Tb, Pt, Fe. Тобто в процесі магнетронного осадження не відбувається дифузійної взаємодії між елементами шарів.

Термічна обробка до 215 °С приводить до активації дифузії Tb у шар Pt та утворення фази Pt₂Tb, про що свідчить наявність рефлексу Pt₂Tb(1 1 1). Також при даній температурі рефлекс від Pt зміщується в бік більших кутів, що можна пояснити частковим розчиненням атомів Fe в кристалічній ґратці Pt.

Вже після відпалу при 280 °С спостерігається дифракційний рефлекс від невідповідної фази Al-FePt. Після відпалу до температур 400 °С і вище на дифрактограмах можна спостерігати наявність рефлексів від оксиду тербію TbO₂. Дана фаза могла утворитись через активацію процесів дифузії кисню залишкової атмосфери в поверхневі шари плівкової композиції при вказаній температурі.

При термічній обробці до 500 °С спостерігається активація процесу впорядкування і утворення магнітно-твердої фази L1₀-FePt, про що свідчить наявність рефлексів L1₀-FePt(001), L1₀-FePt(111) та L1₀-FePt(002) (додаток А).

Таблиця 3.1 – Результати індиціювання дифрактограм плівкових композицій Pt/Tb/Fe після осадження і відпалів при різних температурах

Кут дифракції 2θ , град.	θ , град.	$\sin\theta$	Міжплощинна відстань d , нм	Фаза
Після осадження				
28,56	14,28	0,25	3,13	Tb(100)
39,8	19,9	0,34	2,26	Pt(111)
45	22,5	0,38	2,01	Fe(110)
Після відпалу за температури 155 °С				
40,2	20,1	0,34	2,24	Pt(111)
45,16	22,58	0,38	2,01	Fe(110)
Після відпалу за температури 215 °С				
20,4	10,2	0,18	4,35	Pt ₂ Tb(111)
40,28	20,14	0,34	2,24	Pt(111)
44,84	22,42	0,38	2,02	Fe(110)
Після відпалу за температури 280 °С				
20,36	10,18	0,18	4,36	Pt ₂ Tb(111)
41,32	20,66	0,35	2,19	Al-FePt(111)
Після відпалу за температури 335 °С				
20,36	10,18	0,18	4,36	Pt ₂ Tb(111)
41,4	20,7	0,35	2,18	Al-FePt(111)
49,4	24,7	0,42	1,84	Al-FePt(002)
Після відпалу за температури 400 °С				
20,4	10,2	0,18	4,35	Pt ₂ Tb(111)
30,28	15,14	0,26	2,95	TbO ₂ (111)
41,48	20,74	0,35	2,18	Al-FePt(111)
49,04	24,52	0,42	1,86	Al-FePt(002)

Продовження таблиці 3.1

Кут дифракції 2θ , град.	θ , град.	$\sin\theta$	Міжплощинна відстань d , нм	Фаза
Після відпалу за температури 450 °С				
20,48	10,24	0,18	4,34	Pt ₂ Tb(111)
30,36	15,18	0,26	2,94	TbO ₂ (111)
31,68	15,84	0,27	2,82	Tb
41,76	20,88	0,36	2,16	Al-FePt(111)
48,32	24,16	0,41	1,88	Al-FePt(200)
Після відпалу за температури 500 °С				
20,36	10,18	0,18	4,36	Pt ₂ Tb(111)
24,68	12,34	0,21	3,61	Ll ₀ -FePt(001)
30,4	15,2	0,26	2,94	TbO ₂ (111)
31,36	15,76	0,27	2,81	Tb
41,64	20,82	0,36	2,17	Ll ₀ -FePt(111)
47,52	23,76	0,40	1,91	Ll ₀ -FePt(200)
Після відпалу за температури 550 °С				
25	12,5	0,22	3,56	Ll ₀ -FePt(001)
30,52	15,26	0,26	2,93	TbO ₂ (111)
41,68	20,84	0,36	2,17	Ll ₀ -FePt(111)
47,64	23,82	0,40	1,91	Ll ₀ -FePt(200)
Після відпалу за температури 620 °С				
24,96	12,48	0,22	3,57	Ll ₀ -FePt(001)
30,44	15,22	0,26	2,94	TbO ₂ (111)
41,68	20,84	0,36	2,17	Ll ₀ -FePt(111)
47,8	23,9	0,41	1,90	Ll ₀ -FePt(200)

3.2 Особливості розподілу елементів по товщині плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂ після осадження і термічної обробки у вакуумі

Для отримання інформації щодо розподілу хімічних елементів плівкових композицій по їх товщині усі зразки досліджувались за допомогою методу мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток у вихідному стані та після термічної обробки у вакуумі в широкому температурному інтервалі.

За графіком залежності концентрації від товщини плівки Fe/Tb/Pt після осадження можна зробити висновки щодо вихідної шаруватої структури плівкових композицій: окремий шар Fe безпосередньо осаджений на підкладку Si, на нього осаджений шар Tb, в який переходить частина Pt, та окремий шар Pt. Наявність платини в шарі тербію можна пояснити тим, що при осадженні Tb не сформував суцільного шару, а платина, яка, в свою чергу, осаджувалась поверх тербію, потрапляла між його зернами (рис. 3.2).

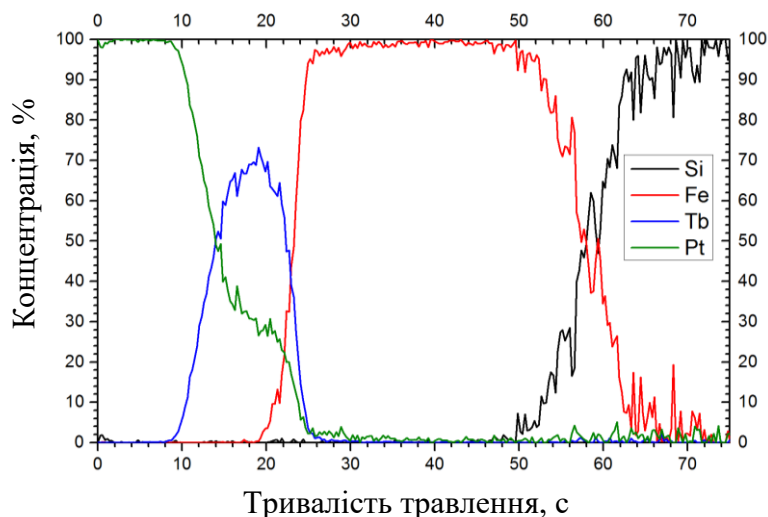


Рисунок 3.2 – Пошаровий розподіл елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після осадження

Після відпалу до 155 °C тербій починає дифундувати в шар платини, а при температурі 280 °C виходить на поверхню плівки (рис. 3.3).

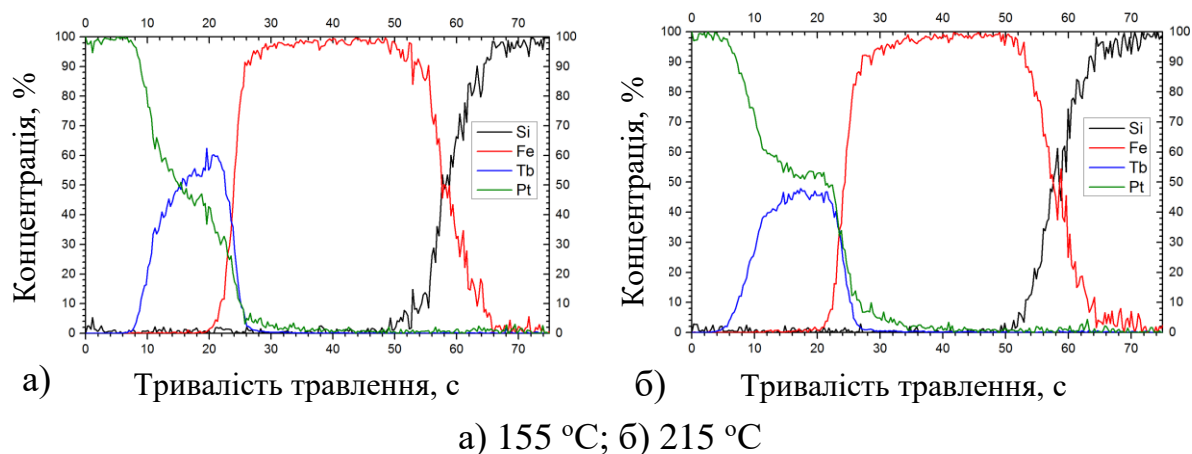


Рисунок 3.3 – Пошаровий розподіл елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після відпалів у вакуумі

Разом з тим, після термічної обробки в інтервалі від 280 °С до 400 °С можна спостерігати розчинення тербію в платині, відношення концентрацій яких відповідає стехіометричному складу фази Pt_2Tb . Також в даному температурному інтервалі відбувається часткове розчинення платини в шарі заліза, що може відповідати початку утворення неупорядкованої фази $A1-FePt$ (рис. 3.4). Дане припущення корелює з відповідними результатами рентгеноструктурного аналізу.

Окрім того, на поверхні плівкової композиції при даних температурах можна спостерігати сегрегаційні шари заліза та тербію., Значний сигнал від Si в приповерхневих шарах плівкової композиції може пояснюватись накопиченням в матеріалі молекул N_2 , які мають ту саму масу, що і атоми Si. Азот міг адсорбуватися поверхнею плівки із залишкової атмосфери, про наявність якої також свідчить наявність оксиду тербію після відпалу композицій при 400 °С (за результатами рентгеноструктурного фазового аналізу).

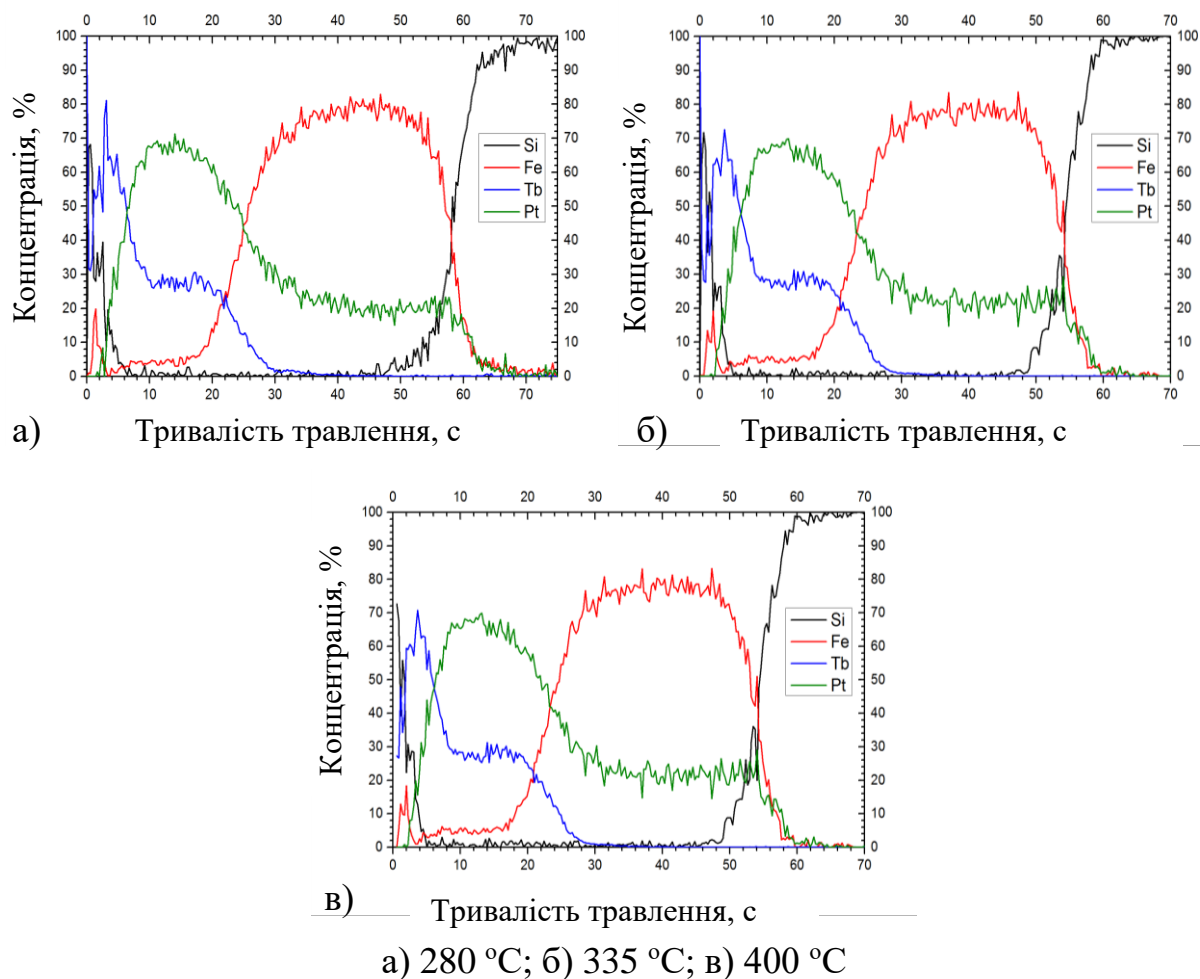


Рисунок 3.4 – Пошаровий розподіл елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після відпалів у вакуумі

Пошаровий розподіл елементів досліджуваної тонкоплівкової композиції після відпалів при температурах 450 °С та 500 °С свідчить, що азот з поверхні протифундував в шар Pt₂Tb (рис. 3.5).

Після відпалів при температурах 550 °С та 620 °С спостерігається повне розчинення платини в залізі та сегрегація тербію на поверхні плівкової композиції. Окрім того, можна спостерігати високу концентрацію кремнію протягом всієї тривалості травлення плівок. Це може бути пов'язане з тим, що при даних температурах ростуть зерна фази $L1_0$ -FePt та плівка стає несучільною або має острівкову структуру, відповідно потік іонів потрапляє не лише на осаджену композицію, а також на кремнієву підкладку (рис. 3.6).

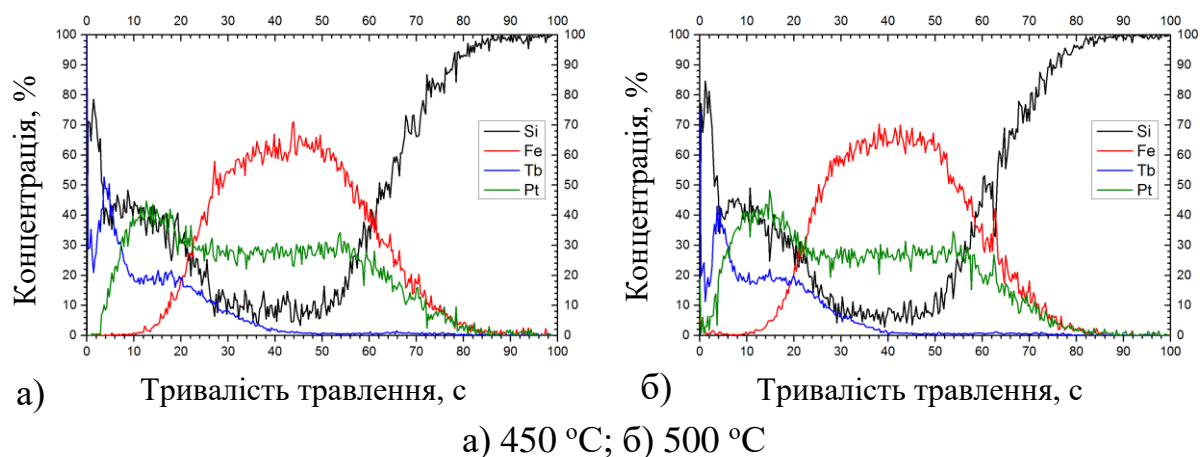


Рисунок 3.5 – Пошаровий розподіл елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після відпалів у вакуумі

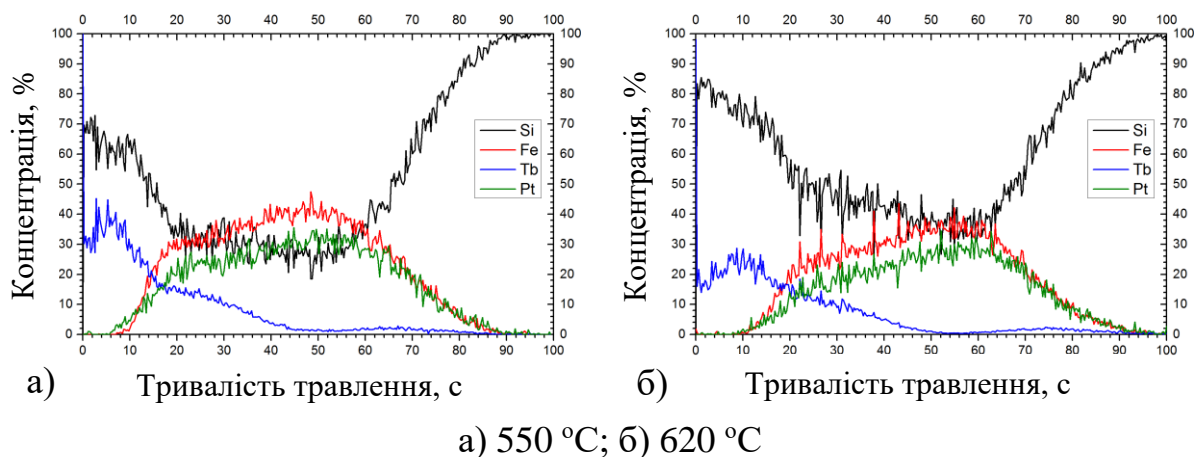


Рисунок 3.6 – Пошаровий розподіл елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) після відпалів у вакуумі

3.3 Температурна залежність поверхневого електричного опору плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂

Досліджувані тонкоплівкові зразки Pt/Tb/Fe піддавались термічній обробці у вакуумі в широкому інтервалі температур. При цьому безпосередньо під час відпалу вимірювався їх поверхневий електроопір.

На рисунку 3.7 зображена температурна залежність поверхневого електричного опору плівкової композиції Pt/Tb/Fe. Аналізуючи перегини на

даній температурній залежності та враховуючи результати експериментів методами пошарового хімічного та рентгеноструктурного фазового аналізу, можна оцінити температурні інтервали фазових та структурних змін, що відбуваються в матеріалі зразків.

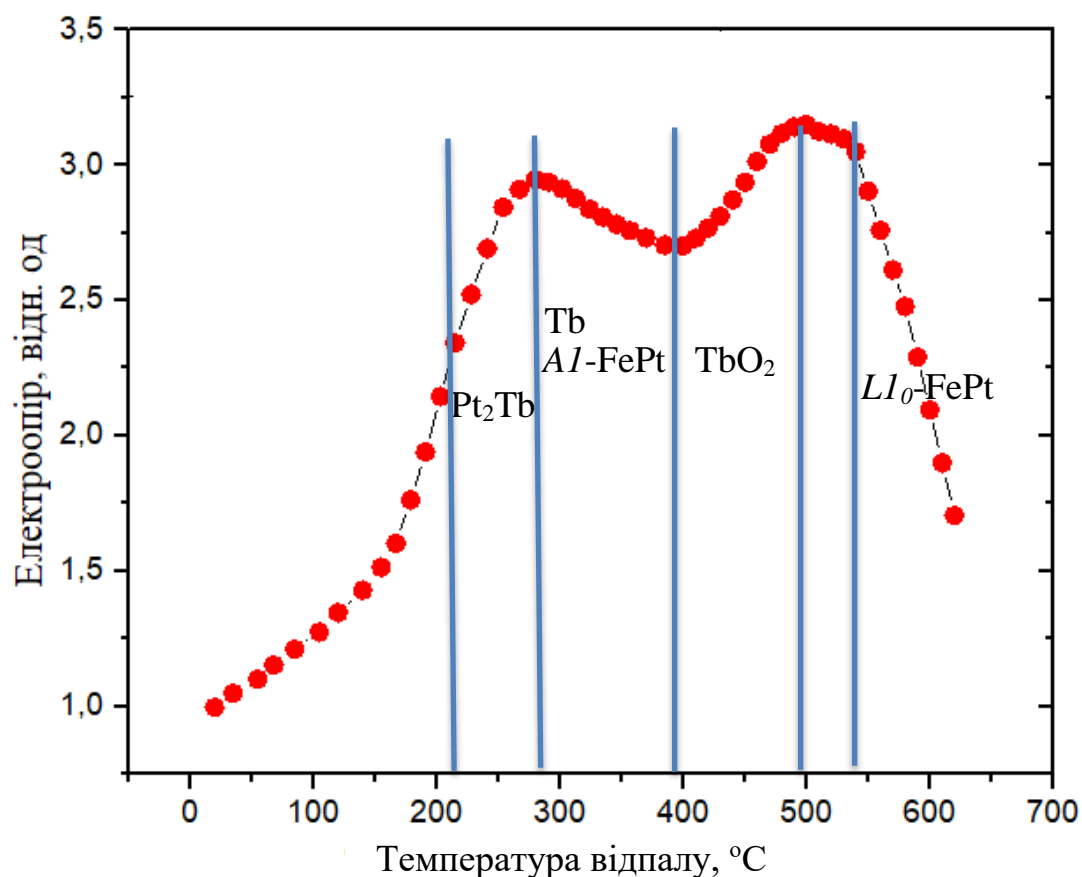


Рисунок 3.7 – Залежність нормованого поверхневого електроопору плівкової композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂ від температури відпалу

Можна бачити (рис. 3.7), що при збільшенні температури відпалу до ≈ 150 °C спостерігається поступове зростання електроопору, яке пояснюється збільшенням розсіювання енергії електронів провідності у шарі Pt на фонах при підвищенні температури. Це відбувається в результаті збільшення амплітуди коливань атомів у вузлах кристалічної ґратки платини. При подальшому збільшенні температури термічної обробки спостерігається різке зростання опору, що може бути пов'язано з початком утворення неупорядкованої фази

$Al-FePt$, значення електроопору якої суттєво вище, в порівнянні з опором Pt , шар якої знаходився на поверхні досліджуваних плівкових композицій у вихідному стані.

Після термічної обробки до $\approx 280^\circ C$ на температурній залежності спостерігається перегин та поступове зменшення електроопору. Це може бути пов'язане із закінченням формування фази $Al-FePt$ та незначним впорядкування атомів цієї фази, що повністю корелює з результатами, отриманими методами рентгеноструктурного фазового аналізу та мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток. Окрім того, за попередніми результатами досліджень при даній температурі в структурі плівок спостерігається фаза Pt_2Tb , утворення якої також може впливати на поверхневий опір матеріалу. Також дану поведінку температурної кривої електроопору можна пояснити тим, що тербій при даній температурі дифундує в напрямку поверхні тонкоплівкової композиції $Pt/Tb/Fe$. Відомо, що електроопір Tb нижчий опору фази $Al-FePt$.

При температурі $400^\circ C$ поверхня плівки починає окиснюватись та оксид тербію, який дифундував на поверхню, повністю формується вже при $500^\circ C$, що може пояснити зростання електроопору на відповідній цим температурам ділянці графіку. Дане припущення також добре корелює з результатами рентгеноструктурного фазового аналізу.

Після термічної обробки до температури $550^\circ C$ та вище спостерігається різкий спад електричного опору, що може бути пов'язане з інтенсивним перебігом процесу впорядкування, яке обумовлює утворення магнітно-твердої фази $L1_0-FePt$. Окрім того, процес утворення впорядкованої фази в той самий час супроводжується повним розчиненням фази інтерметаліду Pt_2Tb , що також може впливати на поверхневий електроопір матеріалу плівки. Аналіз результатів рентгеноструктурного фазового аналізу тонкоплівкових композицій $Pt/Tb/Fe$ після відпалу при температурі $500^\circ C$ засвідчив початок утворення впорядкованої фази $L1_0-FePt$, а при $550^\circ C$ в структурі досліджуваних плівок припиняє існувати фаза Pt_2Tb . За розподілом хімічних елементів по товщині плівкових композицій

після термічної обробки при температурі 550 °C спостерігається майже повне перемішування Fe та Pt, що може свідчити про повну взаємну дифузію цих елементів та формування однорідної структури плівкового матеріалу.

3.4 Висновки до розділу 3

1. При відпалі до температури 280 °C перебіг процесів взаємної дифузії обумовлює формування хімічно неупорядкованої фази $Al-FePt$ з вихідних шарів окремих компонентів Fe та Pt. Подальше підвищення температури термічної обробки приводить до ініціалізації процесу впорядкування і утворення хімічно впорядкованої фази $L1_0-FePt$ вже при 500 °C.

2. Показано, що в температурному інтервалі 215 °C – 500 °C в структурі плівкової композиції Pt/Tb/Fe існує проміжна інтерметалідна фаза Pt_2Tb .

3. При відпалі у вакуумі за температури 280 °C тербій дифундує у напрямку поверхні плівкової композиції, а при подальшій термічній обробці до 400 °C окислюється з утворенням оксиду TbO_2 .

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНІЙ СИТУАЦІЇ

4.1 Мета розділу

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності. Охорона праці спрямована на зведення до мінімуму впливу об'єктивно існуючих виробничих небезпек і є невід'ємною частиною організації праці і виробництва. Основні положення про охорону праці визначені конституцією України, законом України «Про охорону праці» та іншими законодавчими і нормативно-технічними актами [35].

Тому метою цього розділу є аналіз небезпечних та шкідливих факторів, при яких виникає небезпека ураження організму, умов, що можуть привести до травмування в процесі дослідження закономірностей дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) при їх термічній обробці у вакуумі, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та безпеку у надзвичайних ситуаціях.

Одержання плівок проводилось за допомогою магнетронної установки (м. Аугсбург, Німеччина). Термічний відпал зразків проводився в камері вакуумного універсального посту ВУП-5М. Дослідження мікроструктури проведено на приладі Rigaku Ultima IV (КПІ ім. Ігоря Сікорського, кабінет № 103, корпус № 9), дослідження пошарового розподілу хімічних елементів за товщиною плівкового матеріалу проведено на приладі INA-X, SPECS GmbH, Berlin.

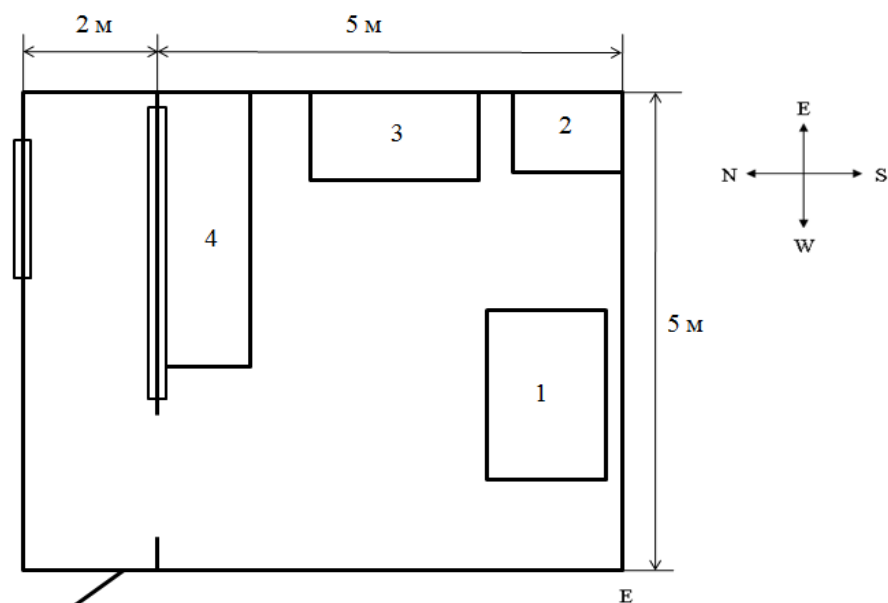
Робота була виконана у лабораторіях кафедри фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Аналізуючи умови праці при виконанні даної НДР потрібно розглянути наступні чинники: мікроклімат, шум, вібрації, освітлення, електричний струм,

випромінювання від комп'ютера.

4.2 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату в приміщенні

Науково-дослідницька робота виконувалась в центрі рентгеноструктурного аналізу Rigaku КПП ім. Ігоря Сікорського, кабінет № 103, корпус № 9. Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів представлено на рис. 4.1.



1) Установка Rigaku Ultima IV; 2) шафа; 3) робоче місце; 4) стіл

Рисунок 4.1 – Схема лабораторії рентгеноструктурного аналізу

Приміщення лабораторії має такі розміри:

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

Лабораторія, в якій працює двоє чоловік має площу 25 м^2 , об'єм $87,5 \text{ м}^3$.

Площа, яка приходить на одну людину – $12,5 \text{ м}^2$, об'єм $\sim 43,75 \text{ м}^3$.

Таким чином площа та об'єм лабораторії, згідно зі ГОСТ 12.2.032-78 [36], де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму відповідає нормам.

Для нормальної працездатності людини вагоме значення має чисте повітря, тому виконання НДР супроводжувалося дослідженням мікроклімату в приміщенні лабораторії.

Для забезпечення оптимального мікроклімату «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюють оптимальні і допустимі температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт (табл 4.1) [37].

Таблиця 4.1 – Мікроклімат лабораторії та ДСН 3.3.6.042-99 [37]

Період року	Категорія Робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с		Опалення	Вентиляція
		Факт.	Допуст.	Факт.	Допуст.	Факт.	Допуст.		
Холодний	Легка І б	24	20-24	65	<75	0,25	0,1-0,3	Водяне	Природна
Теплий		26	21-28	55	<65	0,25	0,1-0,3		

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 категорія важкості робіт – І б. Ця категорія містить легкі фізичні роботи до 150 ккал/год, які супроводжуються деякою фізичною напругою та виконуються сидячи, стоячи і роботи пов'язані з ходінням. Результати дослідження та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні лабораторії № 103 наведені в таблиці 4.1.

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

4.3 Аналіз освітлення приміщення лабораторії

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути: природним, що створюється прямими сонячними променями; штучним, що створюється електричними джерелами світла, та суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Природне і штучне освітлення в приміщеннях регламентується нормами ДБН В.2.5.28-2006 від характеристики зорової роботи, найменшого розміру об'єкта

розрізнення, розряду зорової роботи (I-VIII), системи освітлення, характеристики фону, контрасту об'єкта розрізнення з фоном.

У лабораторії здійснюється природне бокове освітлення (вікна з північного боку). Відстань до місця основної роботи складає 5 м. Виконувати роботу можна віднести до роботи середньої точності (IV розряд зорових робіт), так як мінімальні розміри об'єктів розпізнавання складають до 1 мм.

В лабораторії № 103 використовується система суміщеного освітлення – освітлення, при якому в світлий час доби використовується природне та штучне освітлення. При цьому, недостатнє, за умовами зорової роботи, природне освітлення доповнюється штучним, яке задовольняє ДБН В.2.5.28 -2006 [38].

4.3.1 Розрахунок природного освітлення

Основне розрахункове рівняння при боковому природному освітленні має вигляд [38]:

$$\frac{(100 \cdot S_0)}{S_n} = \frac{(e \cdot K_z \cdot \eta_0 \cdot K_{буд})}{\tau_0 \cdot r_1}, \quad (4.1)$$

де e – фактичне значення КПО;

S_0 – площа вікон;

S_n – площа підлоги;

K_z – коефіцієнт запасу, який приймається згідно табл. 3. Для приміщень з нормальними умовами середовища (кабінети, навчальні, житлові кімнати, лабораторії, читальні зали) дорівнює 1;

η_0 – світлова характеристика вікон (визначається з табл. Л.1) [38].

Відношення глибини приміщення до його висоти рівня умовної робочої поверхні до верха вікна: $5/(3,15-0,8) = 2,13$;

Висота верха вікна відносно підлоги дорівнює 3,15 м.

Умовна робоча поверхня дорівнює 0,8 м від підлоги.

τ_0 – загальний коефіцієнт світлопроникнення для бокового освітлення, який визначається за формулою:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (4.2)$$

де τ_1 – коефіцієнт світлопропускання матеріалу, який визначається з табл. Л.3. (0,8, оскільки в лабораторії подвійна рама);

τ_2 – коефіцієнт, який враховує втрати світла за рахунок віконних перетинів, який визначається за табл. Л.3 [38]. В даному випадку 0,7, оскільки рама дерев'яна, спарена;

τ_3 – коефіцієнт, який враховує втрати світла в несучих конструкціях і визначається за табл. Л.3 (при боковому освітленні $\tau_3 = 1$);

τ_4 – коефіцієнт, який враховує втрати світла за рахунок сонцезахисних пристроїв і визначається з табл. Л.4 [38]. Оскільки в лабораторії присутні регулюючі жалюзі, що складаються, то – 1.

$K_{буд}$ – коефіцієнт, який враховує затінювання вікон протилежними будинками, визначається з табл. Л.2 (1,2 тому, що $P/H_{буд}=30/18=1,7$, де: P – відстань між двома будинками)[38];

$H_{буд}$ – висота розміщення карнизу протилежного будинку над підвіконником вікна, що розглядається;

r_1 – коефіцієнт, який враховує підвищення КПО при боковому освітленні завдяки світлу, відбитого від поверхонь приміщення.

Значення коефіцієнта r_1 визначається за табл. Л.5 [38].

$\rho_{стелі} = 80 \%$; $S_{стелі} = 25 \text{ м}^2$; $\rho_{стін} = 50 \%$; $S_{стін} = 70 \text{ м}^2$; $\rho_{підлоги} = 30 \%$;
 $S_{підлоги} = 25 \text{ м}^2$.

$$\rho_{cp} = \frac{(\rho_{стелі} \cdot S_{стелі} + \rho_{стін} \cdot S_{стін} + \rho_{підлоги} \cdot S_{підлоги})}{(S_{стелі} + S_{стін} + S_{підлоги})} \quad (4.3)$$

$$\rho_{cp} = \frac{(0,8 \cdot 25 + 0,5 \cdot 70 + 0,3 \cdot 25)}{(25 + 25 + 70)} = 0,52.$$

Відношення відстані розрахункової крапки від зовнішньої стіни до глибини приміщення дорівнює 0,714.

Згідно таблиці Л.5 [38]: $r_1=2$

Визначимо загальний коефіцієнт світлопропускання вікон τ_0 :

$$\tau_0=0,8 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1=0,56 \quad (4.4)$$

З рівняння (4.1) знайдемо e :

$$e = \frac{(100 \cdot S_0 \cdot \tau_0 \cdot r_1)}{(S_n \cdot K_3 \cdot K_{\text{год}} \cdot \eta_0)} \quad (4.5)$$

Площа вікна дорівнює: $S_{\text{вікна}}=a \cdot b=2,7 \cdot 2,5=6,75 \text{ м}^2$

Площа підлоги $S_{\text{п}}$ становить: $S_{\text{п}} = a \cdot b = 5 \cdot 5 = 25 \text{ м}^2$.

Підставивши всі значення до формули (4.5), отримаємо:

$$e = \frac{100 \cdot 6,75 \cdot 0,56 \cdot 2}{25 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 15} = 1,68.$$

Розрахуємо нормоване значення КПО, e_n для нашого приміщення, за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (4.6)$$

де e_n – значення КПО за табл. 1 та 2. Для зорових робіт середньої точності e_n становить 1,5.

m_n – коефіцієнт світлового клімату за табл. 4 [38].

Природне освітлення потрапляє в лабораторію крізь бокові вікна зорієнтовані на південь.

m_n – для південної орієнтації вікон становить 0,85.

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

З розрахунків видно, що природне освітлення не зовсім достатнє, тому для забезпечення нормальної освітленості приміщення лабораторії на кожному столі потрібно встановити місцеве освітлення. В разі невідповідності освітлення встановленим нормам, у працівників при тривалій роботі виникають послаблення зору, головні болі, розсіяння уваги, що в свою чергу може призвести до неточностей у виконанні роботи.

4.3.2 Розрахунок штучного освітлення

Завдання світлотехнічного розрахунку системи штучного освітлення полягає у визначенні потужності джерел світла за заданою освітленістю, або у визначенні за даним розміщенням світильників і відомій потужності джерел світла освітленості на розрахунковій площині і розподілення яскравості в полі зору. Для розрахунку штучного освітлення використовують в основному три методи: світлового потоку (коефіцієнта використання), точковий та питомої потужності.

В даній роботі використаємо метод світлового потоку. Основне розрахункове рівняння має вигляд [39]:

$$F = \frac{E \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta}, \quad (4.6)$$

де F – світловий потік;

E – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

K – коефіцієнт запасу, що враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Коефіцієнт використання світлового потоку η визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення i , коефіцієнтів відбиття стін та стелі. Показник приміщення i вираховується за формулою:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)}, \quad (4.7)$$

де a і b – ширина і довжина приміщення, м;

h – висота світильника над робочою поверхнею, м.

Отже,
$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} = \frac{7 \cdot 5}{2,7 \cdot (7+5)} = 1,1$$

Користуючись даними табл. 13 [40] за умовою, що:

$\rho_{\text{стелі}} = 80\%$, $\rho_{\text{стіни}} = 50\%$, знаходимо: $\eta = 48\%$, або 0,48.

З рівняння (4.6) заходимо E :

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z}, \quad (4.9)$$

де F для ламп ЛБ = 3200 лм;

K = для ламп ЛБ становить 1,5.

Z = 1,1 для люмінесцентних ламп;

N = 6 шт.; n = 2 шт.; η = 0,48; S = 25 м²

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z} = \frac{3200 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,48}{1,5 \cdot 25 \cdot 1,1} = 446 \text{ лк.}$$

Згідно ДБН В.2.5–28–2006 норма освітлення становить 300 лк. Отримане значення E перевищує норму тобто, штучне освітлення є достатнім.

4.4 Виробничі випромінювання

Дані про виробничі випромінювання нормуються документом: "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" [41].

4.4.1 Випромінювання від рентгенівського дифрактометра

Рентгенівське випромінювання відноситься до електромагнітного випромінювання (фотонного), яке відтворюється при змінах енергетичного стану електронних оболонок атома, або при гальмуванні електронів з великою кінетичною енергією в електростатичному полі ядер (гальмове випромінювання). Рентгенівське випромінювання – короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі від 10 нм до 0,01 нм. Випромінені електрони прискорюються напругою 20-50 кВ [42].

Нагляд за дотриманням умов безпеки здійснює Держатомрегулювання безпосередньо або через утворені територіальні органи – державні інспекції з ядерної та радіаційної безпеки (ліцензіати). Ліцензіати забезпечують використання у радіоізотопній дефектоскопії тільки тих ДІВ, що відповідають вимогам Технічного регламенту закритих джерел іонізуючого випромінювання, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 05.12.2007 N 1382 (1382-2007-п) [43].

Джерелами іонізуючого випромінювання є всі рентгенівські апарати, у тому числі і рентгенівські дифрактометри. При закритих шторках вікон рентгенівської трубки дифрактометр є радіаційно-безпечним для обслуговуючого персоналу. Рентгенівський дифрактометр забезпечений поглинаючим рентгенівські γ -промені екраном зі скла, що містить солі свинцю. Радіаційний захист повинен забезпечуватися додатковими екранами так, щоб при будь-якому положенні співробітника між ним і вихідним вікном трубки, а також зразком обов'язково був захисний екран [42].

4.4.2 Випромінювання від ЕОМ

При роботі з електронно-обчислювальною технікою (ЕОМ), яка входить в устаткування, виникає небезпека впливу на організм робітника: невикористаного рентгенівського випромінення; ультрафіолетового випромінення; електростатичного поля.

Для попередження соматичних та генетичних наслідків у відповідності з СП 1960–79 [44] для побутової радіоелектронної апаратури (РЕА) встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання, яке не повинно перевищувати $2,78 \cdot 10^{-12}$ мкР/с (100 мкР/год) в будь-якій точці на відстані 5 см від зовнішньої поверхні, яка обернена до оператора. Потужність експозиційної дози в будь-якій точці простору на відстані 5 см від корпусу установки не повинна перевищувати 0,07 мкР/с при робочому тижні 41 год.

Враховуючи що робота більшою частиною проводиться за ЕОМ, запропоновано щоб час роботи за монітором не перевищував 4 години за зміну, з технологічними перервами.

4.5 Виявлення і аналіз наявності шуму, вібрації, інфра - та ультразвуку

Науково-дослідницька робота виконувалась на установці Rigaku Ultima IV, яка під час роботи не генерує шум та вібрації, а отже не перевищує встановлені норми. Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.037 – 99 [45].

4.6 Електричний струм

Електробезпека – це система організаційних і технічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики [46].

Рентгенівський апарат (рентгенівський дифрактометр) – це апарат з високою електричною напругою. Повністю зібраний рентгенівський

дифрактометр є електрично безпечним, так як всі струмоведучі частини як високої, так і низької напруги закриті і недоступні для дотику. Для забезпечення безпеки від ураження електричним струмом необхідно стежити, щоб були закриті всі стінки високовольтного блоку, щоб не було дефектів в кабелі, що живить рентгенівську трубку. Заборонено виконувати будь-які ремонтні роботи при включеному електричному колі [47].

У зв'язку з роботою із високовольтним струмом кожен рентгенівський апарат повинен бути заземлений.

Відповідно діючим правилам побудови електричних пристроїв ПУЕ-86 приміщення лабораторії за небезпекою електротравм відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки. Це сухі приміщення з оптимальною температурою повітря та струмонепровідною підлогою. Електричні пристрої, використані для виконання даної науково-дослідної роботи живляться напругою 220 В (Rigaku Ultima IV).

Причинами ураження електричним струмом є: поява напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки; пошкодження ізоляції (наприклад, розплавлений метал) та, як наслідок, доступність до струмоведучих частин обладнання; невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неухважність при роботі [46].

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

Основними технічними заходами щодо попередження електротравм при замиканнях на корпус є: періодична перевірка стану ізоляції (пропускання в двічі більшу напругу струму по ізоляційним проводам); недоступністю струмоведучих частин; правильно виконане захисне заземлення.

Згідно "Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення" (ГОСТ 12.1.030-81 [47]) граничне допустиме значення опору заземлення для

установки з напругою живлення вище 1000 В з ізольованою нейтраллю складає $R_n < 10,00 \text{ Ом}$. Грунт в місці розташування заземлюючого пристрою суглинок з питомим опором $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Тип заземлювача – вертикальні електроди та з'єднувальна полоса. Електроди стержневі та мають трубчасту форму, знаходячись в землі. З'єднувальна полоса – прут круглого перерізу в землі. Матеріал – сталь.

$$t = t_0 + \frac{l}{2} = 0,8 + 1,25 = 2,05 \text{ м}, \quad (4.10)$$

де l – довжина заземлювача, що дорівнює 2,5 м;

t – відстань від центру тяжіння електроду до поверхні землі.

Визначимо розрахунковий питомий опір землі за формулою:

$$\rho = \rho_{\text{вим}} \cdot \psi = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (4.11)$$

де $\rho_{\text{вим}}$ – вимірний питомий опір землі;

ψ – розрахунковий кліматичний коефіцієнт.

В досліджуваних умовах $\psi = 1,5$ та $\rho_{\text{вим}} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Опір одного заземлювача визначається формулою:

$$R_{3l} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{l}{2} \cdot \ln\left(\frac{(4t+1)}{(4t-1)}\right) \right], \text{ Ом}. \quad (4.12)$$

Значення параметрів добирається з позицій раціональності (при цьому для заземлювачів такого типу вводяться деякі обмеження: $t_0 > 0,8 \text{ м}$ та $d > 0,01 \text{ м}$). В якості вертикальних електродів вибирають стержні з параметрами:

Внаслідок розрахунку маємо:

$$R_{3I} = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 2,5}{0,02} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{(4 \cdot 2,05 + 1)}{(4 \cdot 2,05 - 1)} \right) \right] = 53,86 \text{ Ом.}$$

Необхідну кількість електродів визначаємо за формулою (для випадку паралельного з'єднання електродів):

$$n' = \frac{R_{3I}}{R_{ш} \cdot \eta_{\varepsilon}} = 9 \text{ шт,} \quad (4.13)$$

де η_{ε} – коефіцієнт використання електродів, якій враховує їх взаємне екранування, прийmemo його рівним 0,6;

$R_{ш}$ – припустимий опір всіх вертикальних електродів, 10 Ом.

За відповідними таблицями визначаємо фактичний коефіцієнт використання електродів η_{ε} для співвідношення $a/l = 1$: $\eta_{\varepsilon} = 0,6$.

Визначимо довжину горизонтального електроду, що застосовується для зв'язку вертикальних електродів враховуючи, що вертикальні електроди розташовані в ряд:

$$L = 1,05 \cdot a \cdot (n' - 1) = 1,05 \cdot 1 \cdot (9 - 1) = 8,4 \text{ м.} \quad (4.14)$$

Опір розтіканню струму цього електроду визначаємо за формулою:

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \cdot \ln \left(\frac{2L^2}{d \cdot t_0} \right), \quad (4.15)$$

$$R_r = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,4} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot (8,4)^2}{0,02 \cdot 0,8} \right) = 25,8 \text{ Ом.}$$

Враховуючи все це, еквівалентний опір розтікання струму штучного заземлювача визначається за формулою:

$$R'_{31} = \frac{R_{31} \cdot R_r}{R_{31} \cdot \eta_r + R_r \cdot n' \cdot \eta_B}, \quad (4.16)$$

$$R'_{31} = \frac{53,86 \cdot 25,8}{53,86 \cdot 0,38 + 25,8 \cdot 9 \cdot 0,6} = 8,7 \text{ Ом},$$

де η_r – коефіцієнт використання горизонтального електроду з врахуванням вертикальних електродів; з визначаємо, що $\eta_r = 0,38$.

З розрахунку можна бачити, що $R'_{31} < R$ ($8,7 < 10$), тобто опір, розрахований вище, повністю відповідає ГОСТ 12.1.030-81 [47].

4.7 Забезпечення безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям

Події, при яких порушуються нормальні умови життя і діяльність людей та які можуть призвести, або призводять до загибелі людей та значних матеріальних збитків називаються надзвичайними ситуаціями. Вагомість надзвичайної ситуації визначається передусім кількістю жертв та ступенем впливу на оточуюче середовище.

Цивільний захист забезпечується з урахуванням особливостей, визначених Законом України "Про основи національної безпеки України", суб'єктами, уповноваженими захищати населення, території, навколишнє природне середовище і майно, згідно з вимогами Кодексу цивільного захисту - у мирний час, а також в особливий період - у межах реалізації заходів держави щодо оборони України [48].

Під час виконання науково-дослідницької роботи можливе виникнення наступних надзвичайних ситуацій: пожежі, вибуху, землетрусу, аварії на електроенергетичних системах, раптового руйнування будівлі.

Проаналізуємо імовірність виникнення пожежі (1 класу надзвичайних ситуацій) в приміщенні та засобів її запобігання.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 приміщення лабораторії 103-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії наявні негорючі, процес обробки котрих супроводжується виділенням тепла). У приміщенні найбільш пожежонебезпечним місцем є місце де розміщено електроустановки, комп'ютерну техніку, місце де прокладена електропроводка. Пожежа у лабораторії може виникнути за наступними причинами: порушення технологічного режиму; несправність електроустаткування; необережне звертання з вогнем; ремонт устаткування на ходу; неправильне користування устаткуванням [49].

На випадок пожежі в лабораторії є водопровід, вогнегасник вуглекислотоброметиловий ОУБ-3 (ГОСТ 111564-65), а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б, пожежні крани. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (оповісник КИ-1).

План евакуації в разі виникнення пожежі наведено на рисунку 4.3

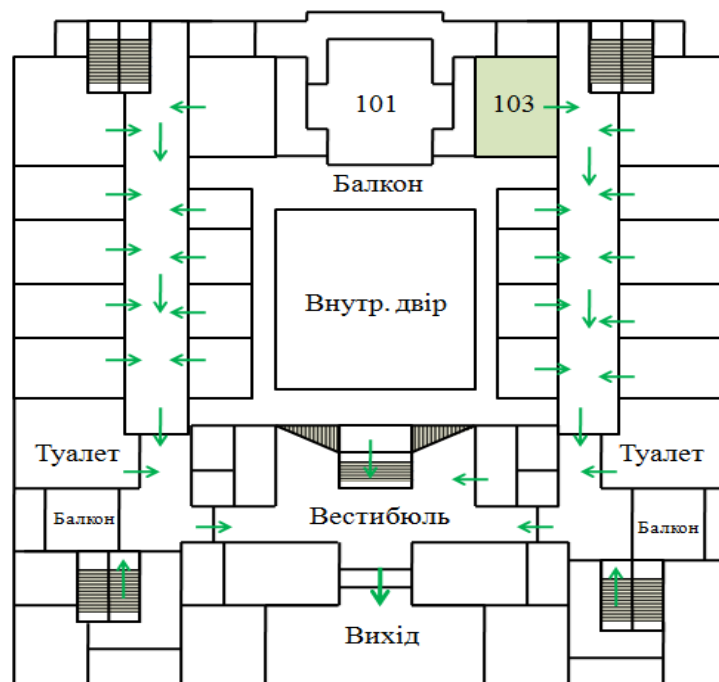


Рисунок 4.3– План евакуації під час пожежі

Основними заходами профілактики пожежної безпеки є: регулярна перевірка працездатності засобів гасіння пожежі і систем пожежної сигналізації; перевірка справності електричної проводки; щорічне випробування опору ізоляції підвищеною напругою близько 500 В; обережне відношення з легкозаймистими речовинами [47].

4.8 Висновки до розділу 4

Визначено, що мікроклімат, склад повітря робочої зони, рівні шуму та вібрацій, виробничі випромінювання та електробезпека в лабораторії при дослідженні закономірностей дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) при їх термічній обробці у вакуумі відповідають нормам чинних нормативних документів. Виявлено, що природне освітлення лабораторного приміщення є недостатнім, тому для забезпечення нормальної освітленості застосовано додаткове штучне освітлення.

Таким чином можна зробити висновок, що мікроклімат, рівень шуму, вібрацій та випромінювання, організація робочого місця, освітлення, в лабораторії відповідає вимогам санітарних норм.

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

В ідеї проекту лежить створення новітніх тонкоплівкових магнітних матеріалів, використання яких в якості носія магнітного запису може забезпечити досягнення надвисоких щільності запису і стабільності зберігання даних.

Потенційним товаром даного стартап проекту є нанорозмірні плівкові композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) осаджені на підкладки термічно окисленого монокристалічного Si(001) після відпалу у вакуумі (рис. 5.1).

Дослідження даних плівкових композицій ще триває, тому не можливо дати повної інформації щодо ринкової спроможності. Однак в перспективі використання даних плівкових композицій може знизити вартість одиниці об'єму інформації.

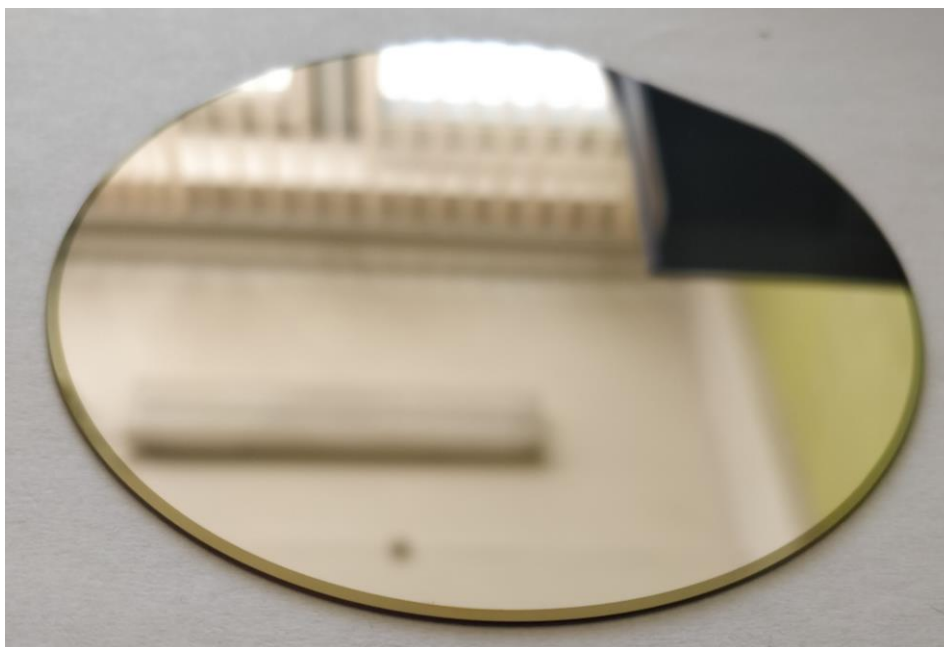


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд нанорозмірних плівкових композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂(100 нм)/Si(001)

Вивчення фізичних властивостей феромагнітних нанорозмірних плівок сприяє вирішенню фундаментальних проблем фізики магнітних явищ, розвитку теорії феромагнетизму. Дослідження нанорозмірних плівок дозволяє отримувати нову і цінну інформацію про магнітні властивості феромагнетиків, поглиблювати знання з багатьох питань в області магнетизму. Наприклад, вивчення тонких плівок істотно розширило уявлення про фізичну природу анізотропії феромагнетиків, дозволило виявити і досліджувати різноманітні процеси перемагнічування, нові фізичні явища. Також дуже важливо, що в плівках можна реалізувати структурні стани, які важко або неможливо отримати в матеріалах звичайних (масивних або об'ємних) розмірів. Це істотно розширює можливості дослідження зв'язку між фізичними властивостями і структурними характеристиками магнітних матеріалів. Вивчення фізичних властивостей тонких феромагнітних плівок також актуально з точки зору їх практичного застосування в мікроелектроніці та обчислювальній техніці. Найважливішим застосуванням плівок є їх потенційне використання в якості магнітного середовища для запису і зберігання інформації в запам'ятовуючих пристроях. Магнітні плівки мають особливості, завдяки яким їх використання сприяє підвищенню щільності запису інформації і швидкодії запам'ятовуючих пристроїв (табл. 5.1 – 5.2).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка нових матеріалів, перспективних для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю	1. Інформаційно-комп'ютерні технології	Створення все більш мініатюрних жорстких дисків, на яких при цьому можливе зберігання все більших об'ємів даних.
	2. Технології магнітного запису	

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			
		Наш проект	Конкурент 1 Seagate Technology	Конкурент 2 Western Digital	Конкурент 3 Toshiba
Економічні показники					
1	Собівартість плівкової композиції	дешевший	дорожчий	дорожчий	дорожчий
		S	W	W	W
2	Вартість обслуговування установки для осадження	Висока	Висока	Висока	Висока (вартість безпосередньо установки + ремонт)
		N	N	N	W
3	Витратні матеріали під час осадження	Необхідні	Необхідні	Необхідні	Необхідні
		N	N	N	N
5	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N
6	Вартість установки для запису інформації	Мінімальна (стандартне устаткування)	Висока вартість	Висока вартість	Висока вартість
		S	W	W	W
8	Екологічність (обсяг відходів)	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали (стрічка)
		W	W	W	W

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

В таблиці 5.3 представлені існуючі технології магнітного запису. Магнітний запис є способом запису інформації шляхом зміни магнітного стану носія і створення у ньому розподілу намагнічування, яке відповідає сигналу, що записується.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Технологія 1 (технології повздовжнього запису)	Технологія існує	Доступна
Технологія 2 (технології перпендикулярного запису)	Технологія існує	Доступна
Технологія 3 (технології термоактивованого запису)	Технологія потребує розроблення для даного конкретного випадку	Зараз не доступна, існують прототипи
Технологія 4 (Черепичний магнітний запис)	Технологія потребує розроблення для даного конкретного випадку	Зараз не доступна

За результатами аналізу таблиці 5.3 можна зробити висновок, що в майбутньому можливо технологічно реалізувати проект, але потрібне ще проведення досліджень, тому що об'єкт дослідження (нанорозмірні композиції Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм), які представлені у магістерській дисертації) – це мала частина досить складного механізму (жорсткого диску). Відповідно, за допомогою перпендикулярного магнітного запису можливо було спробувати записати інформацію на диск, який виготовлений з нанорозмірних композицій Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм) на підкладках SiO₂(100 нм)/Si(001) після термічної обробки.

Аналітична компанія Trendfocus оприлюднила попередні результати дослідження світового ринку жорстких дисків за перший квартал 2018 року. Продажі жорстких дисків істотно скоротилися. Якщо в жовтні-грудні 2017 року виробники поставили в цілому 105 млн жорстких дисків, то в січні-лютому 2018 року випустили близько 94-95 млн штук. Причому спад стався як в споживчому, так і корпоративному сегментах [50].

Згідно витягів з дослідження Statista GmbH, після рекордного 2010 року, за підсумками якого на світовий ринок було поставлено понад 650 млн жорстких дисків, світова індустрія практично безперервно звітує скороченням показників в натуральному вираженні. Як очікувалось, за підсумками 2017 року глобальні поставки не перевищили 395 млн шт., а в 2018 році глобальний ринок стиснеться до 370 млн шт. (рис. 5.2) [51].

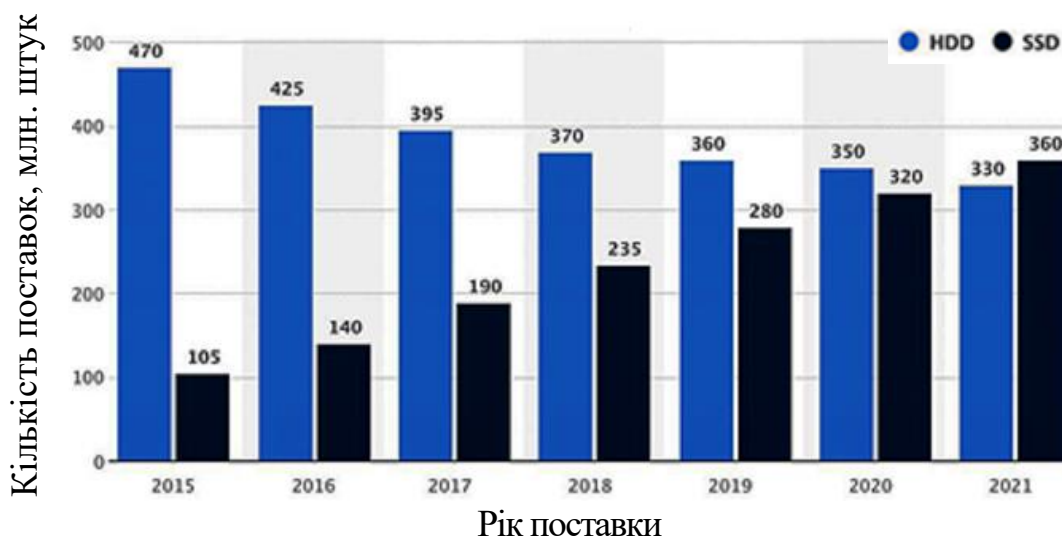


Рисунок 5.2 – Світові поставки HDD та SSD дисків з 2015 року по 2021 рік [51]

У сегменті корпоративних HDD зберігається тривалий спад, викликаний збільшенням попиту на більш продуктивні аналоги. До 2015 року їх продажі становили до 8 млн штук за квартал, але за останні два роки реалізація скоротилася до 5 млн – 6 млн примірників. Більш того, в 2018 році очікується зниження квартальних продажів до 4 млн штук.

До початку 2018 року на ринку жорстких дисків залишилися всього три виробники: Seagate, Western Digital, Toshiba (табл. 5.4). Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту представлена в таблиці 5.5.

Найбільші країни-постачальники: за даними IHS ISuppli на осінь 2011 року Таїланд виробляє близько 25% всіх жорстких дисків у світі, і є другим за величиною виробником після Китаю.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Виробництвом жорстких дисків зараз займаються всього чотири компанії : 1)Seagate Technology, 2)Western Digital, 3)Toshiba
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2017 рік	395 млн. од. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В 2018 році випуск комп'ютерних жорстких дисків впаде до 370 млн/штук.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку)	> 1

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Стабільність зберігання інформації на жорстких дисках.	Юридичні особи (компанії), які виготовляють жорсткі диски: - Western digital technologies inc; - Seagate; - Hitachi; - Toshiba; - SanDisk;	Стандарти, Технічні регламенти, Специфікації, Обсяги закупок, Умови експлуатації	Розміри продукту Геометрія продукту Собівартість Час експлуатації Вимоги до складу Ліцензія
2	Збільшення щільності запису інформації на диск з малими розмірами	- Kingston Technology; - Sony Computer Entertainment; - Transcend; -Samsung.		

Окрім того, можливим є поява як факторів-загроз проекту, так і факторів, що нададуть нових можливостей (табл. 5.6 – 5.7).

Таблиця 5.6 – Фактори загроз стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність політичної та економічної ситуації	Зменшення фінансування та попиту	Застосування короткострокових стратегій. Приймання участі у програмах, в тому числі міжнародних, задля залучення додаткових інвестицій
		Зменшення паливних, енергетичних та матеріально-технічних ресурсів	Перехід на інші види опалення, залучення додаткових інвестицій

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів	Збільшення обсягу виробництва
2	Зменшення розміру	Принципово нові можливості виготовлення комп'ютерів та смартфонів нового покоління	Збільшення обсягу продажу
3	Збільшення щільності запису інформації		

Ступеневий аналіз конкуренції та SWOT- аналіз проекту представлено в таблицях 5.8 та 5.9 відповідно.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Міжнародна	Зменшення витратних матеріалів	Збільшення обсягу виробництва
2. Зменшення розміру	Принципово нові можливості виготовлення комп'ютерів та смартфонів нового покоління	Збільшення обсягу продажу.
3. Збільшення щільності запису інформації		

Таблиця 5.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту – розроблення новітніх нанорозмірних плівок для використання в якості носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю

<p>Сильні сторони: Внутрішніми перевагами стартап-проекту, а саме використання нанорозмірних плівок в якості носіїв надщільного магнітного запису, є те що впорядкована фаза $L1_0$-FePt володіє високими значеннями коерцитивної сили та магнітокристалічної анізотропії, що дозволяє навіть при екстремально малих зернах забезпечити високу термічну стабільність носія інформації.</p>	<p>Слабкі сторони: Внутрішніми недоліками стартап-проекту є те, що потрібно проводити велику кількість додаткових досліджень, так як у магістерській дисертації були опрацьовані тільки структурно-фазові властивості конкретного плівкового матеріалу. Також необхідно вирішити ряд технологічних проблем; знайти завод, який зможе виготовляти дані нанорозмірні плівки.</p>
<p>Можливості: Стартап-ідея спрямована на розроблення нанорозмірних плівок, які можуть забезпечити високу щільність запису інформації на жорстких дисках.</p>	<p>Загрози: Виготовлення нанорозмірних плівок, дослідження фізичних характеристик, стартовий капітал для виробництва, знаходження інвесторів і ще багато чинників, які можуть привести до збоїв в процесі впровадження у масове виробництво.</p>

Дослідження даних плівкових композицій ще триває, тому неможливо надати повну інформацію щодо ринкової спроможності та створити маркетингову модель товару. Дисертаційна робота була спрямована на дослідження фундаментальних явищ, а саме виявлення температурних інтервалів існування фаз в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Tb/Fe. Феромагнітний сплав Pt/Fe з додатковим шаром Tb є тільки перспективним матеріалом для використання в якості середовища магнітного запису інформації, і наразі тільки використовується у дослідницьких цілях.

5.2 Висновки до розділу 5:

1. Показано, що не зважаючи на спадаючу динаміку продажів жорстких дисків, ринок буде існувати достатньо довго. Актуальність використання жорстких дисків забезпечується рядом значних переваг (довготривалість експлуатації, надійність збереження даних та можливість їх відновлення) над продуктом-конкурентом (твердотільні носії інформації).

2. Перспективність впровадження визначається можливістю значно підвищити щільність магнітного запису інформації при порівняно невисокій вартості, та, як наслідок, зменшення вартості одиниці об'єму пам'яті.

ВИСНОВКИ

1. Нанорозмірні плівкові композицій на основі Fe/Pt, які мають в своїй структурі хімічно впорядковану фазу $L1_0$ -FePt, є перспективним матеріалом для використання в якості носія інформації надщільного магнітного запису. Це обумовлюється високою коерцитивною силою, енергією магнітокристалічної анізотропії, термічною стабільністю, які характерні для даної фази.

2. Досліджено температурні інтервали фазових перетворень в нанорозмірних плівкових композиціях Pt(15 нм)/Tb(10 нм)/Fe(15 нм)/SiO₂. За даними резистометричного, рентгеноструктурного фазового та пошарового хімічного аналізів визначено, що в досліджуваному плівковому матеріалі після відпалу у вакуумі при температурі 280 °C формується неупорядкована фаза $A1$ -FePt, з якої в результаті подальшого підвищення температури термічної обробки при 500 °C утворюється впорядкована фаза $L1_0$ -FePt.

3. Показано, що після відпалів у вакуумі при температурі 215 °C в структурі досліджуваних плівкових композицій формується інтерметалід Pt₂Tb, який при підвищенні температури до 550 °C повністю розчиняється. Платина переходить в шар заліза з утворенням впорядкованої фази $L1_0$ -FePt, а тербій дифундує в напрямку поверхні та окислюється.

4. За температури термічної обробки 280 °C тербій утворює сегрегаційні шари на поверхні плівкових композицій. Після підвищення температури відпалу до 400 °C Tb на поверхні окислюється та утворюється оксид TbO₂.

5. Показано, що мікроклімат, організація робочого місця, освітлення, рівень шуму та вібрації в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. Запропоновано заходи для уникнення травмування в процесі виконання даної науково-дослідницької роботи.

6. Розроблений стартап-проект показав економічну доцільність проведених досліджень та переваги жорстких дисків, що використовують тонкі плівки на основі Fe/Pt над існуючими на ринку носіїв інформації продуктами-конкурентами.

CONCLUSIONS

1. Fe/Pt-based thin films with $L1_0$ -FePt chemically ordered phase are promising material for use as a superdense magnetic recording media. This is due to high coercivity, magnetocrystalline anisotropy energy and thermal stability of this phase.
2. Annealing to the temperature of 280 °C contributes to the processes of mutual diffusion cause the formation of a chemically disordered phase $A1$ -FePt from the initial layers of the individual components of Fe and Pt. A further temperature increasing lead to the initialization of the ordering process and the chemically ordered phase $L1_0$ -FePt formation at 500 °C already.
3. In the temperature range of 215 °C to 500 °C in the structure of Pt/Tb/Fe film composition there is Pt_2Tb intermetal phase.
4. At annealing in a vacuum at 280 °C temperature the terbium moving to the surface of the film composition direction, and at further heat treatment to 400 °C TbO_2 oxide is formed.
5. It has been shown that the microclimate, workplace organization, lighting, noise and vibration level in the laboratory meet the health standards requirements. Measures to avoid injury in the research process is proposed.
6. The startup project has shown the feasibility of research and the benefits of hard drives using Fe/Pt thin films over rivals present on the information carriers market.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Евстигнеева Т.Л. О фазах в системе Pt-Fe / Т.Л. Евстигнеева // Вестник Отделения наук о Земле РАН, 2009. – № 1. – С. 1–3.
2. Muller M. Atomistic Computer Simulations of FePt Nanoparticles: Thermodynamic and Kinetic Properties / M. Muller // Material- und Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation, – 2007. – 190 p.
3. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices / S. Sun, C.B. Murray, D. Weller, et al. // Science, 2000. – V. 287. – 1989 p.
4. Sun S. Recent advances in chemical synthesis, self-assembly, and applications of FePt nanoparticles / S. Sun // Adv. Mater, 2006. – V. 18. – 393 p.
5. Kozłowski M. Kinetics of structural transformations in bulk and nano-layered intermetallic systems with $L1_0$ superstructure / M. Kozłowski // Jagiellonian University Institute of Physics. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, 2010. – 105 p.
6. Карпенков С.Х. Технические средства информационных технологий: учебное пособие / С.Х. Карпенков. – 3-е изд., испр. и доп. – М.–Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 376 с.
7. Анисимов Д. Индустрия жестких дисков: дальше – больше / Д. Анисимов, Е. Патий // Экспресс Электроника, 2007. – № 3.
8. Иванов О.А. Определение константы анизотропии и намагниченности насыщения и магнитные свойства порошков железоплатинового сплава / О.А. Иванов, Л.В. Солина, В.А. Демшина, Л.М. Магат // ФММ, 1973. – Т. 35. – № 1. – С. 92–97.
9. High K/sub u/materials approach to 100 Gbits/in/sup 2/ / D. Weller, A. Moser, L. Folks, et al. // IEEE Trans. Magn., 2000. – V. 36. – P. 10 – 15.

10. Магнитная вращающаяся анизотропия в поликристаллических пленках FePt, полученных методом твердофазного синтеза / В.С. Жигалов, В.Г. Мягков, Л.Е. Быкова, и др. // Физика твердого тела, 2018. – Т. 60. – № 1. – С. 175 – 179.

11. Карпенков С.Х. Технические средства информационных технологий / С.Х. Карпенков. – М: Directmedia, 2015. – С. 121–122.

12. Optimization of $L1_0$ -FePt/MgO/CrRu thin films for next-generation magnetic recording media / R. Fernandez, N. Amos, C. Zhang, B. Lee, S. Khizroev // Thin Solid Films, 2011. – Vol. 519, № 22. – P. 8053–8057.

13. Исследования тонких пленок FePt, синтезированных методом последовательного распыления / А.С. Камзин, Е.В. Снеткова, З. Янг, Ф. Вей, В. Хианг // Письма в ЖТФ, 2008. – Т. 34, № 1, С. 57 – 64.

14. Elimination of impurity phase formation in FePt magnetic thin films prepared by pulsed laser deposition / Y. Wang, R. Medwal, N. Sehdev, et al. // Appl. Surf. Sci., 2014. – V. 288. – P. 381 – 391.

15. Wang L.W. Promotion of [001]-oriented $L1_0$ -FePt by rapid thermal annealing with light absorption layer / L.W. Wang, W.C. Shih, Y.C. Wu, C.-H. Lai // Appl. Phys. Lett., 2012. – V. 101. – 252403 p.

16. Interplay between structural and magnetic properties of $L1_0$ -FePt(001) thin films directly grown on MgO(001) / B. Laenens, F. M. Almeida, N. Planckaert, et al. // J. Appl. Phys., 2009. – V. 105. – P. 073 913 – 073 919.

17. Magnetic anisotropy and order structure of $L1_0$ -FePt (001) single-crystal films grown epitaxially on (001) planes of MgO, SrTiO₃, and MgAl₂O₄ substrates / A. Hotta, T. Ono, M. Hatayama, K. Tsumura, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, T. Shimatsu // J. Appl. Phys., 2014. – V. 115. – 712 p.

18. High coercivity $L1_0$ -FePt films with perpendicular anisotropy deposited on glass substrate at reduced temperature / J.S. Chen, B.C. Lim, J.F. Hu, et al. // Appl. Phys. Lett., 2007. – V. 90. – 42 508 p.

19. Granz S.D. Granular $L1_0$ -FePt (001) thin films for heat assisted magnetic recording / S.D. Granz, M.H. Kryder // J. Magn. Magn. Mater., 2012. – V. 324. – P. 287.

20. Камзин А.С. Влияние отжига во внешнем магнитном поле на микроструктуру и магнитные свойства многослойной системы Fe/FePt/Pt / А.С. Камзин, F.L. Wei, В. Ганеев, Л.Д. Зарипова // Физика твердого тела, 2012. – Т. 54, № 6. – С. 1096 – 1102.

21. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices / S. Sun, C.B. Murray, D. Weller, L. Folks, A. Moser // Science. 2000. – V. 5460, № 287. – P. 1989–1992.

22. Управление ориентацией намагниченности в пленках $L1_0$ FePt с помощью отжига в магнитном поле в области температуры Кюри / А.С. Камзин, J.W. Сао, В. Ма [и др.] // Физика твердого тела, 2015. – Т. 57. – № 9. – С. 1728 – 1735.

23. Формування хімічно впорядкованої фази $L1_0$ (FePt) в нанорозмірній плівковій композиції $Fe_{50}Pt_{50}$ (15 нм)/Au(30 нм)/ $Fe_{50}Pt_{50}$ (15 нм) при відпаді в вакуумі / Ю.М. Макогон, О.П. Павлова, С.І. Сидоренко, Т.І. Вербицька, М.Ю. Вербицька, О.В. Фігурна // Металофізика і новітні технології. – 2014. – №9. – С. 17–33.

24. Петухов В.Ю. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок / В.Ю. Петухов, Г.Г. Гумаров // Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета, 2010. – 87 с.

25. Математическое моделирование технологических процессов (моделирование в среде Mathcad, практикум) [Электронный ресурс]: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/nikonenko/lab1/theory.asp> – Назва з екрану.

26. Хейкер Д.М. Рентгеновская дифрактометрия / Д.М. Хейкер, Л.С. Зевин; под. ред. Г.С. Жданов. – М. : Физматгиз, 1963. – 380 с.

27. Шалыгина Е.Е. Исследование тонких пленок FePt / Е.Е. Шалыгина, Л.В. Козловский, Ду Саньбо. – М. : Весник МГУ, 1999. – №5. – С. 3–5.
28. Minh P.T.L. Structure and magnetic properties of thin FePt alloy films / P.T.L. Minh, N.P. Thuy, N.D. Van, N.T.N. Chan // J. Magn. Magn. Mater., 2002. – V. 239. – 335 p.
29. Маллер Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кеймнис. – М. : Мир, 1989. – 630с.
30. Барабаш Р.И. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Рентгенография металлов». Раздел «Методы рентгеноструктурного анализа поликристаллов» для студентов специальностей инженерно-физического факультета / Р.И. Барабаш, О.Г. Пахаренко, Е.В. Иващенко, В.Г. Тиняев. – К. : КПИ, 1989. – 60с.
31. Покоев А.В. Особенности рентгенографического исследования объёмной диффузии в поликристаллах / А.В. Покоев. – М. : Мир, 1980. – 243 с.
32. Горелик С.С. Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М. : Metallurgia, 1970. – 366 с.
33. Батурин В.А. Масс-спектрометрия вторичных нейтральных частиц (обзор) / В.А. Батурин, С.А. Еремин // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008. – № 7. – С. 87 – 107.
34. Батурин В.А. Масс-спектрометр вторичных нейтралей на базе ионного имплантера / В.А. Батурин, С.А. Еремин, С.А. Пустовойтов // Вопросы атомной науки и техники, 2006. – № 5. С. 222 – 224.
35. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці: навчальний посібник / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигирей, О.В. Мельников – 4-те вид., доп. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
36. Машков Ю.К. Физические методы анализа материалов: Учеб. Пособие / Ю.К. Машков, К.Н.Полещенко, А.Л. Агафонов, М.Ю. Байбарацкая. - Омск: Изд-во СибАДИ, 2003.- 111 с.

37. ДСН 3.3.6.042-99 – Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

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

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

40. Електричне освітлення та опромінення [Текст] : методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету енергетики та автоматики / Національний університет біоресурсів і природокористування України ; уклад. Л. С. Червінський [та ін.]. - К. : Видавничий центр НУБіП України, 2014. - 59 с.

41. НРБУ-97– Норми радіаційної безпеки України. Розробник: Міністерство охорони здоров'я України, Комітет з питань гігієнічного регламентування, Національна комісія з радіаційного захисту населення України. Затверджено: Міністерство охорони здоров'я України, наказ від 14.07.1997 р. № 208. Введені в дію Постановою Головного державного санітарного лікаря України Першого заступника міністра охорони здоров'я України від 01.12.1997 р. № 62 з доповненням: ДГН 6.6.1- 6.5.061-2000 Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000).

42. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М. та ін. За ред. В. Ц. Жидецького. – Львів, Афіша, 2000. – 352 с.

43. Про затвердження Вимог та умов безпеки (ліцензійних умов) під час провадження діяльності з використання джерел іонізуючого випромінювання у радіоізотопній дефектоскопії / Держатомрегулювання України; Наказ від 21.09.2010 № 121.

44. Санитарные правила работы с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения: СП 1960-79 – [Чинний від 1979-01-19].– 19 с.

45. ДСН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – К. – 1999.
46. Методические указания по курсу „Електробезпеку” / Р. В. Сабарно, В. В. Зацарний. – Київ: КПИ, 1983. – 55 с.
47. ГОСТ 12.1.030-81 – Електробезпеку. Захисне заземлення. Занулення
48. Кодекс цивільного захисту України, затверджений Верховною Радою України від 02.10.2012р. № 5403-VI.
49. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 – Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
50. На рынке жестких дисков зафиксирован ощутимый спад [Електронний ресурс]: <http://www.dailycomm.ru/m/43284/> – Назва з екрану.
51. Рынок жестких дисков продолжает сокращаться под натиском SSD [Електронний ресурс]: http://ko.com.ua/rynok_zhestkih_diskov_prodolzhaet_sokras_hhatsya_pod_natiskom_ssd_122734 – Назва з екрану.

ДОДАТОК А

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу

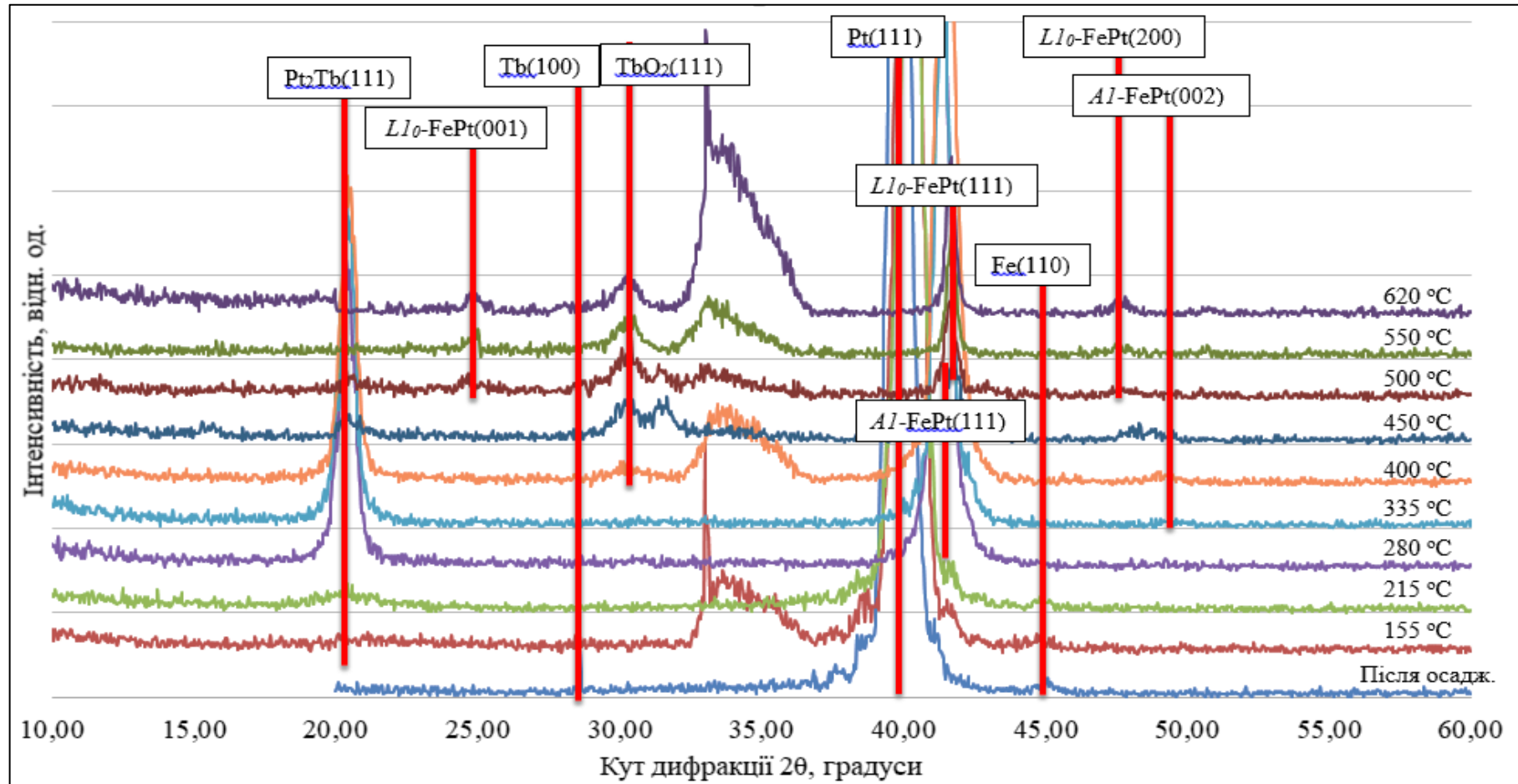


Рисунок А.1 – Дифрактограми тонкоплівкових композицій Pt/Tb/Fe/SiO₂/Si(001) після осадження та відпалу в температурному інтервалі 155 °C – 620 °C