

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Іван ПРОЦЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр
зі спеціальності 171 – Електроніка
освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»
на тему: **МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИЛАДОВИХ**
ПЛІВКОВИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ Co I Ag

Здобувача групи ЕП-81 Одаренка Юрія Володимировича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Юрій ОДАРЕНКО

Керівник, доцент кафедри
електроніки, загальної та прикладної
фізики, д.ф.-м.н., професор

Ігор ШПЕТНИЙ

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«03» червня 2023 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Одаренка Юрія Володимировича

Тема роботи **Магніторезистивні властивості приладових плівкових структур на основі Co і Ag**

затверджена наказом по університету від «02» червня 2023 р., № 0621-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 16 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета). На момент постановки задачі кваліфікаційної роботи багатьма дослідниками був накопичений значний експериментальний матеріал стосовно вивчення магніторезистивних властивостей магнітних плівкових систем та їх взаємозв'язку з структурним станом. У літературі переважно приведені результати вивчення магнітоопору гранульованих плівок з товщиною $d \geq 100$ нм. Однак, у плівках з товщинами менше 100 нм існують певні особливості магніторезистивних властивостей, про що свідчать дослідження. У зв'язку з цим мету роботи можна сформулювати таким чином: вивчення і аналіз літературних даних про дослідження магніторезистивних властивостей плівкових магнітних систем на основі Co і Ag товщиною $d < 100$ нм у їх взаємозв'язку з структурним станом, а також вивчення галузей застосування гранульованих магнітних систем у сенсорній техніці.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Типи магнітних наносистем.

2. Фізичний зміст явищ гігантського та анізотропного магнітоопору у плівках.

3. Особливості магніторезистивних властивостей плівок на основі Co і Ag (літ. огляд).

4. Структурно-фазовий стан плівкових систем на основі Co і Ag.

5. Застосування плівкових наноструктур, що характеризуються явищами гігантського та анізотропного магнітоопору у спінтроніці.

6. Методика і техніка експерименту.

7. Аналіз результатів дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків на основі Co та Ag.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд № 1. Актуальність та мета роботи.

Слайд № 2. Типи магнітних наносистем.

Слайд № 3. Фізичний зміст явищ гігантського та анізотропного магнітоопору у плівках.

Слайд № 4. Порівняння явищ ГМО та АМО у плівкових матеріалах

Слайд № 5. Магнітні, магніторезистивні властивості та структурно-фазовий стан плівкових сплавів на основі Co та Ag (літературний огляд)

Слайд № 6. Галузі застосування наноматеріалів з магніторезистивними ефектами.

Слайд № 7. Методика і техніка експерименту.

Слайди 8-9. Аналіз результатів дослідження магніторезистивних властивостей плівкових структур на основі Co та Ag.

Слайд 10. Висновки.

6. Дата видачі завдання 03.06.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 07.06.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Вивчення методик отримання зразків та дослідження їх магніторезистивних властивостей, аналіз результатів дослідження.	до 13.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 15.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	22.06.2023 р., 13-30 – 14-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Одаренко Ю.В.

Науковий керівник

Шпетний І.О.

АНОТАЦІЯ

Обсяг роботи: 38 сторінок, 20 рисунків, 1 таблиця, 27 використаних джерел.

Актуальність теми роботи. У 21 сторіччі акцент дослідників в різних напрямках науки та галузях промисловості (особливо це актуально для електроніки, біомедицини) постійно зміщується в бік так званих «нанорозмірних» об'єктів. Інтерес до нанорозмірних матеріалів обумовлений їх незвичайними, «унікальними» властивостями, які можливі внаслідок прояву розмірних ефектів. Актуальність дослідження властивостей цих структур пов'язана з перспективою подальшого їх застосування в сенсорній електроніці, наноелектроніці, можливістю їх практичного застосування як магнітних елементів у різноманітних пристроях зберігання та обробки інформації, датчиках руху або зміни величини і напряму магнітного поля тощо. Незважаючи що з моменту відкриття ефекту ГМО пройшло вже більше 30 років, у літературі до сих пір з'являються нові публікації стосовно вивчення магнітотранспортних властивостей у магнітних плівкових системах.

Мета роботи полягає у вивченні і аналізі літературних даних про дослідження магніторезистивних властивостей плівкових магнітних систем на основі Co і Ag, обробці результатів комплексних досліджень магнітоопору та структурно-фазового складу зразків сплавів товщиною $d=35$ нм, а також вивчення галузей застосування гранульованих магнітних систем у сенсорній техніці.

Методи: під час виконання роботи використовували вакуумний універсальний пост ВУП-5М, просвічуючий електронний мікроскоп ПЕМ-125К, автоматизований комплекс для дослідження магніторезистивних властивостей плівок з максимальною напруженістю поля 0,45 Тл.

Отримані результати: У результаті проведених комплексних досліджень магніторезистивних властивостей у поєднанні з дослідженням структури і фазового складу невідпалених зразків товщиною 35 нм плівкового сплаву на

основі Co і Ag було встановлено таке. Зразки плівкового сплаву з малим вмістом кобальту ($c_{Co}=20$ ат.%) характеризуються структурним станом, при якому реалізується суперпарамагнітна поведінка магнітоопору. При зростанні концентрації кобальту у сплаві до $c_{Co}=39$ ат.% досягається поріг структурної перколяції гранул кобальту. Величина ГМО для такого зразка має найбільше значення, а саме 7,2% у поперечній та 6,8 % у поздовжній геометрії вимірювання. При збільшенні концентрації кобальту у зразку до 80 ат.% зразок характеризується анізотропним магнітоопором, а величина магнітоопору зменшується до 0,12%.

Рекомендації щодо використання: Отримані результати дослідження можуть бути використані у плівковому матеріалознавстві та у технологічних основах процесів виготовлення елементів сенсорів для подальшого вдосконалення технологій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНІЗОТРОПНИЙ МАГНІТООПІР, ЕФЕКТ ГМО, ГРАНУЛЬОВАНИЙ СТАН, СЕНСОР, СПІН-ЗАЛЕЖНЕ РОЗСІЮВАННЯ, СПІН-КЛАПАН

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ...	7
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН МАГНІТНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ.....	8
1.1. Основні типи наноматеріалів.....	8
1.2. Фізичний зміст явищ гігантського та анізотропного магнітоопору у плівкових системах.....	12
1.3. Результати дослідження магніторезистивних властивостей, структурного стану та фазового складу магнітних плівкових систем на основі Co та Ag (літературний огляд).....	16
1.4. Застосування магнітних тонких плівок.....	22
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	24
2.1. Методика отримання плівкових зразків.....	24
2.2. Методика дослідження структурного стану та фазового складу плівкових систем методом просвічуючої електронної мікроскопії.....	25
2.3. Методика дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків.....	27
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИВЧЕННЯ МАГНІТООПОРУ ТА СТРУКТУРНОГО СТАНУ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Co ТА Ag.....	30
3.1 Дослідження магнітоопору плівок сплавів на основі Co та Ag.....	30
3.2 Дослідження структури та фазового складу плівок сплавів на основі Co та Ag.....	31
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	36

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ГМО – гігантський магнітоопір;

МО – магнітоопір;

АМО – анізотропний магнітоопір;

ПЕМ – просвічуюча електронна мікроскопія;

ФМ – феромагнетик;

ДМ – діамагнетик;

СПМ – суперпарамагнітний матеріал;

$T_{\text{відп.}}$ – температура відпалювання;

$T_{\text{вимір.}}$ – температура вимірювання;

$T_{\text{п}}$ – температура підкладки;

СЗРЕ – спін-залежне розсіювання електронів;

МРЕ – магніторезистивний ефект;

ТП – тонка плівка;

МП – магнітне поле;

СДВП – середня довжина вільного пробігу.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРНО-ФАЗОВИЙ СТАН МАГНІТНИХ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ

1.1. Основні типи наноматеріалів

У наш час стрімко розвиваються нанотехнології. Фізика наноматеріалів розвивається швидше порівняно з іншими областями сучасної фізики твердого тіла. Інтерес до вивчення фізичних властивостей наноматеріалів пов'язаний як з принципово новими фундаментальними науковими проблемами і фізичними явищами, так і з перспективами створення на основі вже відкритих явищ абсолютно нових квантових пристроїв і систем з великими функціональними можливостями для електроніки нового покоління. Елементна база будується на використанні різноманітних низькорозмірних структур. Вона є найбільш перспективною для електронної техніки нових поколінь.

Особливу увагу дослідників привертають штучно створені нанорозмірні структури, у яких реалізуються надзвичайні фізичні властивості [1, 2]. Дана особливість наноматеріалів робить їх перспективними у практичному використанні в електроніці, спінтроніці. Актуальність дослідження властивостей цих структур пов'язана з перспективою подальшого їх застосування в сенсорній електроніці, наноелектроніці, можливістю їх практичного застосування як магнітних елементів у різноманітних пристроях зберігання та обробки інформації, датчиках величини та напряму магнітного поля [3]. Серед структур, які використовують як чутливі елементи приладів спінтроніки, використовують багатошарові плівки, спін-вентильні структури, мультишари, плівкові сплави, нанодроти.

Особливе місце посідають системи із спін-залежним розсіюванням електронів [4-6]: зокрема багатошарові плівкові системи (мультишари, спін-клапани), що складаються з почергових магнітних та немагнітних шарів та магнітні плівкові сплави з ознаками гранульованого стану (рис.1.1). У таких

системах реалізуються унікальні магнітні та магніторезистивні властивості, зокрема ефект гігантського магнітоопору.

У магнітних багатошарових структурах (рис.1.1 а) феромагнітні шари розділені шарами немагнітного матеріалу. Товщина кожного шару становить від 1 до 10 нм, а кількість шарів може змінюватися від 3 і до 100, а іноді і більше. Як феромагнітні шари використовують метали Co, Ni, Fe та сплави на їх основі. Немагнітні шари виготовляють з перехідних немагнітних або благородних металів.

Найбільш перспективною у застосуванні є так звана структура «спін-клапанного типу». Ця структура складається з двох магнітних шарів (наприклад, Fe та Co) та немагнітного прошарку (Cu, Ag), що послаблює їх обмінну феромагнітну взаємодію (рис.1.1 б).

Третій тип – це гранульовані магнітні плівкові системи. Такі системи отримують одночасною конденсацією компонентів при випаровуванні із незалежних випарників у вакуумі. Гранульованими магнітними плівками можна назвати гетерогенні плівкові системи на основі феромагнетиків, що являють собою ансамблі магнітних наночастинок (Co, Fe, Ni) в немагнітній матриці діамагнітного (наприклад Cu) або парамагнітного (Re) матеріалу (рис. 1.1 в). Гранульовані матеріали характеризуються такими основними параметрами: об'ємною або атомарною часткою компонентів, функцією розподілу частинок за розміром і хімічним складом.

Залежно від того, які компоненти входять до складу гранульованої плівки, їх можна умовно поділити на дві групи. Якщо до складу гранульованої системи входять лише метали (наприклад, кобальт і мідь, або кобальт і срібло), то це - *металеві* гранульовані матеріали. Якщо ж один з компонентів є оксидом або діелектриком, то такі матеріали називають *керметами*.

Змінюючи концентрацію компонентів гранульованої плівки і розмір гранул [7], вдається маніпулювати його фізичними властивостями – магнітними, магніторезистивними, магнітооптичними.

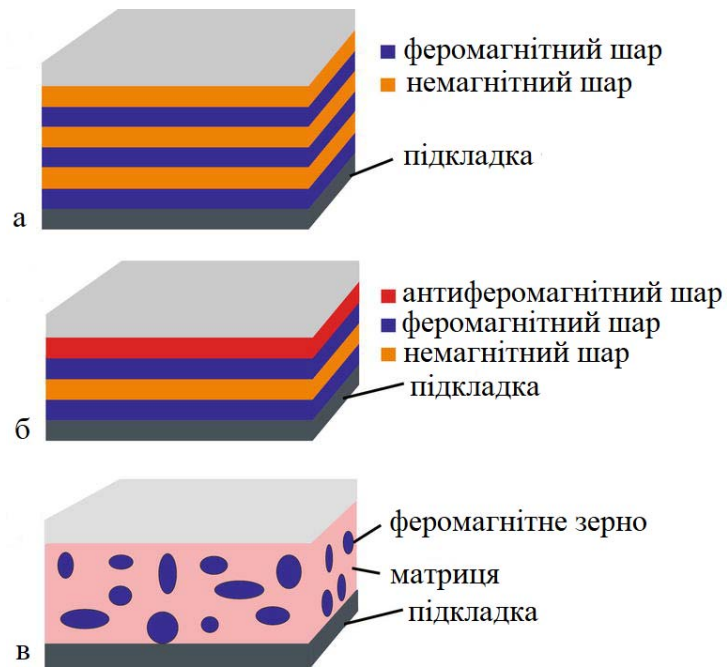


Рисунок 1.1 – Типи плівкових наноматеріалів: а – мультишарова плівка, б – спін-кляпанна структура, в – гранульована система. Адаптовано з [6]

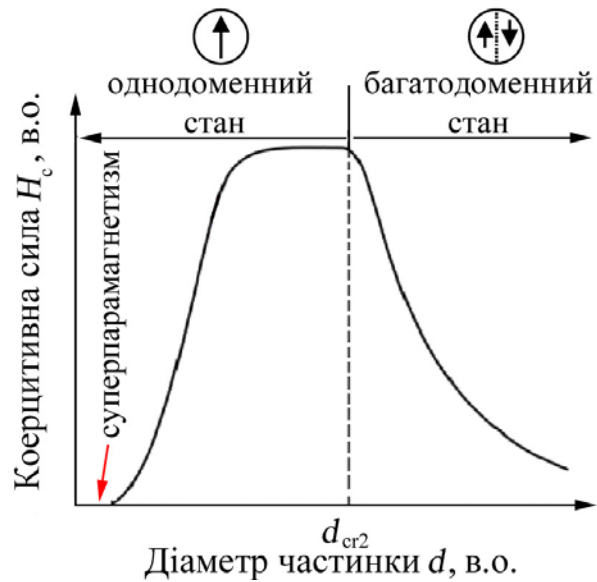


Рисунок 1.2 – Залежність коерцитивної сили від розміру гранул. Адаптовано з [7]

Так, наприклад, можна впливати на провідність системи - збільшуючи концентрацію металу у керметі можна змінити провідність від металевої до діелектричної.

З точки зору магнетизму - для магнітних гранульованих ТП можна умовно виділити три області: суперпарамагнітну, феромагнітну і перехідну [7]. Залежно від цього можна змінити властивості зразка від ГМО (для області однодоменних гранул) - до АМО (для багатодоменних гранул та суцільної феромагнітної плівки). Слід зазначити, що зазвичай [7] розміри гранул у гранульованих ТП змінюються у межах 2 – 50 нм. Розмір гранул у плівці визначається методом осадження і умовами, а також подальшою обробкою [6].

Оскільки структура гранульованих плівок дуже чутлива до технологічних параметрів, необхідно постійно проводити ретельний контроль цих параметрів. Треба постійно слідкувати за швидкістю напilenня, тиском в камері під час розпилення, температурою підкладки. Особливістю формування гранульованих плівок є необхідність вибору компонентів, що не розчиняються один у одному і не змішуються між собою. Тому існує лише обмежена кількість пар метал-метал, котрі дозволяють сформувати гетерогенні гранульовані структури.

У випадку металевих гранульованих магнітних плівок вибирають такі пари феромагнітний-немагнітний метал, у яких взаємна розчинність елементів відсутня або незначна. До таких гранульованих плівок можна віднести сплави тих же феромагнітних перехідних металів (Co, Fe, Ni) і немагнітних металів (Cu, Ag, Au). Ці метали практично не розчиняються один в одному і не змішуються.

Слід зазначити, що найбільш «класичною» з точки зору гранульованих магнітних металевих систем є система, де гранули кобальту розміщені у матриці срібла, що саме розглядається у даній кваліфікаційній роботі.

Гранульовані магнітні плівкові системи знайшли застосування при виготовленні приладів спінтроніки.

1.2. Фізичний зміст явищ гігантського та анізотропного магнітоопору у плівкових системах

Відомо, що транспортні властивості металів визначаються СДВП електронів під дією електричного поля. При внесенні таких матеріалів у МП їх опір змінюється, оскільки під дією сили Лоренца електрони рухаються по гвинтових траєкторіях, що збільшує вірогідність зіткнень. Даний ефект визначає магнітоопір провідних матеріалів – т.з. магніторезистивний ефект.

Магніторезистивний ефект – це відносна зміна електричного опору металевих провідників при включенні зовнішнього магнітного поля [8, 9]. Для визначення МО зазвичай використовують співвідношення:

$$MO = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R_0}{R_0} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

де $R(H)$ – опір зразка залежно від прикладеного поля H ;

R_0 – опір зразка за відсутності магнітного поля.

Розглядаючи магніторезистивний ефект, слід згадати про магніторезистивний ефект у немагнітних твердих тілах і кристалах з магнітним порядком [8]. Для немагнітних металів МРЕ незначний; наприклад, для міді він становить величину 10^{-4} .

У феромагнітних матеріалах розрізняють два типи магнітоопору, величина яких більше 1% при кімнатній температурі - анізотропний і гігантський магнітоопір.

Ефект ГМО. Одним з найцікавіших властивостей деяких магнітних матеріалів з погляду фундаментальної фізики й практичного користування є ефект ГМО [10]. Історично першим ефект ГМО був відкритий у багатошарових плівкових системах [11]. Такі багатошарові магнітні системи складаються із двох і більше шарів феромагнетика, між якими шар немагнітного матеріала. У таких

структурах ефект ГМО зумовлений спіновою залежністю розсіювання електронів провідності від типу магнітного впорядкування суміжних шарів у плівці. Принцип реалізації явища ГМО у багатошарових плівках визначається так званим $s - d$ обміном. Даний ефект полягає у взаємодії делокалізованих електронів, що переносять заряд, з локалізованими, що відповідають за формування магнітних моментів. Слід відмітити, що ГМО ефект реалізується лише в системах, де є $3d$ – метали та сплави на їх основі.

Ефект ГМО вперше був відкритий у 1988 році для мультишарів двома незалежними групами дослідників під керівництвом П. Грюндберга та А.Ферта [11]. Було встановлено, що у мультишаровій плівці, у якій чергувалися шари Fe і Cr спостерігалися аномальні значення магнітоопору (до 50 % та вище). Такий ефект був названий гігантським магнітоопором і у подальшому був відкритий у ряді магнітних плівкових систем.

Ефект ГМО у багатошаровій плівці можна виміряти за допомогою електричного струму, що протікає у площині тонкоплівкового зразка (СВП – геометрія) або перпендикулярно до неї (СПП – геометрія) (рис. 1.3).

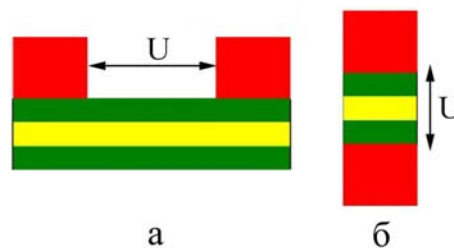


Рисунок 1.3 – Геометрії проходження струму у зразку при вимірюванні магнітоопору багатошарової плівки: СВП (а) та СПП (б) конфігурації. Адаптовано з [12]

При геометрії СВП прикладений електричний струм переважно протікає паралельно до площини шарів. СВП геометрію реалізувати простіше, і вона використовується у більшості функціональних структур.

У гранульованих магнітних сплавах ефект ГМО був відкритий дещо пізніше – у 1992 році – вченими Дж.К. Ксіао [13] та А.Е. Берковітцем [14].

Ефект ГМО в гранульованих плівках – це ефект, який реалізується при розсіюванні електричного струму на феромагнітних гранулах, що знаходяться в немагнітній матриці.

У гранульованих магнітних системах (рис.1.4) зовнішнє магнітне поле вирівнює магнітні гранули у певному напрямку (рис. 1.5). Розглянемо поведінку векторів поля без внесення зразка у поле та при внесенні у поле.

При відсутності магнітного поля (при $H = 0$) (рис.1.5 а), вектори намагніченості гранул розміщені у довільному напрямку.

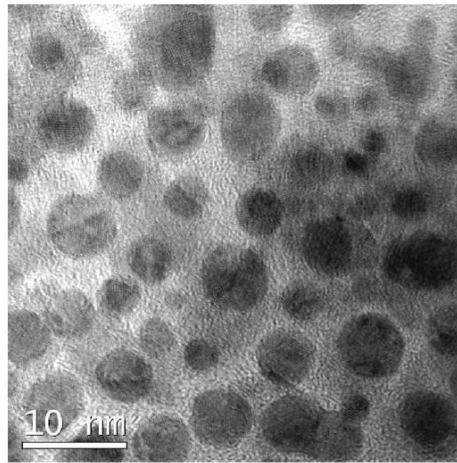


Рисунок 1.4 – Зображення наноструктури, отримане методом просвічуючої електронної мікроскопії від термостабілізованої при $T_{\text{відп.}} = 570 \text{ K}$ гранульованої плівки на основі Co і Ag при $c_{\text{Co}} = 14 \text{ ат.}\%$ [20]

При проходженні електрона через такі зразки відбувається розсіювання заряду на гранулах, у яких напрямок магнітного моменту не співпадає з напрямом спіну електрона. Відповідно, відбувається багато актів розсіювання і електричний опір у даному випадку має велике значення.

При внесенні зразка у зовнішнє магнітне поле з напруженістю $H = H_{\text{насич.}}$ (рис. 1.5 б) відбувається вирівнювання у деякому напрямі магнітних моментів гранул. При русі електронів через гранули, у яких напрям магнітного моменту співпадає з напрямом спіну електрона, відбувається менше актів розсіювання і буде зменшення опору.

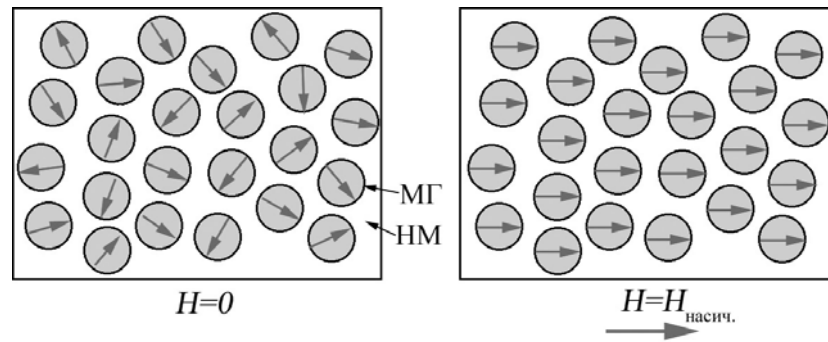


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення впливу прикладеного зовнішнього магнітного поля на орієнтацію вектора намагніченості у гранульованих магнітних матеріалах. Адаптовано з [10]

Окрім явища ГМО у плівках спостерігається і ефект АМО – анізотропний магнітоопір. Природи ГМО та АМО ефектів різні.

Анізотропний магнітоопір. У 1857 році англ. учений В. Томсон провів дослідження і помітив, що опір зразка в зовнішньому магнітному полі, залежить від взаємного розташування вектора намагніченості в зразку й напрямку струму [15]. Було встановлено, що опір зразка збільшується, у випадку якщо струм протікає паралельно вектору намагніченості, і зменшується при перпендикулярній взаємній орієнтації струму й намагніченості (рис.1.6). АМО ефект ще називають ефектом орієнтації.

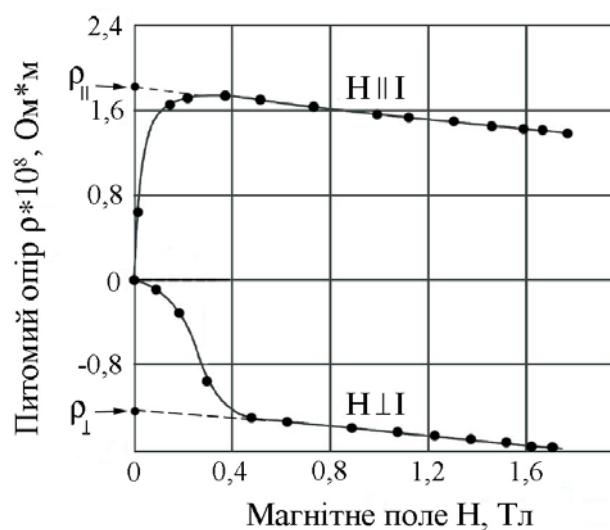


Рисунок 1.6 – Польова залежність питомого опору при вимірюваннях у перпендикулярній та поздовжній геометріях. Адаптовано з [16]

Ефект анізотропного магнітоопору - це індукований струмом магнітоопір. Він існує у феромагнітних металах, таких як Ni, Co або Fe при прикладанні поля H . Фізичне походження ефекту є спін-орбітальна взаємодія на 3d-орбіталах, спричинена прикладеним магнітним полем. АМО характеризується значно меншою амплітудою, ніж ефект ГМО. Величина АМО зростає з ростом товщини плівки. У таблиці 1.1 приведений порівняльний аналіз явищ ГМО та АМО.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика ГМО та АМО. Адаптовано з [16]

Гігантський магнітоопір	Анізотропний магнітоопір
Спостерігається в тонких структурах феромагнетик/немагнітний метал	Спостерігається в об'ємному феромагнітному матеріалі та тонких плівках
Диференційне sd-розсіювання	Спін-орбітальна взаємодія
Не залежить від взаємної орієнтації струму I та намагніченості M	Залежить від взаємної орієнтації струму I та намагніченості M
Максимум магнітоопору – 170 %	Максимум магнітоопору – 3,5%
Опір завжди зменшується під дією поля	Опір може збільшуватися або зменшуватися в зовнішньому магнітному полі

Дослідженню ефекту АМО у тонкоплівкових системах присвячена велика кількість робіт [16-18].

1.3. Результати дослідження магніторезистивних властивостей, структурного стану та фазового складу магнітних плівкових систем на основі Co та Ag (літературний огляд)

Для інтерпретації і аналізу власних експериментальних досліджень було проведено огляд та аналіз результатів досліджень іншими науковцями для гранульованої плівкової системи на основі Co та Ag.

Як можна побачити із діаграми стану (рис. 1.7), система Co і Ag є двокомпонентною. У даній системі компоненти не розчиняються один в одному. В умовах рівноваги не існує стабільних твердих розчинів.

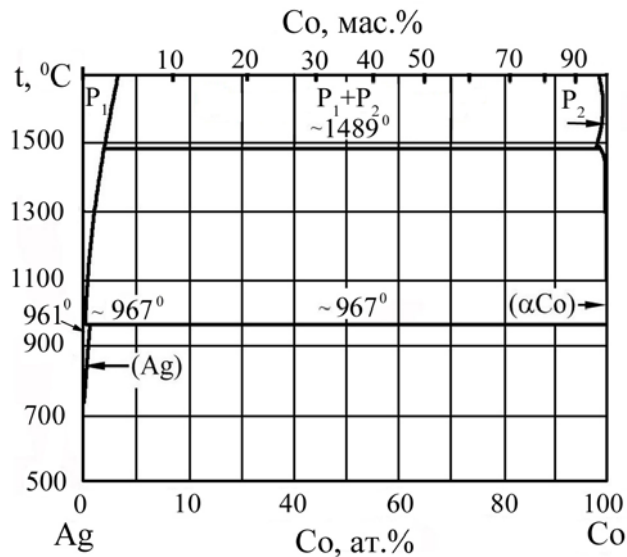


Рисунок 1.7 – Діаграма стану систем Co-Ag [19]

У такій системі може утворюватися гранульована структура. Між компонентами існує чітка межа поділу, оскільки вільна поверхнева енергія Co дорівнює $2,71 \text{ Дж/м}^2$, а у Ag - $1,3 \text{ Дж/м}^2$. Тобто відмінність становить 2 рази, через що відбувається формування гранул майже сферичної форми з чітким інтерфейсом.

Відомо, що фізичні властивості матеріалів дуже залежать від їх структури, хімічного та фазового складу. Для інтерпретації результатів дослідження таких властивостей потрібно проаналізувати їх структурний стан та фазовий склад. Найчастіше вивчення структури, фазового складу, елементний аналіз проводять методами просвічуючої або растрової електронної мікроскопії або рентгенівської дифракції. Проведемо огляд результатів досліджень інших авторів для системи на основі Co і Ag.

У роботі [20] приведено результати досліджень структурно-фазового стану зразків плівкових сплавів на основі Co і Ag товщиною $d = 450 \text{ нм}$ з концентраціями $c_{\text{Co}} = 14 \text{ ат.}\%$, $18 \text{ ат.}\%$ та $27 \text{ ат.}\%$.

Вивчення структури показало, що у невідпалених зразках при малих концентраціях Co структурний стан відповідав: гранули Co розміщувалися у матриці Ag. При цьому розмір гранул становив $L = 1-3$ нм (при $c_{Co} = 14$ ат.%). Відстань між гранулами велика, а відповідно непрямі магнітні взаємодії між гранулами слабкі. Відпалювання зразків при 570 К призвело до збільшення розміру гранул кобальту внаслідок коаліценсії до $L = 3-8$ нм.

Автори [21] провели комплексні дослідження структурного стану, магнітних та магнітотранспортних властивостей гранульованих плівок сплавів на основі Co і Ag товщиною $d = 100$ нм при концентрації кобальту $c_{Co} = 11,8 - 21,1$ ат.%. Методом ПЕМ було встановлено, що структурний стан плівок сплавів відповідав гранулам Co з середнім розміром 3,92; 4,71; 5,24; 6,40 нм (для плівок з концентраціями $c_{Co} = 11,8; 15,0; 19,0; 21,1$ ат.%, відповідно), що знаходилися у матриці Ag (рис.1.8).

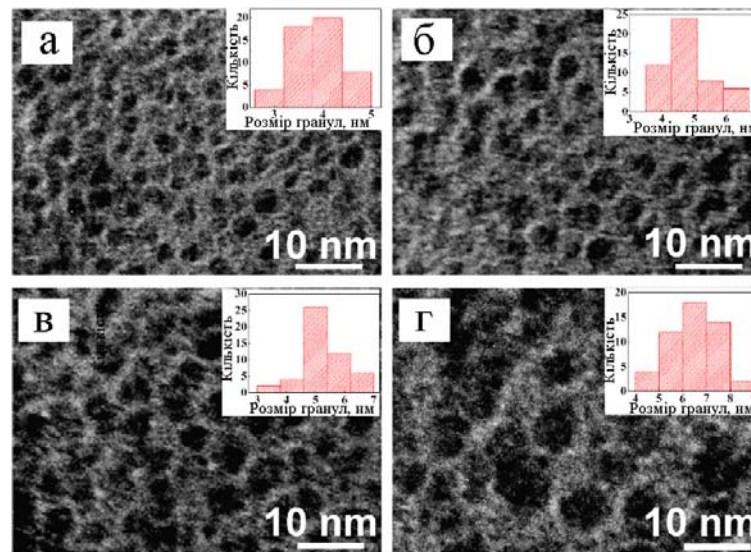


Рисунок 1.8 – Наноструктура невідпалених зразків плівкових сплавів Co_xAg_{100-x} товщиною $d = 100$ нм при $x = 11,8$ (а), 15,0 (б), 19,0 (в), 21,1 ат.% (Г). Адаптовано з [21]

Автори [22] описали у своїх дослідженнях про незмішуваність компонентів плівкового зразка на основі Co і Ag та утворення гранульованої структури з чіткими межами розділу.

Розглянемо результати вивчення магнітоопору плівкової системи на основі Co і Ag. Варто зазначити, що у літературі зазвичай приведені результати досліджень магнітоопору плівок товщинами $100 < d < 1000$ нм. Так, наприклад, у роботі [23] досліджено, проаналізовано та встановлено основні закономірності магнітних і магніторезистивних властивостей зразків плівкового сплаву $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$ товщиною $d = 310$ нм. Показано, що магніторезистивні властивості плівок залежать від концентрацій компонентів. Дуже важливим параметром для магнітотранспортних властивостей є поріг структурної перколяції гранульованої плівки. Встановлено, що максимальна величина ГМО гранульованої плівки відповідає концентрації кобальту у сплаві що є дещо меншим за поріг структурної перколяції.

У роботах багатьох авторів відмачається залежність магніторезистивних властивостей гранульованих магнітних систем від товщини зразків.

Так, автори роботи [24] провели комплексні дослідження магніторезистивних, магнітних властивостей та структурно-фазового стану гранульованих плівок на основі Co і Ag товщинами $20 \leq d \leq 85$ нм та концентраціями кобальту $15 \leq c_{\text{Co}} \leq 80$, c_{Co} - ат.%. У цій роботі авторами досліджено вплив складу та товщини плівки сплаву на основі Co і Ag_x на структуру плівки, намагніченість та магнітоопір. Встановлено, що розмір зерен Co корелює з товщиною зразка для плівок з $d = 20$ нм, а суперпарамагнітний стан гранул Co зберігається до $c_{\text{Co}} \leq 55$ ат.%. Встановлено, що у гранульованих плівках коефіцієнт ГМО зростає із збільшенням товщини плівки. Крім того, залежність намагніченості від товщини плівки вказує на те, що мікроструктура тонких плівок відрізняється від мікроструктури товстих плівок.

У роботі [25] автори дослідили структурні, магнітотранспортні та магнітні властивості свіжосконденсованих гранульованих тонких плівок товщиною 20 нм на основі Co та Ag у широкому діапазоні концентрацій компонентів: $17 \leq c_{\text{Co}} \leq 89$, де c_{Co} атомна концентрація Co у відсотках. Зразки були отримані методом одночасного випаровування у вакуумі з використанням двох незалежних електронно-променевих гармат.

Проведено кореляцію між структурно-фазовим станом, магнітотранспортними та магнітними властивостями. Поріг структурної перколяції у гранульованих плівках спостерігався у плівкових сплавах з концентрацією кобальту $c_{Co} \approx 60$ ат.%. При концентрації нижче $c_{Co} < 64$ ат.% плівки мали фазовий склад ГЦК-Ag + ГЦП-Co і характеризувалися ефектом гігантського магнітоопору.

Максимальні значення магнітоопору при цьому у поперечній та поздовжній геометрії вимірювання відповідно становили 7,2% та 7,5% і спостерігалися при концентрації кобальту у сплаві $c_{Co} = 55$ ат.%. Для більш високих концентрацій ($c_{Co} > 70$ ат. %) плівки характеризувалися анізотропним магнітоопором, який, як передбачалося, асоціюється з появою феромагнітних взаємодій між гранулами кобальту.

У роботі [26] було досліджено зв'язок між поведінкою магнітоопору та структурним станом у сплавах Co-Ag для невідпалених та термостабілізованих зразків з різною концентрацією компонентів.

На рис. 1.9 представлено результати вивчення магнітоопору та намагніченості зразків даної плівкової системи залежно від концентрації магнітної компоненти у них.

Як видно з рис.1.9 - зі зменшенням концентрації кобальту у сплаві крива намагніченості змінюється від феромагнітної до парамагнітної природи. Магнітні та магніторезистивні властивості тісно пов'язано з структурним станом плівок.

Аналіз взаємозв'язку магніторезистивних, магнітних властивостей плівкового сплаву та розміру гранул кобальту показав, що ефект ГМО виникає через розсіювання електронів провідності у внутрішньому об'ємі гранул кобальту.

У інших роботах показано, навпаки, що розсіювання яке впливає на ефект ГМО, відбувається переважно не у об'ємі гранули, а переважно на межі поділу гранули з магнітного матеріалу і матриці з немагнітного матеріалу.

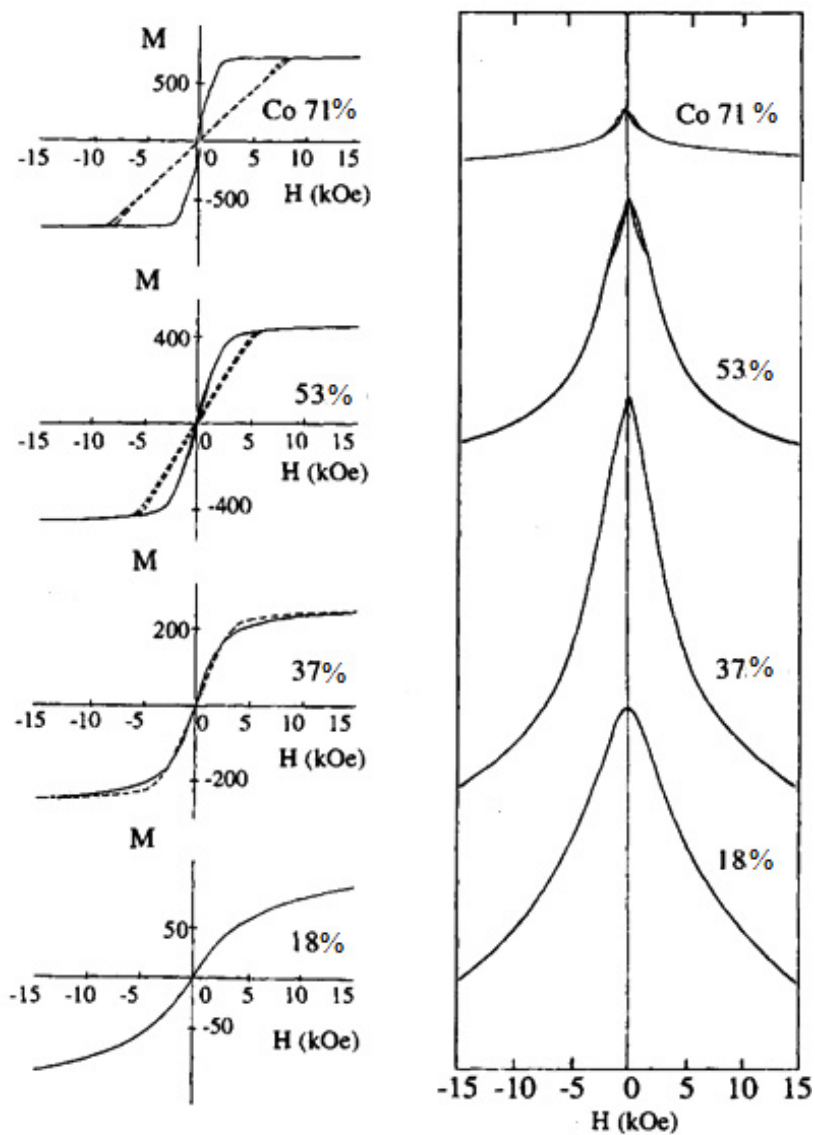


Рисунок 1.9 - Залежність намагніченості та магнітоопору зразків від концентрації Co в сплаві на основі Co та Ag [26]

1.4. Приклади застосування плівкових наноструктур, що характеризуються явищами гігантського та анізотропного магнітоопору у спінтроніці

Ефекти ГМО та АМО знайшли широке прикладне застосування у спінтроніці при виготовленні сенсорів величини та напрямку магнітного поля, у автомобільній електроніці при виготовленні безконтактних датчиків кута повороту, у біомедицині при виготовленні біосенсорів, при виготовленні магніторезистивної пам'яті тощо.

Спін-клапанні структури на основі чіпів ГМО є важливим інструментом біомедицини, де важливо мати чутливу та швидку систему біомолекулярного виявлення. Біосенсори дозволяють здійснювати експрес-тести і виявляти різні захворювання, а також визначати вміст певної речовини в організмі людини. Якщо для сенсорів, що використовуються у автомобілебудуванні, розмір чутливих елементів не є принципово важливим, то при розробці біосенсорів дуже важливим і актуальним завданням є їх мініатюризація.

Зменшення розмірів елементів, не зменшуючи їх чутливості до величини магнітного поля, а також забезпечивши точність вимірювання параметрів забезпечить можливість застосування біосенсорів для контролю стану здоров'я людини в реальному часі.

Деякі приклади застосування плівкових структур з ефектом ГМО та АМО представлені на рис.1.10 та 1.11. Для космічної та спеціальної техніки розвиваються технології створення покриттів великої площі на основі магнітом'яких шарів, що мають високу ефективність захисту радіоелектронних виробів від електромагнітного випромінювання і проникаючої радіації.

Плівкові системи на основі гранульованих магнітних систем, а також багатошарових плівок знайшли застосування при розробці технології магнітної пам'яті з довільним доступом (МПДД). У основі її роботи лежить принцип зберігання інформації у вигляді намагнічених певним чином елементів – магнітних комірок пам'яті.

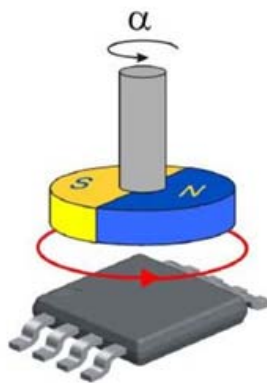


Рисунок 1.10 – Приклад застосування магнітної наноструктури з ефектом АМО, як датчика положення [12]

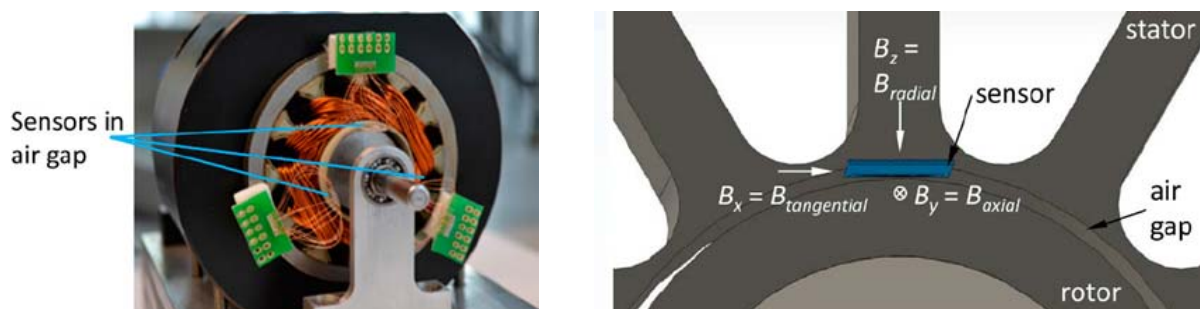


Рисунок 1.11 – Приклади застосування АМО-сенсору на основі спін-клапанних структур у електродвигунах для детектування положення і кута повороту [12]

Магніторезистивна пам'ять має високу швидкодію, співрозмірну з статичною оперативною пам'яттю, таку ж щільність комірок, але при цьому менше енергоспоживання.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика отримання плівкових зразків

Для отримання магнітних плівкових систем застосовують ряд методик і методів отримання зразків. До найбільш екологічних, безпечних відносять методи осадження плівок випаровуванням у вакуумі. У даній роботі розглянуто та проаналізовано результати досліджень для зразків плівкового сплаву на основі Co і Ag, що були отримані методом одночасного випаровування матеріалів з двох незалежних випарників у вакуумі. Методика отримання зразків плівкових сплавів методом одночасної конденсації з двох випарників детально описана у роботі [26].

Отримання зразків відбувалося у об'ємі вакуумної камери ВУП-5М при тиску залишкових газів 10^{-4} Па. Плівкові зразки отримували методом конденсації атомів у вакуумі на підкладку при одночасному випаровуванні металів (Co та Ag) з двох незалежних електронно-променевих випарників.

Отримання плівок методом електронно-променевого випаровування у вакуумі має ряд переваг порівняно з іншими методами: можна сформувати потрібну структуру – від аморфної (при низьких швидкостях осадження матеріалів) до кристалічної (при високих швидкостях осадження). Однак є і недоліки – це не збереження стехіометрії наважки, у випадку розпилення сплавів.

У процесі осадження потрібно контролювати товщини плівок. Для цього на предметному столику є сенсори вимірювання товщини – кварци. За зміною частоти кварца у процесі осадження можна розуміти яка товщина осаджених плівок.

Як підкладки використовували: для вивчення магніторезистивних властивостей - пластини ситалу марки СТ 50-1-1-0,5, для досліджень структури і фазового складу - мікроскопічні сітки (з попередньо зпрепарованим на них плівками вуглецю).

На рис.2.1 представлений зовнішній вигляд робочого об'єму з розміщеними у ньому випарниками, предметним столиком з розміщеними на ньому підкладками та системою вимірювання товщин плівок у процесі осадження.

Підкладки на столику розміщувалися так, що склад плівок змінювався поступово – від зразка до зразка, у залежності від положення підкладки відносно випарників. Наприклад, ті підкладки, які розміщувалися ближче до випарника з кобальтом – на них отриманий плівковий сплав з переважною концентрацією кобальта, і навпаки. У одному технологічному циклі можна отримати до 7 зразків, які будуть відрізнятися один від одного лише концентрацією компонентів. Всі інші умови технологічного процесу для них були однакові (залишковий вакуум у камері, температура підкладок, швидкість осадження, загальна товщина плівки).

Знаючи товщини плівок на кварцах, можна для кожного зразка (плівкового сплаву) розрахувати концентрації.

Знаючи товщини на кварцах d_{01} та d_{02} (рис.2.2) за співвідношенням (2.1) можна розрахувати атомарні концентрації кожного компоненту плівкового сплаву c_1 та c_2 .

$$c_1 = \frac{D_1 d_{01} \mu_1^{-1}}{D_1 d_{01} \mu_1^{-1} + D_2 d_{02} \mu_2^{-1}} \quad \text{та} \quad c_2 = \frac{D_2 d_{02} \mu_2^{-1}}{D_1 d_{01} \mu_1^{-1} + D_2 d_{02} \mu_2^{-1}}, \quad (2.1)$$

де D і μ – густина і молярна маса матеріалу кожного компоненту, відповідно.

2.2. Методика дослідження структурного стану та фазового складу плівкових систем методом просвічуючої електронної мікроскопії

Для вивчення структури та фазового складу застосовується електронний мікроскоп ПЕМ–125К (рис. 2.3). ПЕМ-125К - просвічуючий електронний мікроскоп, який має високу роздільну здатність, може реалізувати ряд режимів – світлопольний, темнопольний, дифраційний, мікродифракційний.

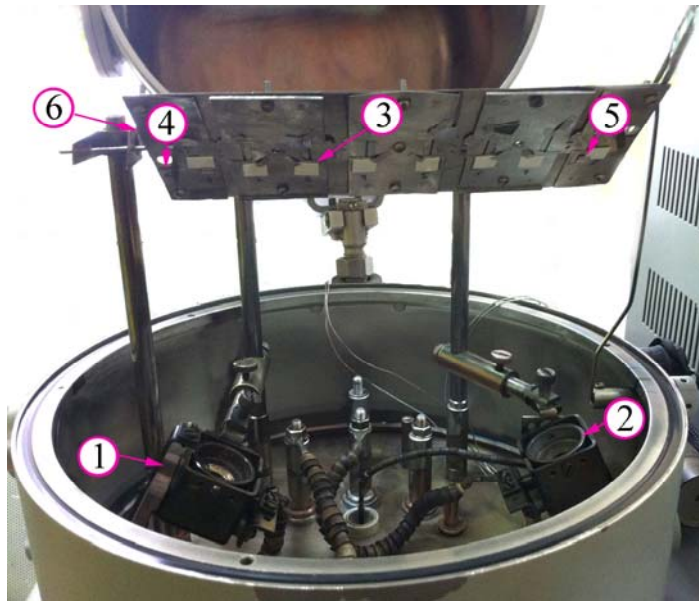


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд робочого об'єму установки ВУП-5М з розміщеними у ній випарниками, поворотним столиком та підкладками:

1 та 2 – електронно-променеві випарники;
 3 – підкладки; 4 та 5 – сенсори вимірювання товщини плівок;
 6 – предметний поворотний столик

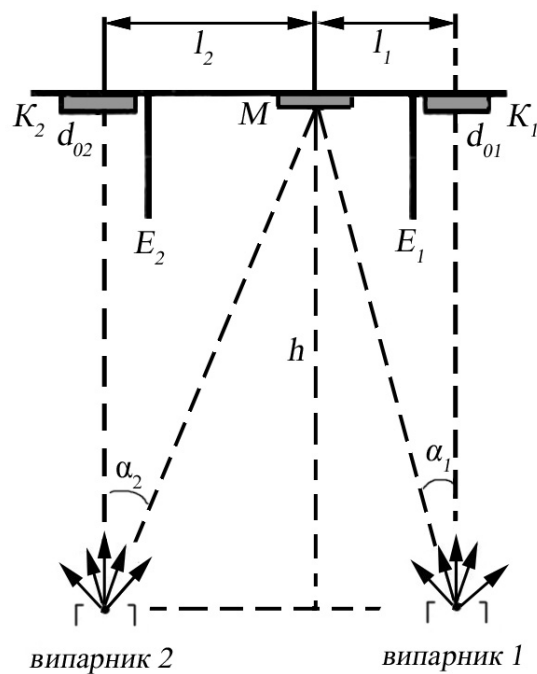


Рисунок 2.2 – Геометрія розміщення випарників відносно підкладок у процесі осадження плівкових сплавів

Даний мікроскоп дозволяє досліджувати мікроструктуру і фазовий склад об'єктів в нанотехнологіях, мікроелектроніці, біології, медицині.

Препаровані на мікроскопічну сітку плівкові зразки досліджуються за такою методикою. Було розраховано постійну приладу (C) за допомогою еталонного зразка плівки Al з відомими міжплощинними відстанями. Обробка отриманих електронogram включала в себе вимірювання діаметрів кілець у двох взаємно перпендикулярних напрямках, розрахунок міжплощинних відстаней (d_{hkl}) та параметрів решітки (a_{hkl}):

$$d_{hkl} = \frac{D_{hkl}^0 \cdot d_{hkl}^0}{D_{hkl}}, \quad (2.2)$$

$$a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (2.3)$$

де d_{hkl}^0 – міжплощинні відстані для плівки еталону;

D_{hkl} , D_{hkl}^0 – діаметри дифракційних кілець невідомого та еталонного зразків;

h, k, l - індекси Міллера.

При розшифровці електронogram використовувалися відомі табличні дані про величину міжплощинних відстаней та відносну інтенсивність ліній на електронogramах від Co та Ag.

2.3. Методика дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків

Магніторезистивні властивості зразків, описані у кваліфікаційній роботі у розділі 3, були досліджені на програмно-апаратному комплексі показаному на рис. 2.4а. Вимірювання магнітоопору зразків на програмно-апаратному комплексі здійснюються при кімнатній температурі. Максимальна величина магнітного поля, при якій вимірюються магніторезистивні властивості становить 0,45 Тл. Вимірювання проводились з використанням 4-точкової схеми вимірювання.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд просвічуючого електронного мікроскопу ПЕМ-125К



Рисунок 2.4 – Загальний зовнішній вигляд приладу для вимірювання магнітоопору магнітоопору (а) та тримача зразка (б):

1 – електромагніт; 2 – тримач зразка; 3 – мультиметр; 4 – блок живлення;

5 – карта збору даних NI PCI-6031E та механізм перемикання полярності магнітного поля;

6 – ноутбук з програмним забезпеченням

Використовуючи даний тримач зразка (рис. 2.4 б) можна реалізувати три геометрії вимірювання магнітоопору: перпендикулярна, поперечна, поздовжня (рис.2.5).

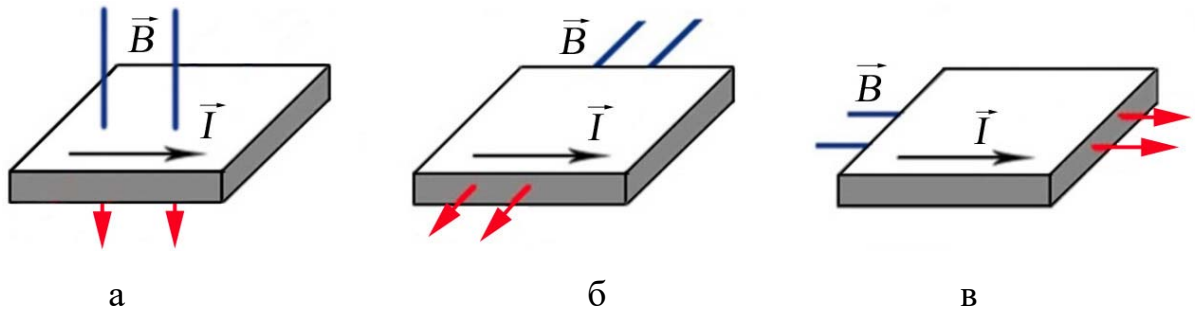


Рисунок 2.5 – Геометрії вимірювання магнітоопору: перпендикулярна (а), поперечна (б) та поздовжня (в)

На рис. 2.6 показано інтерфейс програми для вимірювання магнітоопору плівкових зразків.

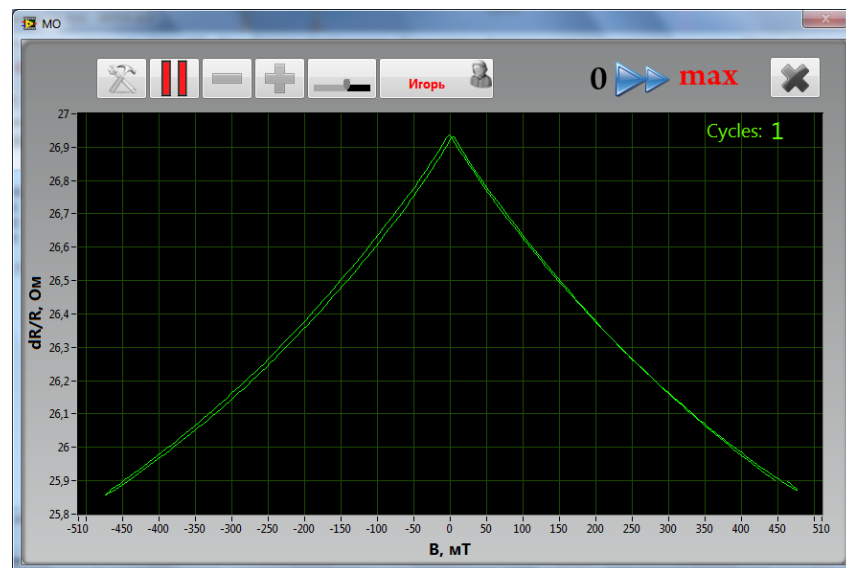


Рисунок 2.6 – Діалогове вікно програми для реєстрації результатів вимірювання магнітоопору

Спочатку при вимірюванні отримуємо значення опору зразка, залежно від величини магнітного поля. Потім, з допомогою співвідношення (1.1) перераховуємо опір від поля - у значення магнітоопору. Після цього – будемо польові залежності магнітоопору і їх аналізуємо.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИВЧЕННЯ МАГНІТООПОРУ ТА СТРУКТУРНОГО СТАНУ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ Co ТА Ag

Аналіз літератури дозволяє стверджувати що гранульована плівкова система на основі кобальту та срібла може бути застосована як «класична» при вивченні магніторезистивних властивостей у гранульованих плівкових магнітних сплавах. Це обумовлено тим, що згідно великого масиву даних літературних джерел було встановлено - компоненти сплаву не вступають у взаємодію, тверді розчини у системі не спостерігаються, інтерметаліди не утворюються. Як було показано у розділі 1, існує велика кількість результатів вивчення магнітотранспортних властивостей в гранульованих плівках на основі кобальту та срібла. Однак, можна відмітити, що ще існує ряд не вирішених питань. Так, наприклад, у літературі відносно рідко зустрічаються результати комплексних досліджень взаємозв'язку магніторезистивних властивостей та структурного стану для плівок товщинами $d \leq 50$ нм.

Враховуючи це, у роботі було проаналізовано результати досліджень вивчення магнітоопору у комплексі з дослідженнями структури і фазового складу зразків. Побудовані польові залежності магнітоопору, досліджено структуру та фазовий склад невідпалених гранульованих плівок на основі кобальту та срібла товщиною 35 нм з різними концентраціями кобальту (20 ат.%, 39 ат.% та 80 ат.%).

3.1 Дослідження магнітоопору плівок сплавів на основі Co та Ag

Магніторезистивні властивості гранульованих магнітних систем на основі Co і Ag вимірювали у поздовжній та поперечній геометріях. На рис. 3.1 показані польові залежності магнітоопору для зразків товщиною 35 нм для

трьох різних концентрацій, виміряні у поперечній та поздовжній геометріях вимірювання при кімнатній температурі.

Для зразка з концентрацією кобальту 20 ат. % польові залежності магнітоопору не насичуються в магнітному полі до 0,45 Тл. Магнітоопір при цьому має ізотропний опір. Така поведінка магнітоопору є характерною для гранульованих систем, що складаються з ансамблів суперпарамагнітних гранул. Величина ГМО для зразка при $c_{Co}=20$ ат.% становить 3,3 % у поперечній геометрії та 2,8 % у поздовжній (рис.3.1 а). Гранули знаходяться на значній відстані між собою, а сили магнітної взаємодії незначні.

Зі збільшенням концентрації кобальту до $c_{Co}=39$ ат.% величина ГМО зростає до 7,2% у поперечній геометрії та 6,8 % у поздовжній (рис.3.1 б). Як відомо з аналізу літератури, максимальне значення ГМО мають зразки з структурним станом, що близький до порогу структурної перколяції для феромагнітного компонента у сплаві.

Подальше зростання концентрації кобальту у сплаві до 80 ат. % змінює характер польової залежності (з'являється анізотропний магнітоопір у поздовжній геометрії), а величина магнітоопору зменшується до 0,12 %. Така польова залежність МО є характерною для суцільних феромагнітних плівок, або плівок, гранули магнітного компонента у якому взаємодіють між собою.

3.2 Дослідження структури та фазового складу плівок сплавів на основі Co та Ag

Для інтерпретації результатів вивчення МО проаналізуємо структурний стан та фазовий склад плівок.

Як видно з рис.3.2 а при малих концентраціях кобальту $c_{Co}=20$ ат.% структурний стан зразка складається з гранул розміром від 3 до 5 нм, що знаходяться у матриці. Фазовий склад при цьому відповідає ГЦК-Ag (рис.3.3). Аналізуючи дану інформацію можна стверджувати що для $c_{Co}=20$ ат.% структура плівки складається з малих гранул Co (що мають суперпарамагнітну поведінку).

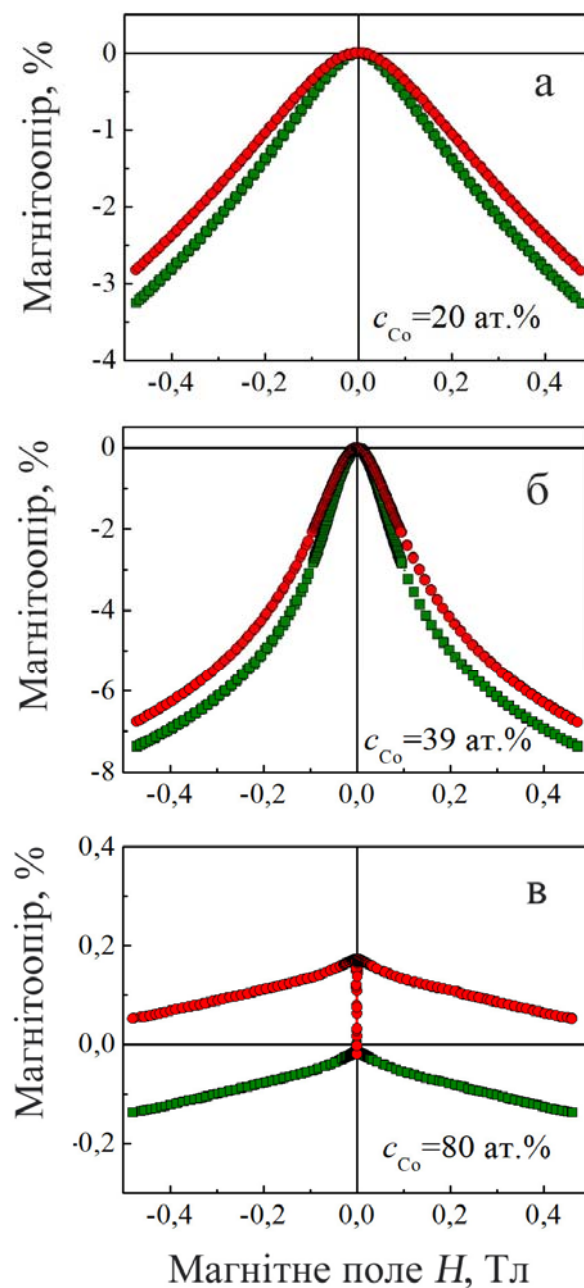


Рисунок 3.1 – Польові залежності магнітоопору зразків плівкового сплаву на основі Со та Аg з різним вмістом кобальту у сплаві c_{Co} , ат.%. Вимірювання проводились при кімнатній температурі у поперечній (●) і поздовжній (●) геометріях вимірювання

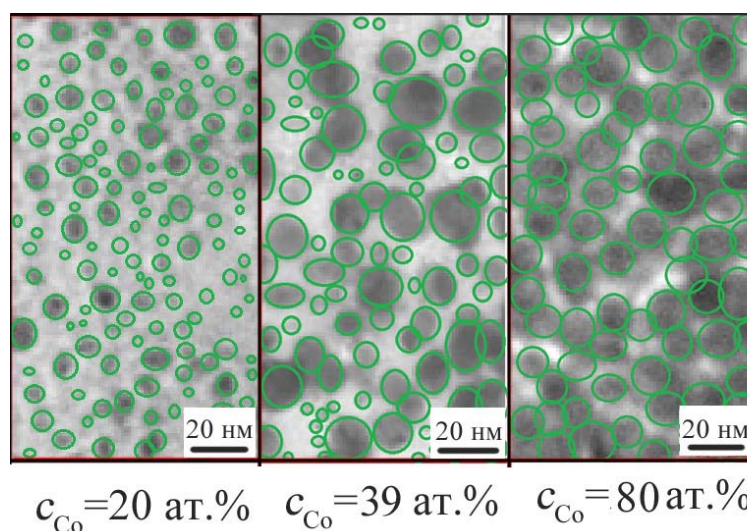


Рисунок 3.2 – Зображення наноструктури зразків плівкових сплавів на основі Co і Ag при різних концентраціях Co. Зеленим кольором виділені межі гранул

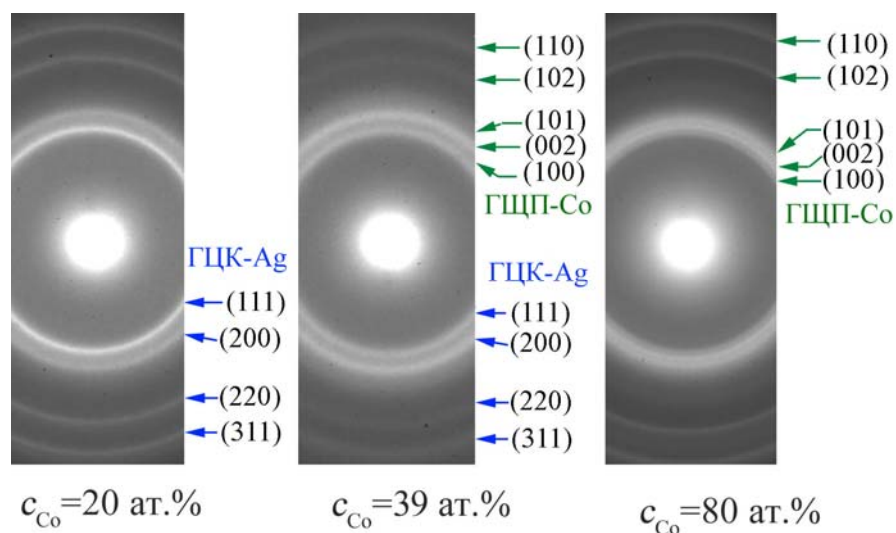


Рисунок 3.3 – Електронограми від зразків плівкових сплавів на основі Co і Ag при різних концентраціях Co

Гранули Co знаходяться у матриці Ag, однак через малу концентрацію Co, а відповідно малу кулькуість гранул Co та малий їх розмір, лінії на електронограмах від ГЦП-Co не фіксували.

При $c_{Co}=39$ ат.% гранули Co вже дотикаються одна до одної, тобто структурна перколяція досягнута. Фазовий склад при цьому відповідає ГЦК-Ag та ГЦП-Co. Звісно, при такому розміщенні гранул кобальту у матриці срібла, коли досягнута структурна перколяція, величина ГМО має максимальне значення.

При $c_{Co}=80$ ат.% (рис.3.2) гранули зливаються між собою, плівка стає майже суцільною (майже повністю складається з кобальту). Фазовий склад при цьому відповідає ГЦП-Co.

Таким чином, змінюючи концентрацію компонентів сплаву, можна впливати на структурний стан зразка, а відповідно – на магніторезистивні властивості, змінюючи ці властивості від феромагнітної поведінки до суперпарамагнітної по мірі зменшення концентрації кобальту.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто суть та фізичні принципи виникнення ефектів гігантського та анізотропного магнітоопору.

2. Проведено літературний огляд результатів комплексних досліджень магніторезистивних властивостей у поєднанні з структурно-фазовим станом плівок гранульованих сплавів на основі кобальту та срібла. Встановлено, що у гранульованих плівках такі фактори як розмір гранул магнітного матеріалу, відстань між гранулами, товщина плівки відіграють ключову роль при формуванні магніторезистивних властивостей та впливають на поведінку його польових залежностей.

3. Проведено аналіз галузей застосувань плівкових наноструктур. Показано, що гранульовані магнітні плівкові структури, у яких реалізуються ефекти ГМО та АМО застосовуються у біології, біомедицині, екології, харчовій промисловості, автомобілебудуванні як чутливі елементи сенсорів, елементи магніторезистивної пам'яті та інших.

4. Вивчено методику отримання гранульованих плівкових сплавів методом одночасної конденсації з двох випарників у вакуумі. Вивчено методику дослідження магніторезистивних властивостей та структурно-фазового стану плівок.

5. Проаналізовано результати комплексних досліджень манітоопору у поєднанні з дослідженнями структури і фазового складу невідпалених зразків плівкового сплаву на основі кобальту та срібла товщиною 35 нм, але різним відношенням концентрацій компонентів. Встановлено, що зразки плівкового сплаву з малим вмістом кобальту ($c_{Co}=20$ ат.%) характеризуються структурним станом, при якому реалізується суперпарамагнітна поведінка магнітоопору. При зростанні концентрації кобальту у сплаві до $c_{Co}=39$ ат.% досягається поріг структурної перколяції гранул кобальту. Величина ГМО для такого зразка має найбільше значення, а саме 7,2% у поперечній та 6,8 % у поздовжній геометрії вимірювання. При збільшенні концентрації кобальту у зразку до 80 ат.% зразок характеризується анізотропним магнітоопором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Giant Magnetoresistance Sensors Based on Ferrite Material and Its Applications / M. Djamal, R. Ramli // *Magnetic Sensors - Development Trends and Applications*. – InTech, 2017. – P. 111-132.
2. Chien C.L. Magnetism and giant magneto-transport properties in granular solids / C.L. Chien // *Annu. Rev. Mater. Sci.* – 1995. – V. 25. – P. 129 - 160.
3. Metallic films for electronic, optical and magnetic applications / K. Barmak, K. Coffey. – Woodhead Publishing, 2014. – 656 с.
4. Thin Film Magnetoresistive Sensors / S. Tumanski. – Warsaw: CRC Press, 2001. – 576 p.
5. Spintronics for Next Generation Innovative Devices / K. Sato, E. Saitoh. – Wiley, 2015. – 255 p.
6. Djanina M. Development of Sensors Based on Giant Magnetoresistance Material / M. Djanina, Yu. Ramli // *Procedia Engineering*. – 2012. – V. 32. – P. 60 – 68.
7. Тихоненко-Поліщук Ю.О. Про критичний розмір переходу феромагнетика в однодомений стан / Ю.О. Тихоненко-Поліщук, О.І. Товстолиткін // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 02028-1 – 02028-17.
8. О.І. Товстолиткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, В.В. Куницький., *Фізичні основи спінтроніки: [навчальний посібник]*. - Вінниця: Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
9. Явище гігантського магнітного опору в багатошарових плівкових системах (огляд) / І.Ю.Проценко, І.В.Чешко, Я.Яворский // *Вісник СумДУ*. – 2004. - №10(69). – С.65-81.
10. Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications / I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel [et al.] // *Sensors*. – 2016. - V. 16. – P. 904-928.
11. Fert A. The present and the future of spintronics / A. Fert // *Thin Solid Films*. – 2008. – V. 517. – P. 2-5.

12. Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of-the-Art Applications / C. Reig, S. Cardoso; S.C. Mukhopadhyay. – Springer Berlin Heidelberg: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013. – V. 6 – 300 p.
13. Xiao J.Q. Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems / J.Q. Xiao, J.S. Jiang, C.L. Chien // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – V. 68. – P. 3749 – 3752.
14. Giant Magnetoresistance in Heterogeneous Cu-Co Alloys / A.E. Berkowitz, J.R. Mitchell, M.J. Carey [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – V. 68. – P. 3745-3748.
15. McGuire T.R. Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys / T.R. McGuire, R.I. Potter // *IEEE Transactions on magnetics.* – 1975. – V. 11, № 4. – P. 1018 – 1038.
16. Johnson A. Effect of Anisotropy Influences on the Angle Dependent Resistance Changes in IrMn Spin-Valves / A. Johnson, H. Siegle, H. Hahn // *Physica Status Solidi A.* – 2002. – V. 189. – P. 637-642.
17. Magnetic Anisotropies in Nanostructured Matter / A. Johnson, H. Siegle, H. Hahn // P. Weinberger. – Warsaw: CRC Press, 2009. – 299 p.
18. Influence of third elements on the anisotropic magnetoresistance in permalloy films / H. Nagura, K. Saito, K. Takanashi, H. Fujimori // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2000. – V. 212. – P. 53 – 58.
19. Binary alloy phase diagrams / T.B. Massalsky, J.L. Murray, L.H. Bennett, H. Baker. – Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1986. – 2224 p.
20. Memory effect and spin-glass-like behavior in Co-Ag granular films / J. Du, B. Zhang, R.K. Zheng, X.X. Zhang // *Phys. Rev. B.* – 2007. – V. 75. – P. 014415-1 – 014415-7.
21. Kumar D. Surface scattering dominated magnetotransport for improved quantitative estimation of particle size in $\text{Ag}_{100-x}\text{Co}_x$ nanogranular films / D. Kumar, S. Chaudhary, D.K. Pandya // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2014. – V. 370. – P. 127-133.
22. Giant magnetoresistance in Ag-Co granular films prepared by electrodeposition / S. Kenane, E. Chainet, B. Nguyen, A. Kadri // *Electrochem. Com.* – 2002. – V. 4. – P. 167-170.

23. High coercivity and giant magnetoresistance of CoAg, CoCu granular films / V.V. Hiep, N. Chau, D.M. Hong, N.H. Luong // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2007. – V. 310. – P. 2524 – 2526.
24. Thickness and composition dependences of magnetic and magnetoresistive properties of $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$ alloys thin films / I. Shpetnyi, S. Vorobiov, V.Komanicky, I. Iatsunskyi, V. Grebinaha, Yu.I. Gorobets, V. Tkachenko, P. Skokowski, T. Luciński, S. Jurga // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2021. – T. 527. – C. 167762-1 – 167762-9.
25. Correlation between the structural state and magnetoresistive properties of granular $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$ alloy thin films / I.O. Shpetnyi, S.I. Vorobiov, D.M. Kondrakhova, M.S. Shevchenko, L.V. Duplik, L.V. Panina, V.I. Grebinaha, Yu.I. Gorobets, L. Satrapinsky, T. Lucinski // *Vacuum.* – 2020. – T. 176. – C. 109329-1 – 109329-6.
26. Louail L., Hachemi A., Azizi A. The magnetization shift in CoAg granular films observed by torque magnetometer // *Materials Letters V. 53* - 2002 – P. 371-378.
27. The structural-phase state and magnetoresistive properties of thin film alloys obtained by co-evaporated Cu and Co / I.O. Shpetnyi, D.M. Kondrakhova, S.I. Vorobiov, B. Scheibe, V.I. Grebinaha, D.O. Derecha, Yu.I. Gorobets, I.Yu. Protsenko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2019. – V. 474. – P. 624 – 631.