

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ З МАГНІТОРЕЗИСТИВНИМ
ЕФЕКТОМ У СЕНСОРНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА БІОТЕХНОЛОГІЯХ**
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП-81

Ю.С. Лебединець

Науковий керівник,
д.р. фіз.-мат. наук, доцент

І.О. Шпетний

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д.р. фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

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
«25» травня 2022 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Лебединець Юлії Сергіївни

Тема роботи Застосування наноматеріалів з магніторезистивним ефектом у сенсорній техніці та біотехнологіях

затверджена наказом по університету від «04» травня 2022р., № 0316-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 08 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Сучасні технології дозволяють створювати плівкові матеріали з моно-, полікристалічною або аморфною структурою й конструювати на їх основі принципово новітні магнітні матеріали, що характеризуються рядом нових особливостей та явищ, повністю відсутніх або слабо виражених у масивних матеріалах. Всі ці явища відкрили величезні перспективи, як для фундаментальних досліджень, так і для багатообіцяючих можливостей їх практичного застосування у біотехнологіях, автомобілебудуванні, спінтроніці.

Мета кваліфікаційної роботи здобувача полягає у вивченні можливостей застосування наноматеріалів з магніторезистивним ефектом у сенсорній електроніці та біотехнологіях, а також аналізі результатів дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів, що характеризуються анізотропним магнітоопором.

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

1. Основні типи плівкових структур для спінтроніки.

2. Ефект анізотропного магнітоопору у тонкоплівкових матеріалах.

3. Ефекти гігантського і тунельного магнітоопору у тонких плівках та гранульованих сплавах.

4. Застосування наноструктур з ефектами гігантського та анізотропного магнітоопору у спінтроніці та біотехнологіях.

5. Аналіз магніторезистивних властивостей плівкових структур на основі пермалою та срібла.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Слайд № 1. Актуальність та мета роботи.
Слайд № 2. Основні типи плівкових структур для спінтроніки.
Слайд № 3. Ефект анізотропного магнітоопору у тонкоплівкових матеріалах.
Слайди № 4-5. Ефект гігантського магнітоопору у тонких плівках та гранульованих сплавах.
Слайд № 6. Порівняння явищ гігантського та анізотроного магнітоопорів.
Слайд № 7. Приклади застосування наноструктур з ефектами гігантського та анізотропного магнітоопорів у спінтроніці та біотехнологіях.
Слайди № 8-9. Методика і техніка експерименту.
Слайди 10-11. Аналіз результатів вивчення магніторезистивних властивостей.
Слайд 12. Висновки.
6. Дата видачі завдання 26.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 30.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Методи отримання та дослідження магніторезистивних властивостей.	до 04.06.2022 р.	<i>вик.</i>
3.	Аналіз результатів дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів.	до 06.06.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 08.06.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	10.06.2022р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	16.06.2022 р., 17.06.2022 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Лебединець Ю.С.

Науковий керівник

Шпетний І.О.

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягала у вивченні можливостей застосування наноматеріалів з магніторезистивним ефектом у сенсорній електроніці та біотехнологіях, а також аналізі результатів дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів, що характеризуються анізотропним магнітоопором.

Під час виконання роботи були розглянуті та проаналізовані результати досліджень для плівкових сплавів, отриманих методом термічного випаровування з двох незалежних випарників у вакуумі на приладі ВУП-5М.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що магнітні плівкові матеріали, що характеризуються явищами анізотропного, гігантського та тунельного магнітоопору знайшли широке застосування у автомобілебудуванні завдяки відсутності механічної взаємодії між рухомими об'єктами, у спінтроніці при виготовленні датчиків, пам'яті з довільним доступом, тунельних контактів, у біомедицині при виготовленні біосенсорів, сконструйованих за принципом Lab-on-a-chip. Аналіз результатів дослідження магніторезистивних властивостей зразків плівкових сплавів на основі пермалою ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) та срібла показав, що невідпалені зразки характеризуються ізотропним магнітоопором в широкому інтервалі складу при $0,22 \leq x_{\text{Pb}} \leq 0,80$. Відпалювання зразків вказаного плівкового сплаву при температурі $T_{\text{відп.}} = 700\text{K}$ призвело до формування структурного стану, що характеризується анізотропним магнітоопором у всьому вказаному інтервалі складів. Показано, що вказані зразки плівкових сплавів після відпалювання при температурі $T_{\text{відп.}} = 700\text{K}$ можуть бути перспективними при застосуванні їх у якості чутливих елементів анізотропних магніторезистивних сенсорів напрямку магнітного поля.

Робота викладена на 41 сторінці, зокрема, містить 23 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 22 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БІОСЕНСОР, ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТООПІР, АНІЗОТРОПНІЯ, НАНОСТРУКТУРА, СПІН-ВЕНТИЛЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ЕФЕКТИ У МАГНІТНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ	7
1.1. Основні типи плівкових структур для спінтроніки.....	7
1.2. Ефект анізотропного магнітоопору у тонкоплівкових матеріалах.....	10
1.3. Ефект гігантського магнітоопору у тонких плівках та гранульованих сплавах.....	13
1.4. Явище тунельного магнітоопору.....	18
1.5. Застосування наноструктур з ефектами гігантського та анізотропного магнітоопору у спінтроніці та біотехнологіях.....	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	24
2.1. Методика отримання плівкових систем методом конденсації у вакуумі	24
2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей тонкоплівкових систем.....	27
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
3.1. Магніторезистивні властивості плівкової системи на основі пермалою та срібла.....	30
3.2. Біосенсори.....	33
3.2.1. Принцип дії, основні компоненти, галузі застосування біосенсорів.....	33
3.2.2. Переваги біосенсорів. Біосенсори на основі наноматеріалів.....	35
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

У останні десятиліття увагу дослідників привертають штучно створені наноматеріали та плівкові системи, що можуть проявляти унікальні фізичні властивості та є перспективними для практичного застосування у електроніці, спінтроніці, біотехнологіях [1].

Завдяки сучасним технологіям вдалося створити плівкові матеріали з моно-, полікристалічною або аморфною структурою. На основі таких наноструктур можна конструювати принципово новітні магнітні матеріали, що характеризуються рядом нових особливостей та явищ, повністю відсутніх або слабо виражених у масивних матеріалах. До таких можна віднести гігантський (ГМО), тунельний (ТМО), колосальний (КМО), анізотропний (АМО) магнітоопори, аномальний ефект Холу, сильний магнітооптичний відгук, тощо. Вказані ефекти відкрили перспективи, як для фундаментальних досліджень, так і для практичного застосування [2 – 6]. У електроніці магнітні плівкові матеріали, що характеризуються унікальними магнітотранспортними властивостями, застосовуються при виготовленні енергонезалежної магніторезистивної пам'яті, датчиків величини та напряму магнітного поля, пристроїв для магнітно-резонансної томографії [7, 8].

Останнім часом набули важливого значення дослідження і розробки в галузі магніторезистивних датчиків. У медицині великої популярності отримали методи біомолекулярної діагностики, у яких застосовують портативні високочутливі прилади типу «лабораторія на чипі». У таких приладах в якості чутливих елементів виступають наноматеріали, для яких є характерним явище ГМО. Вказані датчики можуть виявляти магнітні наночастинки, що використовуються як мітки для різних біомолекул. Для таких систем важлива чутлива та швидка біомолекулярна система виявлення.

Метою кваліфікаційної роботи було проведення аналізу можливостей застосування наноматеріалів з магніторезистивним ефектом у сенсорній електроніці та біотехнологіях.

РОЗДІЛ 1

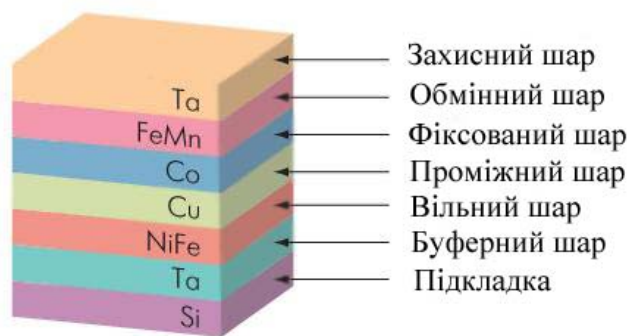
МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ЕФЕКТИ У МАГНІТНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ

1.1. Основні типи плівкових структур для спінтроники

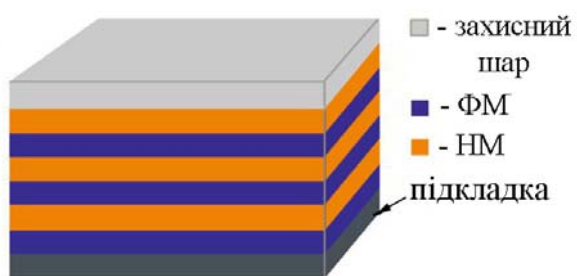
Відомо, що електрони окрім заряду характеризуються ще й власним моментом кількості руху – спіном. У середині минулого століття розпочався розвиток нового напрямку з розробки фізичних основ створення приладів, заснованих на використанні спінового стану їх елементів як ідентифікаторів інформації. Спін-залежні процеси у фізиці інтенсивно вивчалися дослідниками у 70-90 роках минулого століття. Однак такі дослідження є актуальними і в наш час. На сьогодні накопичено багато різноманітної інформації щодо механізмів спінової пам'яті та спінової релаксації, спінових процесів при фотозбудженні, процесів спінової поляризації тощо. Спінові властивості електронів знайшли застосування при створенні приладів. Цей напрям отримав назву «спінтроніка».

До основних задач сучасної спінтроники відносяться: створення матеріалів зі спін-поляризованими електронами, керування спіновим станом електронів, визначення спінового стану електронів після їх виведення із зони керування. При вирішенні цих задач можливі підходи з використанням феромагнітних елементів та зовнішніх магнітних полів [9].

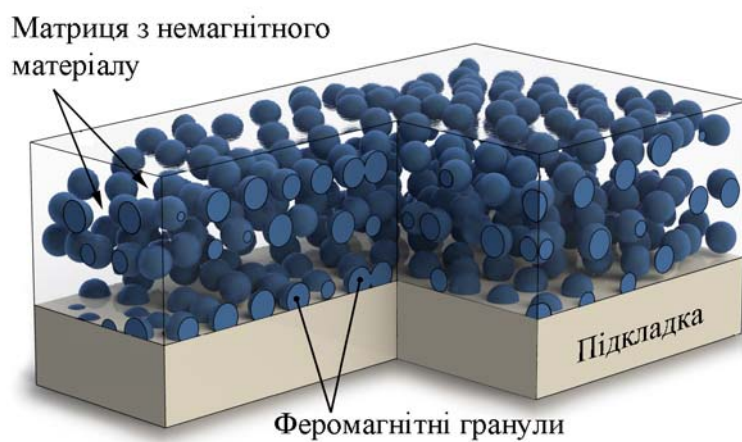
Як елементи спінтроники найчастіше застосовуються три типи плівкових матеріалів (рис.1.1): структури «спін-вентильного типу», мультишари, гранульовані плівки [10, 11]. У таких системах при певних умовах спін-залежне розсіювання електронів провідності реалізується в унікальні магніторезистивні явища. У системах спін-вентильного типу два феромагнітних шари (наприклад, Fe та Co) розділені немагнітним прошарком (Cu, Ag), який послаблює обмінну феромагнітну взаємодію (рис.1.1 а). Один феромагнітний шар є «закріпленим», а інший шар є вільним і регулюється наведеним магнітним полем.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Типи плівкових структур: структура спін-вентильного типу (а), мультишарова система (б), гранульований плівковий сплав (в), що застосовуються в спітроніці. Адаптовано з роботи [10, 11]

У магнітних мультишарових системах (рис.1.1 б) феромагнітні шари розділені шарами з 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 Co, Ni, Fe та сплави на їх основі (наприклад, пермалой). Немагнітні шари виготовляють з перехідних немагнітних (наприклад Cr) або благородних металів (Ag, Au, Cu).

Тверді тіла, що складаються з двох або більше компонентів, які не змішуються між собою, утворюють широкий клас гранульованих матеріалів [12]. У гранульованій магнітній системі (рис.1.1 в) гранули магнітного матеріалу (Co, Ni, пермалой) або оксиду на основі магнітного матеріалу знаходяться у матриці з немагнітного матеріалу (Ag, Au, Cu або інших). Немагнітний матеріал може бути металом, напівпровідником або діелектриком. Тоді, залежно від природи немагнітного матеріалу – реалізуються ефекти гігантського, тунельного або колосального магнітоопору. Особливістю формування гранульованих плівок є необхідність вибору компонентів, що не розчиняються один у одному і не змішуються між собою. Існує лише обмежена кількість таких пар компонентів, що дозволяють сформувати гранульовані магнітні наносистеми [12]. До таких пар відносяться системи на основі Co і Ag, Co і Cu, Ni і Ag, пермалой і Cu, пермалой і Ag, Fe і Cr. У цих системах компоненти практично не змішуються та не утворюють інтерметалевих сполук. Для підбору таких пар застосовують діаграми стану подвійних систем у масивному стані.

Можливість використання певних наносистем у спінтроніці визначається магнітотранспортними властивостями матеріалів даної системи, що в свою чергу залежить від середньої довжини вільного пробігу електронів під дією електричного поля. При внесенні магнітних систем у магнітне поле опір цих систем змінюється. Під дією сили Лоренца електрони рухаються по гвинтових траєкторіях, що збільшує вірогідність взаємних зіткнень. Даний ефект визначає магнітоопір матеріалів – т.з. магніторезистивний ефект.

У загальному випадку магнітоопір – це ефект зміни електроопору матеріалу у зовнішньому магнітному полі. Для однорідних масивних матеріалів і

однокомпонентних плівок металу він викликаний скривленням траєкторії носіїв струму у прикладеному зовнішньому магнітному полі. Магнітоопір визначається за співвідношенням (1.1) [12]:

$$\Gamma MO = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $R(H)$ - електроопір системи у прикладеному зовнішньому магнітному полі H ; $R(0)$ - електроопір системи при відсутності магнітного поля (при $H=0$).

Існує ряд магніторезистивних ефектів та явищ. Залежно від типу плівкових структур, структурного стану, концентрації гранул можна досягти різних магніторезистивних ефектів. Розглянемо детальніше фізичний зміст явищ анізотропного, гігантського, колосального, тунельного магнітоопорів.

1.2. Ефект анізотропного магнітоопору у тонкоплівкових матеріалах

У 1857 році англійський вчений Вільям Томсон [13] звернув увагу на те, що опір зразка в зовнішньому магнітному полі, залежить від взаємного розташування вектора намагніченості та напрямку струму в зразку. Опір зразка збільшувався, коли струм протікав у напрямку паралельно до вектору намагніченості, і зменшувався при перпендикулярній взаємній орієнтації струму й намагніченості (рис.1.2). Це явище одержало назву анізотропного магнітоопору (АМО).

Анізотропний магніторезистивний ефект - це індукований струмом магнітоопір, який існує у феромагнітних металах (таких як Ni, Co або Fe) при прикладанні магнітного поля H . Фізичне походження ефекту АМО - спін-орбітальна взаємодія на 3d-орбіталах, спричинена прикладеним магнітним полем. Прикладання поля H збільшує потенціал розсіювання електронів під час провідності у феромагнітних матеріалах. Величина ефекту АМО залежить від кута між потоком струму I та кутом намагніченості M у феромагнітному металі (рис.1.3). На рис. 1.4 представлено схему типової структури АМО - датчика вимірювання кута повороту.

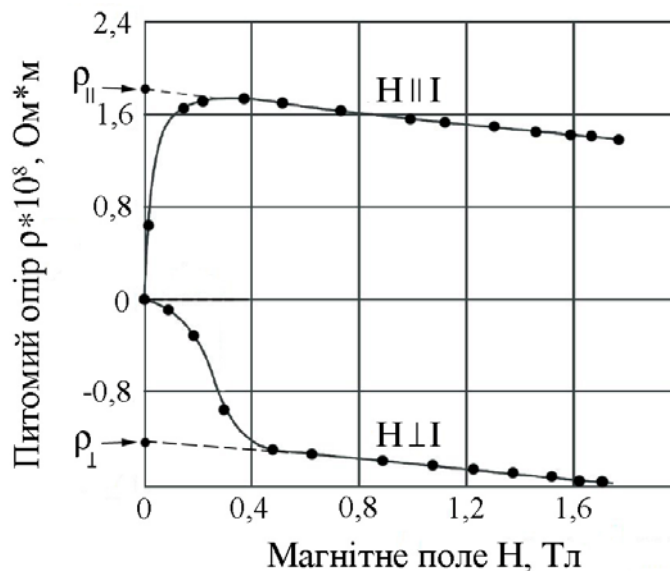


Рисунок 1.2 – Польова залежність питомого опору при вимірюваннях у перпендикулярній та поздовжній геометріях. Адаптовано з [14]

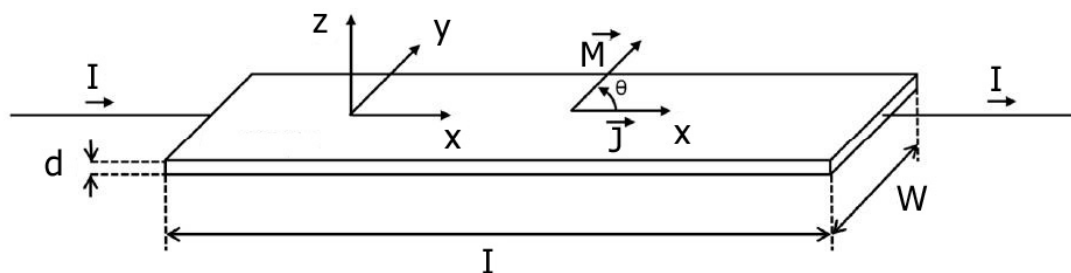


Рисунок 1.3 – Схема вимірювання анізотропного магнітоопору при прикладанні магнітного поля під кутом до напрямку протікання струму. Адаптовано з [8]

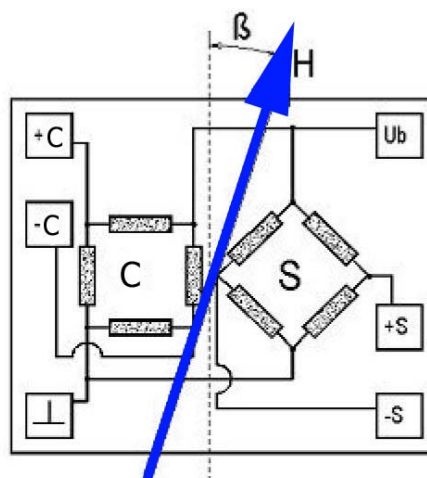


Рисунок 1.4 – Схема типової структури АМО – датчика вимірювання кута повороту. Адаптовано з [8]

Для типового феромагнітного металу з намагніченістю M , спрямованої під кутом θ до струму I кутова залежність зміни опору за рахунок ефекту АМО визначається співвідношенням (1.2):

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \cos^2 \theta, \quad (1.2)$$

де ρ_{\perp} - питомий опір при $M \perp I$, ρ_{\parallel} – опір при $M \parallel I$. Часто $R_{\parallel} > R_{\perp}$ при кімнатній температурі, однак, не завжди.

Коефіцієнт АМО визначається за співвідношенням [13]:

$$\text{АМО (\%)} = \frac{\Delta\rho}{\rho_{av}} \times 100 = \left(\frac{\rho_s^{\parallel} - \rho_s^{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_s^{\parallel} + \frac{2}{3}\rho_s^{\perp}} \right) \times 100 = \left(\frac{3(\rho_s^{\parallel} - \rho_s^{\perp})}{\rho_s^{\parallel} + 2\rho_s^{\perp}} \right) \times 100, \quad (1.3)$$

де ρ_s^{\parallel} і ρ_s^{\perp} – опір при магнітному насиченні у поздовжній та перпендикулярній геометрії вимірювання.

Повний огляд робіт з вивчення анізотропного магнітоопору в об'ємних зразках і тонких плівках Fe, Co, Ni і сплавах на їх основі поданий у роботі Мак Гуіра [13]. У цій роботі обговорюється фізичний зміст магнітоопору і застосування ефекту АМО у детекторах магнітних полів.

Аналіз літературних джерел [13, 14] показав, що найбільш часто використовуваним сплавом у магніторезистивних датчиках магнітних полів є пермалой (сплав на основі нікелю та заліза). Він має нульову магнітострикцію й слабку магнітокристалічну анізотропію. У полі $H=10$ кЕ пермалой має до 4 % коефіцієнт АМО. Хант [14] перший розробив пристрій, що використовував електроосаджені плівки пермалоя.

Важливою характеристикою магнітних датчиків є чутливість до магнітного поля. Вона визначається у відсотках як відношення зміни опору до напруженості

магнітного поля, що викликає цю зміну. Щоб матеріал можна було використовувати як датчик то чутливість повинна бути досить високою.

1.3. Ефект гігантського магнітоопору у тонких плівках та гранульованих сплавах

Ефект гігантського магнітоопору полягає у значному зменшенні опору плівкових матеріалів при дії на них магнітного поля. ГМО обумовлений хвильовими властивостями електронів, у тому числі і власним моментом кількості руху (спіном), не пов'язаним з реальним обертанням електрону. Спін породжує певний магнітний момент електрону, а відповідно, обумовлює його взаємодію з зовнішнім магнітним полем. Електрон може знаходитися у двох спінових станах, яким відповідають власне обертання електронів за часовою стрілкою та проти неї.

Як відомо, електричний опір провідників виникає в основному внаслідок розсіювання вільних електронів провідності на атомах, що відхилилися від свого положення внаслідок теплових коливань. Розсіювання електронів провідності в ГМО-структурі визначається їх спіноюю поляризацією в феромагнітних металах. Електрони провідності, напрям спіну яких співпадає з напрямом внутрішнього магнітного поля феромагнетика, мають менший опір при русі, ніж електрони, спін яких орієнтований назустріч внутрішньому магнітному полю. Останні частіше зіштовхуються з атомами середовища і отримують при русі більший опір (рис. 1.5).

У першому випадку електричний опір середовища менше, ніж у другому. У результаті електричний струм у феромагнітному металі формують електрони зі спіном, направленим у напрямку намагніченості матеріалу та проти нього.

Таким чином, в основі ГМО-ефекту лежить поляризація спіну електронів провідності у феромагнетиках та "спінова залежність" розсіювання електронів.

Однак виникає питання, яким чином можна регулювати магнітоопір зразків. Це можливо у структурах, що складаються із шарів феромагнетиків і немагнітних металів, що чергуються (рис.1.5). Найпростіший ГМО сендвіч - структура з нефіксованою орієнтацією власного магнітного поля містить два шари м'якого

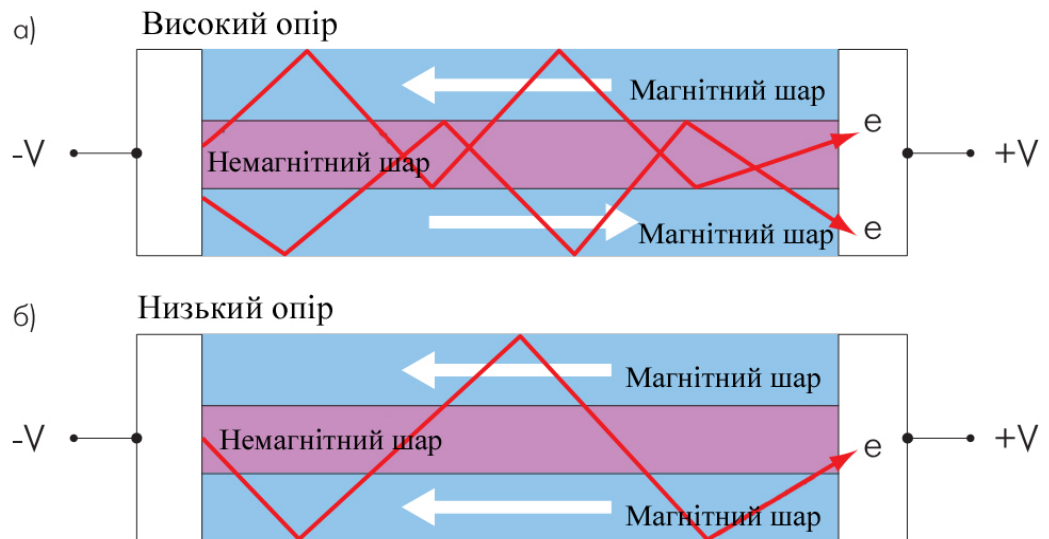


Рисунок 1.5 – Найпростіша ГМО «сандвіч» - структура: а) у відсутності зовнішнього магнітного поля, з протилежною орієнтацією магнітних полів ферромагнетиків внаслідок антиферромагнітного зв'язку (високий опір) і б) - у присутність магнітного поля, з односпрямованою орієнтацією магнітних полів ферромагнетиків (низький опір). Адаптовано з [3]

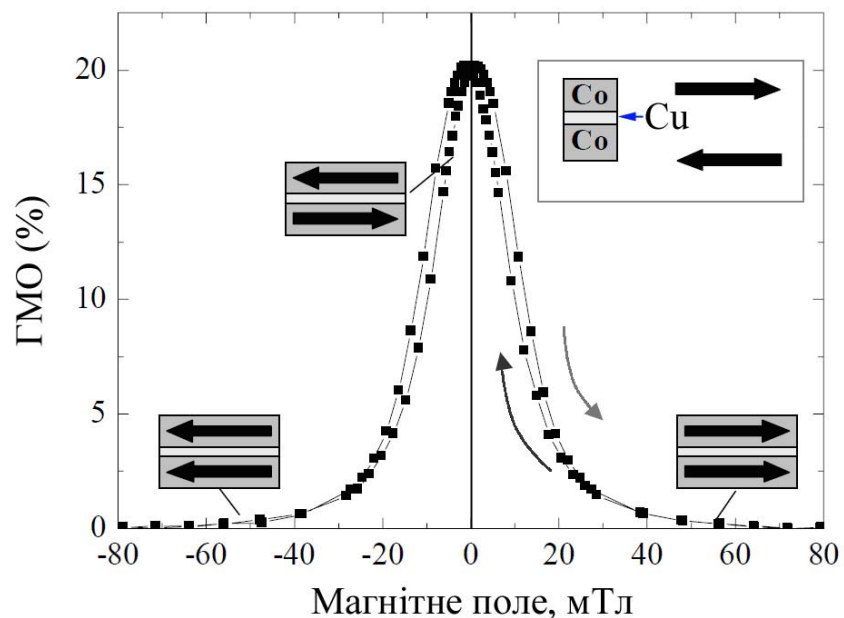


Рисунок 1.6 – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього поля для тришарової плівки Co/Cu/Co. Адаптовано з [7]

магнітного матеріалу (сплави заліза, нікелю, кобальту) товщиною від 4 до 6 нм, розділених шаром немагнітного провідного матеріалу (наприклад, міді) зазвичай товщиною 3-5 нм. При ретельному підборі матеріалу й товщини немагнітного шару орієнтації магнітних полів шарів феромагнетиків внаслідок виникнення антиферомагнітного зв'язку протилежні.

Як правило, шари такої структури формуються у вигляді вузьких смужок шириною кілька мікрометрів. При проходженні струму в такій структурі напрямок спіну електронів в одному із шарів феромагнетика збігається з орієнтацією його власного магнітного поля. У другому феромагнітному шарі, орієнтація магнітного поля якого протилежна спіну, електрони активно розсіюються, і повний електричний опір структури буде більшим, оскільки електрони з "правильним" для цього шару спіном уже майже всі розсіяні в першому шарі (рис.1.5 а).

Якщо ж таку сендвіч-структуру помістити в досить сильне зовнішнє магнітне поле, що переборює антиферомагнітний зв'язок, магнітні поля обох феромагнітних шарів виявляться односпрямованими, і внесок електронів, спіни яких орієнтований по полю, у загальний струм істотно збільшиться (рис.1.5 б). Для них структура практично виявиться коротко замкнутою.

У скільки разів збільшиться струм, обумовлений електронами зі спіном, орієнтованим по магнітному полю, і зменшиться струм електронів із протилежно орієнтованим спіном, залежить від властивостей матеріалів структури. Але в кожному разі збільшення струму перевищить його зменшення, і в результаті сумарний опір зменшиться. Якщо ж поле забрати, чергування магнітної орієнтації шарів відновиться.

Подача зовнішнього магнітного поля перпендикулярно довжині смужок не викличе відчутного ГМО-ефекту внаслідок наявності полів, що розмагнічують, обумовлених надзвичайно малою шириною смужок, що формують структуру.

Історично першим ефект ГМО був відкритий у багат шарових плівкових системах [7].

Вперше явище гігантського магнітного опору було відкрито у 1988 році двома науковими колективами незалежно один від одного: лабораторіями Альбера Ферта і Петера Грюнберга. Практичне значення цього відкриття було відзначено присудженням Ферту і Грюнбергу Нобелівської премії з фізики у 2007 році. У роботі, в якій вперше спостерігали ефект ГМО була висунута гіпотеза, згідно з якою зазначений ефект обумовлений спін - залежним розсіянням носіїв заряду на інтерфейсах багатошарової плівки та в об'ємі шарів металу. На думку автора [7] сьогодні ця гіпотеза вважається достовірною, і саме спін - залежне розсіяння забезпечує ефект ГМО.

Важливий параметр ГМО-датчика – коефіцієнт гігантського магнітоопору, або виражене у відсотках відношення відносної зміни опору до мінімального опору (або опору насичення) $\Delta R/R$. Для сандвіч - структур це відношення становить 4-9%, а магнітне поле насичення - 30-50 Е.

Для визначення коефіцієнта ГМО зазвичай використовують співвідношення (1.1), хоча в деяких джерелах приведені результати, отримані з використанням співвідношення:

$$ГМО = \frac{\Delta R}{R_{\text{насичення}}} = \frac{R(H) - R_{\text{насичення}}}{R_{\text{насичення}}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

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

$R_{\text{насичення}}$ – опір зразка в стані магнітного насичення або опір в максимальному магнітному полі, якщо зразок повністю не насичується.

Коефіцієнт ГМО, розрахований за співвідношенням (1.1), як правило, залежить від попередньої історії зразка. На відміну від нього, магнітопір, що визначається за співвідношенням (1.4) не залежить від попередньої історії зразка.

Співвідношення (1.1) та (1.4) між собою пов'язані виразом:

$$\Delta R / R_{\text{насичення}} = \frac{(\Delta R / R_0)}{(\Delta R / R_0) - 1} \quad (1.5)$$

Величина гігантського магнітоопору значно більше ніж величина анізотропного. Однак, структури, що характеризуються ГМО ефектом можуть застосовуватися лише як датчики величини магнітного поля, але не кута повороту.

На рис. 1.7 для порівняння на одній залежності приведено величини ГМО та АМО наноматеріалів.

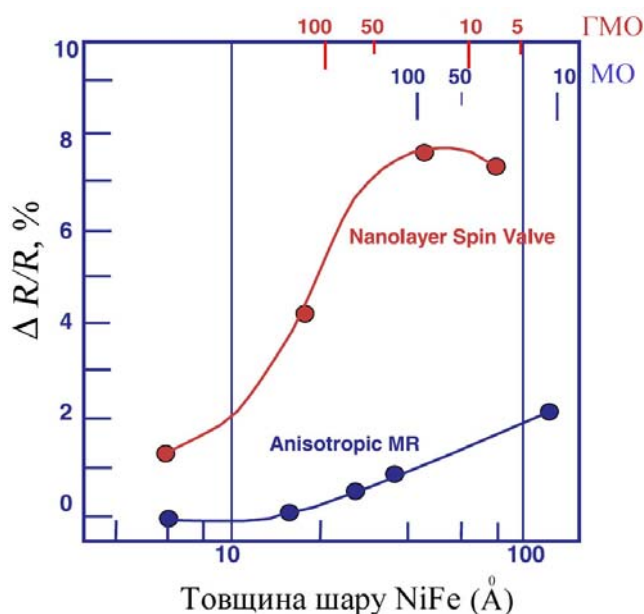


Рисунок 1.7 – Типові амплітуди АМО та ГМО у залежності від товщини шару пермалою. Адаптовано з [15]

У таблиці 1.1 наведено порівняння явищ гігантського та анізотропного магнітоопору. Основна відмінність – це природа явищ. У ефекті гігантського магнітоопору – це обмінна взаємодія (диференційне SD –розсіювання), а у ефекті анізотропного магнітоопору – спін-орбітальна взаємодія.

На відміну від анізотропного магнітоопору – магнітоопір та гігантський магнітоопір ферромагнітних металів та сплавів характеризується не лише більшим значенням величини (до 110% при кімнатній температурі), але також і ізотропністю властивостей при різних взаємних напрямках поля і струму. Величина ГМО зменшується під дією магнітного поля, у той час як АМО може збільшуватися і зменшуватися під дією поля.

Таблиця 1.1 – Порівняння явищ гігантського та анізотропного магнітоопору [15]

Гігантський магнітоопір	Анізотропний магнітоопір
Спостерігається в тонких структурах ФМ/НМ	Може спостерігатися як в тонких плівках так і в масивних матеріалах
Диференційне SD – розсіювання (обмінна взаємодія)	Спін – орбітальна взаємодія
Не залежить від взаємної орієнтації струму I та намагніченості M	Залежить від взаємної орієнтації струму I та намагніченості M
Максимальне значення величини магнітоопору ГМО $\approx 170\%$	Максимальне значення величини магнітоопору АМО $\approx 3.5\%$
Опір завжди зменшується під дією магнітного поля	Опір може зменшуватися або збільшуватися під дією магнітного поля

1.4. Явище тунельного магнітоопору

До наступного покоління спінтроники відносять структури, що ґрунтуються на явищі магнітного тунельного переходу. Такий перехід складається із двох шарів феромагнетика, розділених ізолятором, зазвичай це Al_2O_3 . Причому товщина ізолятора настільки мала (< 2 нм), що електрон може просочуватися через цей бар'єр. Цей процес називається тунелюванням, він обумовлений хвильовою природою електрону.

Класична механіка не дозволяє наночастинці проникати через потенційний бар'єр, висота якого більше за кінетичну енергію частинки. У квантовій механіці таке проникнення можливе лише внаслідок ефекту квантового тунелювання.

Квантовим тунелюванням називається квантово механічний ефект проходження частинки через потенційний бар'єр. Коефіцієнтом прозорості потенційного бар'єру називають величину

$$Q = I / I_0,$$

де I – інтенсивність хвилі де Бройля, яка пройшла через потенційний бар'єр, а I_0 – інтенсивність хвилі, що падає на бар'єр.

Якщо електроди по обидва боки від тунельного бар'єру є феромагнітними, то провідністю такої системи можна керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля. У цьому випадку говорять про тунельний магнітоопір (ТМО). Перші повідомлення про виявлення помітного ТМО у літературі були відмічені у 1975 році для тунельної структури Fe/Ge/Co при температурі 4,2 К. Якщо намагніченості феромагнітних шарів антипаралельні, величина електричного опору є більшою. Таке явище, коли електроопір магнітного тунельного контакту залежить від відносноорієнтації намагніченостей феромагнітиків, називають тунельним магніторезистивним ефектом. Кількісно ТМО визначається за співвідношенням:

$$TMO = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{G_P - G_{AP}}{G_{AP}}, \quad (1.6)$$

R_P і R_{AP} – електроопір, виміряний у паралельній і антипаралельній конфігураціях намагніченості феромагнітних шарів, а G_P і G_{AP} – відповідні значення електричної провідності.

У 1995 році з'явилися результати про достатньо високі значення ТМО у структурах ФМ/Д/ФМ (де Д – діелектрик), виміряні при кімнатній температурі (до 18%). Перспективність та актуальність досліджень тунельного магнітоопору були спричинені успіхами при дослідженнях гігантського магнітоопору і результатом необхідності вдосконалення технологічного обладнання. З часом параметри тунельного перевищили параметри гігантського магнітоопору. Спостереження відносно великих значень ТМО відкрило можливість використання тунельних магнітних контактів для фундаментальних досліджень поверхневого магнетизму і спінової поляризації в різноманітних феромагнітних матеріалів.

Значення ТМО в тунельних контактах досягають декількох сотень процентів у невеликих магнітних полях (десятки ерстед). Цього достатньо, щоб ТМО пристрої були комерційно привабливими для розробки на їх основі елементів для зчитування інформації в жорстких магнітних дисках та магнітної пам'яті з довільним доступом (МПДД). Перевагами МПДД є висока швидкодія, малий розмір, енергонезалежність, невеликі керуючі напруги.

1.5. Застосування наноструктур з ефектами гігантського та анізотропного магнітоопору у спінтроніці та біотехнологіях

Великий інтерес для практичного застосування мають магнітні плівкові структури, що характеризуються ефектами гігантського, анізотропного, тунельного магнітоопорів, аномальним магнітооптичним відгуком, ефектом обмінного зміщення та іншими ефектами.

Плівкові системи, у яких можлива реалізація ефектів ГМО, ТМО, АМО знайшли практичне застосування при виготовленні чутливих елементів сенсорів величини та напрямку магнітного поля, біосенсорів, енергонезалежних типів пам'яті, мемристорів [2 - 8, 16]. На рис.1.8 зображені комерційні АМО датчики: датчик кута повороту та датчик величини поля. Плівкові матеріали, що характеризуються ефектами ГМО та АМО знайшли широке застосування в автомобільній промисловості як вимірювачі швидкості обертання та детектори кутів і положення (рис. 1.9) [7-8].

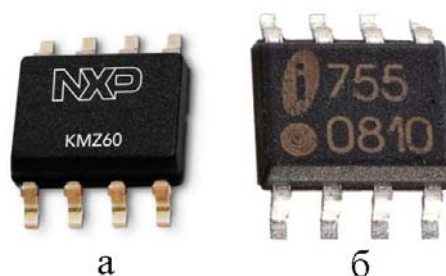


Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд комерційних АМО датчиків: датчик кута повороту NXP KMZ 60 (а) та датчик величини поля GmbH AFF755B (б). Адаптовано з [8]

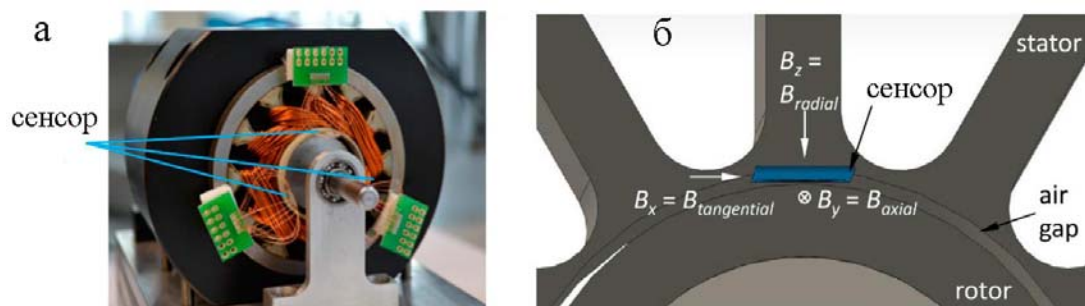


Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) розміщення сенсору положення між ротором та статором двигуна. Адаптовано з [8]

Застосування магніторезистивних датчиків для вимірювання положення є привабливим завдяки безконтактному способу зондування, який забезпечує відсутність механічної взаємодії між рухомими об'єктами.

Плівки в яких реалізується ефект ГМО використовуються для конструкцій у датчиках вимірювання величини магнітного поля (рис.1.10). Для застосування в сенсорах вимірювання кута повороту вони не придатні, через те що їх магніторезистивні властивості не залежать від напрямку магнітного поля.

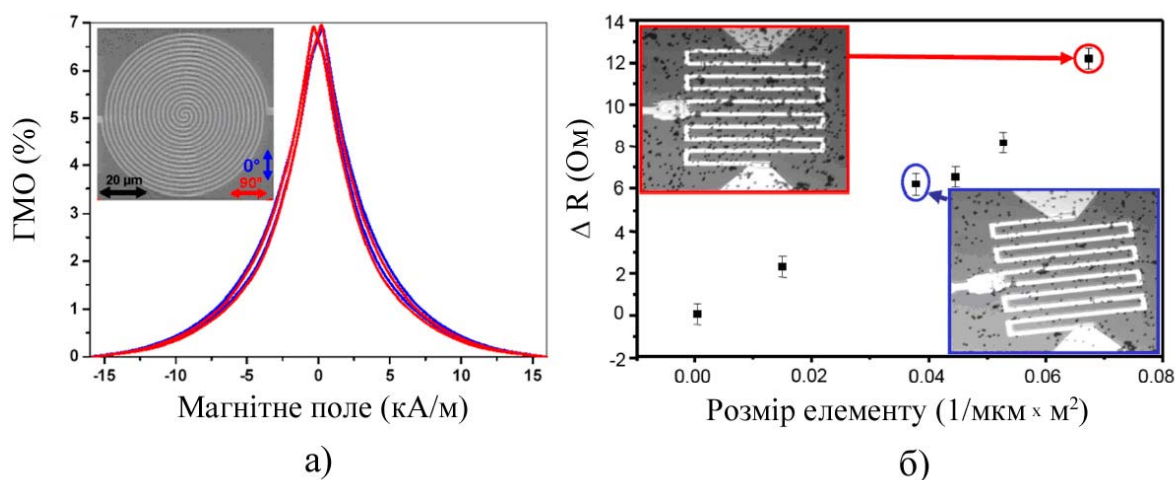


Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд датчика ГМО для вимірювання величини магнітного поля. Адаптовано з [15]

Плівки, що характеризуються ефектом ГМО, застосовуються у біомедицині як чутливий елемент чипів (рис.1.11). Такі плівки стали потужним інструментом біомедицини, де важливо мати чутливу та швидку систему біомолекулярного виявлення [6, 16]. Біосенсори використовують у пристроях, які сконструйовані за принципом Lab-on-a-chip («лабораторія на чипі») [7]. У роботі [16] описано розробку простого та чутливого методу виявлення вірусу грипу (типу А) на основі ГМО-біосенсору.

Цей аналіз використовує моноклональні антитіла до вірусного нуклеопротеїну у поєднанні з магнітними наночастинками. Для підвищення чутливості і точності вимірювань біосенсорів на одному чипі розміщують від

кількох десятків до декількох тисяч плівкових елементів, що характеризуються явищем ГМО. Біосенсори дозволяють проводити експрес-тести і виявляти різні захворювання, а також визначати вміст певної речовини в організмі людини. Як чутливі елементи у таких датчиках застосовують тонкі магнітні плівки товщиною в декілька сотень нанометрів.

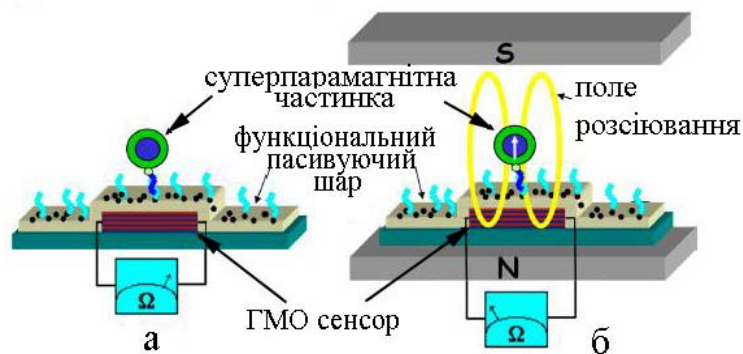


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення роботи біосенсору до прикладання (а) та при прикладанні зовнішнього магнітного поля (б). Адаптовано з [7]

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 [7, 8]. Зменшення геометричних розмірів елементів при збереженні їх чутливості до магнітного поля і точності вимірювання параметрів забезпечить можливість застосування біосенсорів для контролю стану здоров'я людини в реальному часі.

Ведуться розробки та вдосконалення 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. У МПДД у якості елементів носіїв інформації застосовуються магнітні наночастинки та магнітні гранульовані плівкові сплави з високим значенням ГМО. Зокрема, такими елементами носіїв інформації можуть бути нанодиски з вихревим розподілом намагніченості [7]. Дослідження приведені у роботах [7, 8] показали, що з допомогою схрещених змінних магнітних полів, що створюються плоскими провідниками, один з яких розміщений зверху, а інший знизу від масиву наночастинок, можна здійснювати перемикання стану намагніченості

наночастинок з одного положення (ортогональна компонента намагніченості направлена вгору) в інший (ортогональна компонента намагніченості направлена вниз). Таким способом можна записувати або зчитувати інформацію. Магніторезистивна пам'ять має швидкодію, співрозмірну зі статичною оперативною пам'яттю, таку ж щільність комірок, але менше енергоспоживання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика отримання плівкових систем методом конденсації у вакуумі

Існує багато методів отримання плівкових систем. Серед методів можна виділити: методи конденсації речовини випаровуванням на підкладку у вакуумі (лазерне, термічне, магнетронне, іонне), електролітичні методи, хімічні методи.

Для отримання магнітних багат шарових плівок або магнітних гранульованих плівок на основі металів, в яких реалізуються ефекти ГМО або АМО використовують установку ВУП-5М (тиск залишкових газів $P \approx 10^{-4}$ Па) (рис. 2.1). Зразки в такому приладі можна отримати методом електронно-променевого випаровування або методом магнетронного розпилення. Отримання плівок методом електронно-променевого випаровування у вакуумі має ряд суттєвих переваг порівняно з іншими методами. Підбираючи режими осадження, можна сформувати потрібну структуру – від аморфної (при низьких швидкостях осадження матеріалів) до кристалічної (при високих швидкостях осадження).

На рис. 2.2 приведено схему отримання плівкових сплавів в вакуумному об'ємі установки ВУП-5М. Як видно з рис. 2.2 – у вакуумній камері знаходяться два незалежних електронно-променевих випарники (1) та (2). Над випарниками розміщений ряд підкладок, на які осаджують плівки. При цьому, склад плівок змінюється поступово – від зразка до зразка, залежно від положення плівки відносно випарників. У результаті цього, у одному технологічному циклі можна отримати до 10 зразка, які відрізняються один від одного лише концентрацією компонентів. Знаючи геометрію процесу осадження, після напилення можна визначити товщину напиленої плівки та розрахувати концентрацію компонентів у плівковому сплаві. Товщина плівок на пластинах (3) та (4) визначалася методом кварцевого резонатора у процесі осадження плівок.

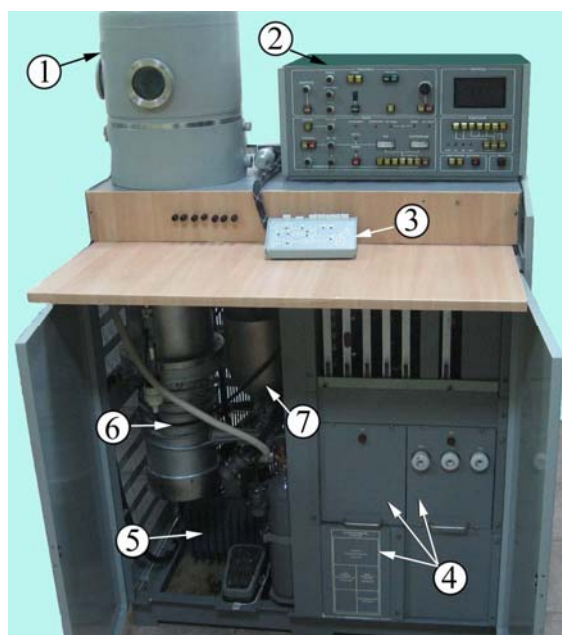


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд вакуумного універсального поста ВУП – 5М:
 1 – робочий об'єм; 2 - блок керування та контролю;
 3 - пульт дистанційного керування; 4 – блоки живлення;
 5 – форвакуумний насос; 6 – високовакуумний насос; 7 – форвакуумний балон

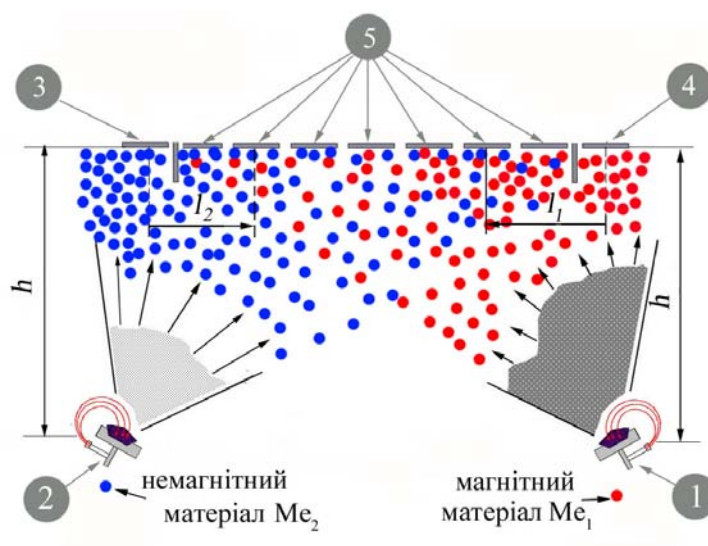


Рисунок 2.2 – Схема осадження плівкових сплавів методом одночасного випаровування матеріалів з двох випарників: 1, 2 – випарники; 3, 4 – кварцеві пластини, 5 – підкладки. Адаптовано з [17]

Товщина сконденсованої плівки визначалась за співвідношенням:

$$d = \frac{N_a \cdot \rho_q}{\rho_f \cdot f_q^2} \cdot \Delta f \quad (2.1)$$

де ρ_q та ρ_f – густина кварцу та матеріалу осажденої речовини відповідно;

f_q – резонансна частота кварцу до початку напилення;

Δf – зміна резонансної частоти кварцу в процесі осадження на неї плівки;

$N_a = d_q \cdot f_q = \text{const} = 1,668 \cdot 10^3$ Гц·м.

При осадженні з двох незалежних випарників, виходячи із геометрії, показаній на рис. 2.2, товщину окремих компонент плівки у довільному зразку можна розрахувати за співвідношенням:

$$d_1 = d_{01} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_1}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad d_2 = d_{02} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_2}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

де d_{01} та d_{02} – товщини плівок («свідків») на пластині кварцевих сенсорів 1 та 2 відповідно, що розміщені над випарниками;

l_1 та l_2 – відстані від кварцевого сенсора 3 та 4 до плівкового зразка;

h – відстань від випарника до кварцевого сенсора.

Знаючи «ефективні» товщини d_1 та d_2 на кварцевих пластинах 3 та 4 (рис.2.2) за співвідношенням (2.3) можна розрахувати атомарну концентрацію кожного компоненту плівкового сплаву.

$$c_1 = \frac{D_1 d_1 \mu_1^{-1}}{D_1 d_1 \mu_1^{-1} + D_2 d_2 \mu_2^{-1}} \quad \text{та} \quad c_2 = \frac{D_2 d_2 \mu_2^{-1}}{D_1 d_1 \mu_1^{-1} + D_2 d_2 \mu_2^{-1}}, \quad (2.3)$$

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

Для формування структури часто виникає необхідність у термообробці зразків. Відпалювання плівкових зразків з метою формування необхідного структурно-фазового стану здійснювалася у безмасляному вакуумі в установці Carbolite STF 16/180 ($P \sim 10^{-5}$ Па), зовнішній вигляд якої показаний на рис.2.3. Високий вакуум створювався турбомолекулярним насосом.

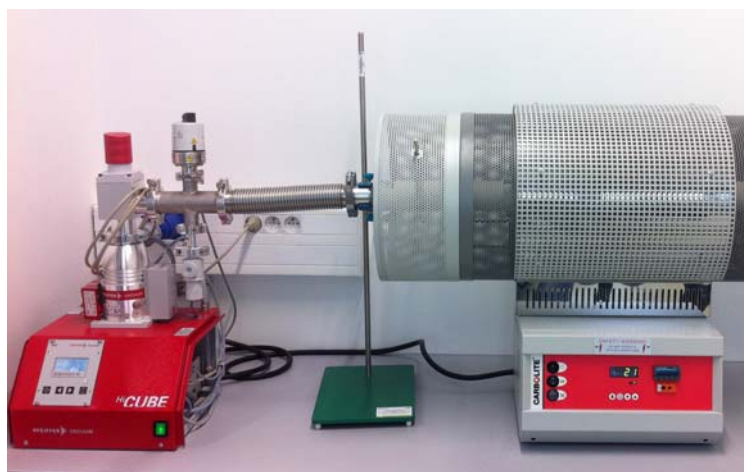


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд приладу Carbolite STF 16/180 для відпалювання зразків у вакуумі до $T_{\text{відп.}} \cong 1000$ К

Максимальна температура термообробки у такій установці $T_{\text{відп.}} \cong 1000$ К. Відпалювання здійснювалося за схемою «нагрівання (швидкість нагрівання 3 – 5 К/хв) → витримка протягом певного часу → охолодження до кімнатної температури».

Даний прилад дає можливість проводити відпалювання зразків як у вакуумі так і у атмосфері інертних газів.

2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей тонкоплівкових систем

Для вимірювання магніторезистивних властивостей плівкових зразків застосовується програмно-апаратний комплекс, представлений на рис.2.4. Вимірювання магнітоопору на приладі проводять при кімнатній температурі при

впливі магнітного поля з використанням 4-точкової схеми вимірювання (рис.2.5). При використанні такої схеми вимірювання між крайніми електродами пропускають струм, а між внутрішніми електродами знімають напругу.

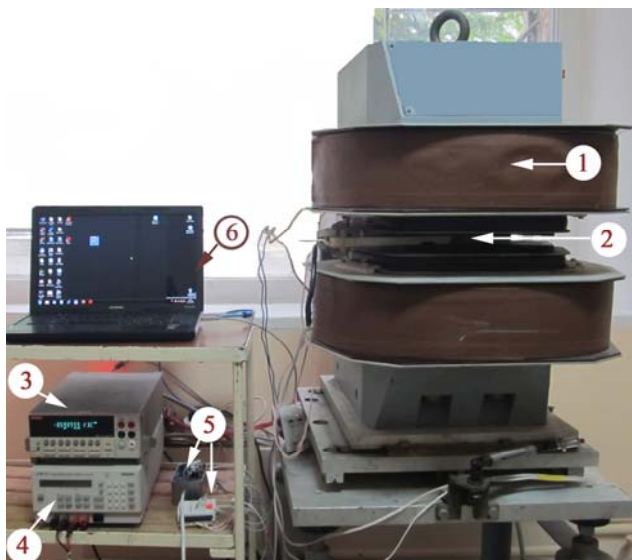


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд програмно-апаратного комплексу для вимірювання магнітоопору: 1 – електромагніт; 2 – тримач зразка; 3 – вольтметр; 4 – блок живлення; 5 – реле. Адаптовано з [17]

Конструкція апаратного комплексу дозволяє змінювати геометрію вимірювання магнітоопору завдяки застосуванню поворотного механізму тримача зразка (рис.2.6).

Струм у площині зразка становить 1 мА, а вимірювання опору можна проводити у двох геометріях (рис. 2.7).

У першому випадку (рис. 2.7 а) прикладене поле H розміщується у площині плівки та паралельно струму (поздовжня геометрія), а у другому – прикладене поле знаходилось у площині плівки, але перпендикулярно струму (поперечна геометрія) (рис.2.7 б).

Для розрахунку коефіцієнта гігантського магнітоопору застосовується співвідношення (1.1), а для розрахунку коефіцієнта анізотропного магнітоопору – співвідношення (1.3).

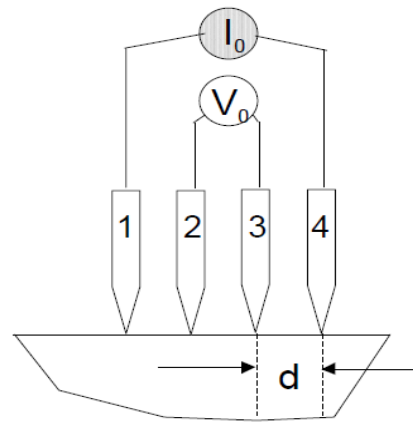


Рисунок 2.5 – Чотирьохконтактна схема вимірювання магнітоопору.
Адаптовано з [18]

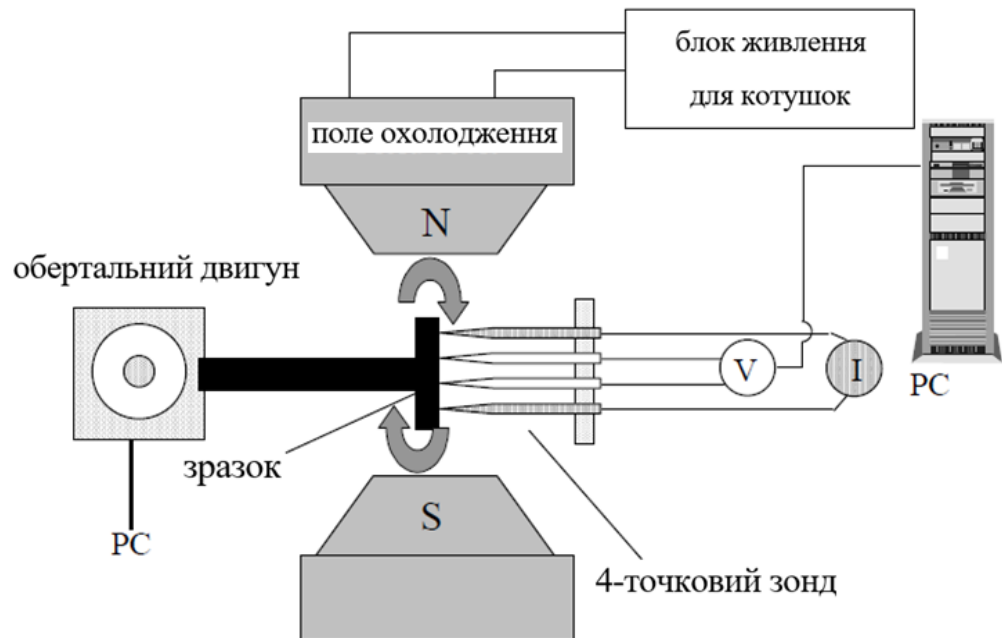


Рисунок 2.6 – Схема приладу для вимірювання величини магнітоопору.
Адаптовано з [18]

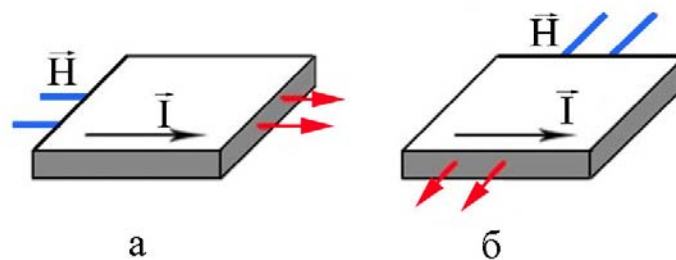


Рисунок 2.7 – Геометрії вимірювання магнітоопору: поздовжня (а) та поперечна (б). Адаптовано з [17]

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Магніторезистивні властивості плівкової системи на основі пермалою та срібла

Магнітні плівкові системи, у яких реалізуються унікальні магніторезистивні ефекти, знайшли практичне застосування при виготовленні чутливих елементів сенсорів величини та напрямку магнітного поля, біосенсорів, енергонезалежної пам'яті.

Довгий час як чутливий елемент датчиків вимірювання положення застосовували одношарові плівки пермалою. Однак, розвиток технологій отримання наноструктур у останні десятиліття дозволив створити наноматеріали, що за деякими параметрами перевершили пермалой (більшим значенням коефіцієнта АМО, температурною стабільністю польових залежностей та ін.).

Вивчення магніторезистивних властивостей плівкових сплавів на основі пермалою та срібла дозволить застосувати ці знання при розробці датчиків положення. У літературі представлена велика кількість робіт по вивченню фізичних властивостей плівкових систем на основі пермалою та срібла. У більшості робіт дослідження були проведені для зразків товщиною $d > 100$ нм. Як було встановлено, існують певні особливості структурного стану при зменшенні товщини зразків плівкових сплавів.

У даному підрозділі приведено аналіз результатів дослідження магніторезистивних властивостей зразків плівкових сплавів, отриманих одночасним випаровуванням з двох незалежних випарників, як то показано на рис. 2.2. Так, з однієї електронно-променевої гармати випаровувався пермалой (сплав на основі нікелю та заліза $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), а з іншої срібло. Було отримано 8 зразків товщиною $d = 40$ нм різного складу - з часткою пермалою у сплаві $0,28 \leq x_{\text{Py}} \leq 0,80$.

Магнітоопір зразків досліджувався у двох геометріях - поперечній та поздовжній. Схеми вимірювання приведені у попередньому розділі на рис. 2.7. Дослідження магнітоопору були проведені при кімнатній температурі для невідпалених зразків та після відпалу зразків у вакуумі (при температурі $T_{\text{відп}} = 700\text{K}$ впродовж часу $t = 60$ хв) на приладі Carbolite STF 16/180, зображеному на рис.2.3.

Розглянемо результати вимірювання магнітоопору. На рис.3.1 представлені польові залежності магнітоопору деяких з отриманих зразків плівкових сплавів на основі Fe та Ag (невідпалених та після відпалювання при $T_{\text{відп}} = 700\text{K}$) товщиною 40 нм при різних значеннях x_{Fe} .

Дослідження магніторезистивних властивостей показало, що невідпалені плівки характеризувалися ізотропним магнітоопором у широкому інтервалі складу. При ізотропному характері криві для поперечної та поздовжньої геометрії майже співпадають. Польові залежності магнітоопору були типовими для гранульованих систем, що складаються з суперпарамагнітних гранул, розміщених у немагнітній матриці. Максимальна величина гігантського магнітоопору (рис.3.2) при вимірюваннях у поздовжній геометрії при $T_{\text{вимір.}} = 300\text{K}$ спостерігалась у плівці при частці пермалою у сплаві $x_{\text{Fe}} = 0,39$ (ГМО = 3,15 %). Величина ГМО розраховувалася за співвідношенням (1.1).

Після відпалу зразків при температурі $T_{\text{відп}} = 700\text{K}$ спостерігали, що характер польової залежності магнітоопору змінився на анізотропний. Анізотропія виражається у тому, що криві, виміряні для поперечної та поздовжньої геометрії вимірювання відрізняються. У поперечній геометрії магнітоопір з ростом напруженості поля – зменшується, а у поздовжній геометрії – магнітоопір з ростом поля спочатку зростає, а потім дещо зменшується (рис.3.1).

За співвідношенням (1.3) для відпалених зразків було розраховано коефіцієнт анізотропного магнітоопору. Результати розрахунків показали, що у відпалених зразках величина АМО зростає зі збільшенням частки пермалою у сплаві. Така зміна магніторезистивних властивостей пов'язана зі зміною структурного стану.

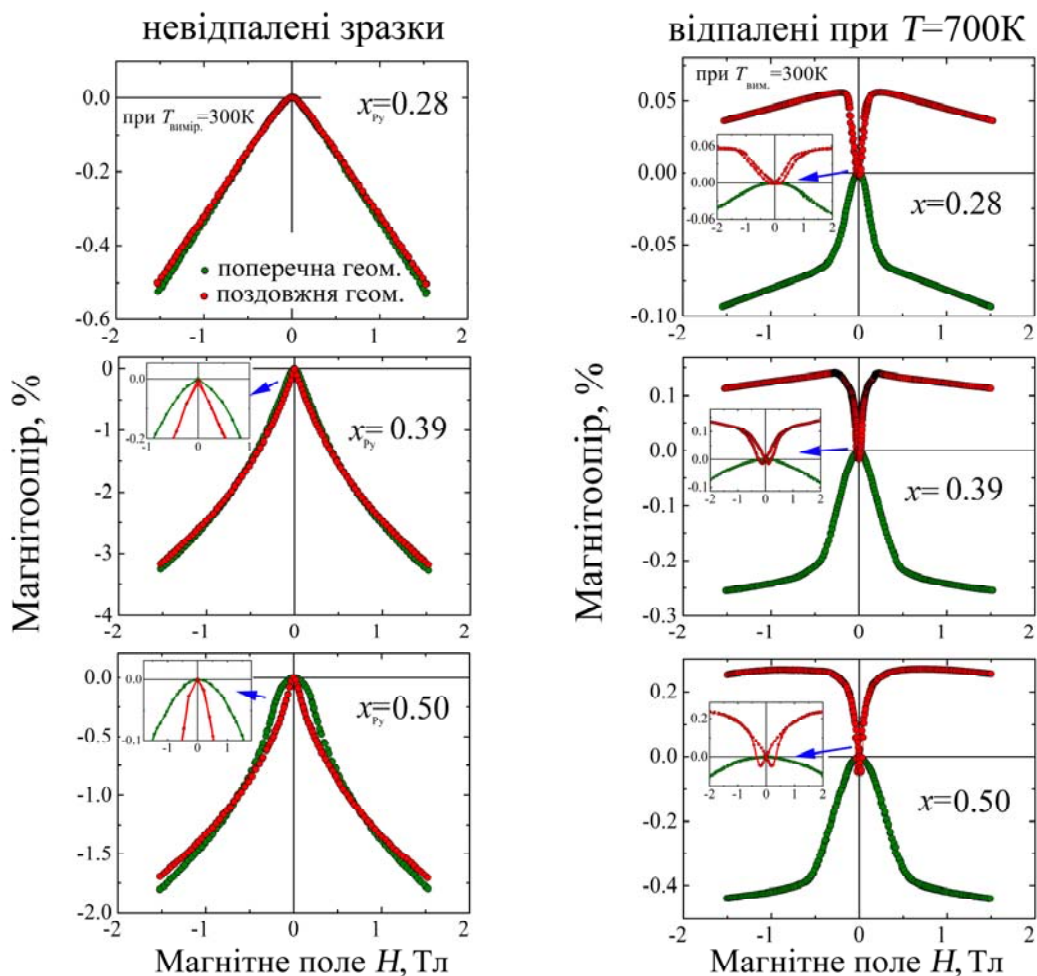


Рисунок 3.1 – Польові залежності магнітоопору невідпалених та відпалених при $T_{\text{відп}} = 700\text{K}$ зразків плівкових сплавів на основі Pu та Ag різного складу, виміряні у поперечній (●) та поздовжній (●) геометріях, виміряні при $T_{\text{вимір.}} = 300\text{K}$. Товщина зразків $d = 40\text{nm}$

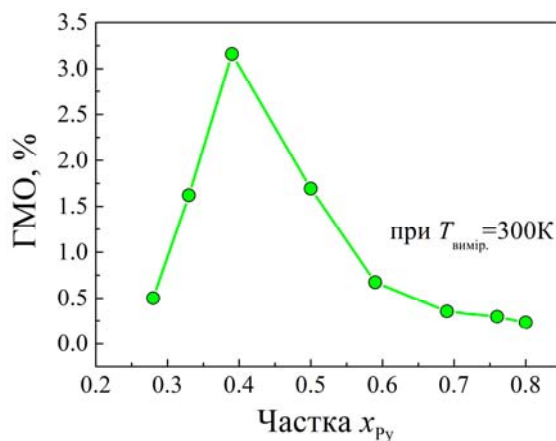


Рисунок 3.2 – Залежність величини ГМО невідпалених зразків плівкових сплавів на основі Pu і Ag товщиною 40nm від їх складу. Вимірювання були виконані у поздовжній геометрії при $T_{\text{вимір.}} = 300\text{K}$

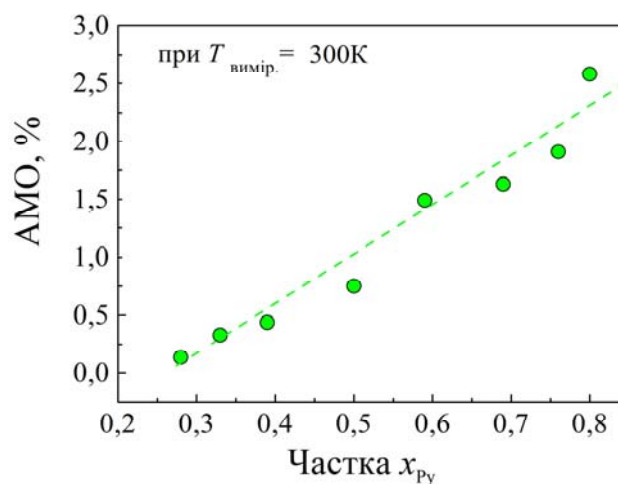


Рисунок 3.3 – Залежність величини коефіцієнта АМО від частки пермалою x_{Py} у зразках плівкового сплаву на основі пермалою та срібла товщиною 40 нм після відпалювання при температурі $T_{\text{відп.}} = 700\text{К}$. Вимірювання проведені при $T_{\text{вимір.}} = 300\text{К}$

У відпалених при температурі 700 К плівкових зразках товщиною $d = 40\text{ нм}$ коефіцієнт АМО змінювався від 0,14 % (при $x_{\text{Py}} = 0,28$) до 2,58 % (при $x_{\text{Py}} = 0,80$) (рис.3.3).

3.2 Біосенсори

3.2.1 Принцип дії, основні компоненти, галузі застосування біосенсорів

Гібридний аналітичний прилад, який складається з біоселективного елемента і фізичного перетворювача, що трансформує біохімічний сигнал в електричний, називається біосенсор [19].

На рис. 3.4 представлена принципова схема дії біосенсора, що складається, з просторово сполучених трансдюсера і іммобілізованого біорозпізнавального елемента. На першому етапі дії біосенсора відбувається «впізнання» біоелементом специфічного для нього речовини з багатокomпонентної суміші. На другій стадії відбувається перетворення інформації про протікання біохімічної реакції в форму електрохімічного або іншого (наприклад, оптичного) сигналу. Ця

стадія, власне, і є ключовою для здійснення роботи біосенсора. Стадія сполучення біохімічної і електродної (або іншої фізико - хімічної) реакцій [20].

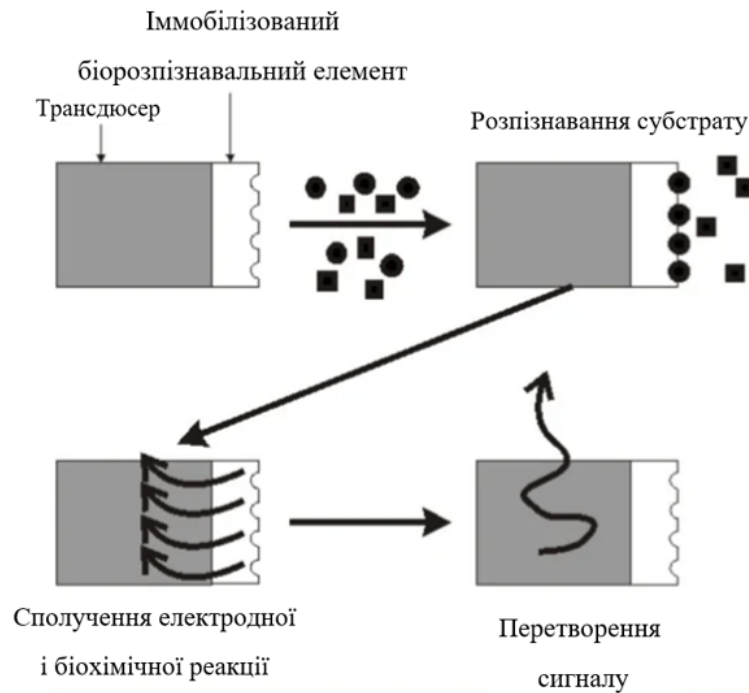


Рисунок 3.4 – Принципова схема дії біосенсора. Адаптовано з [20]

Блок-схема біосенсора включає три сегменти, а саме: датчик, перетворювач і пов'язані електрони. У першому сегменті сенсор – це чутлива біологічна частина, другий сегмент – це частина детектора, яка змінює результуючий сигнал від контакту аналіту, а для результатів він відображається в доступному вигляді. Остання частина містить підсилювач, який відомий як схема формування сигналу, блок відображення, а також процесор [20].

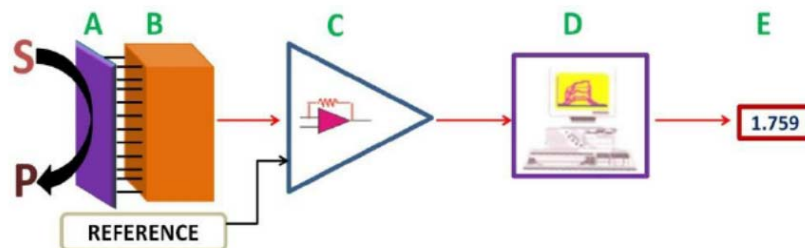


Рисунок 3.5 – Принципова схема, що показує основні компоненти біосенсора. Адаптовано з [20]

Біокаталізатор (A) перетворює субстрат (S) в продукт (P). Цю реакцію сприйняття визначає перетворювач (B), який перетворює її в електричні сигнали. Вихід із перетворювача посилюється (C), обробляється (D) і відображається (E) [20].

Невідкладне використання біосенсорів набуло першочергового значення в області відкриття ліків, біомедицини, стандартів безпеки харчових продуктів, оборони, безпеки та моніторингу навколишнього середовища. Це призвело до винаходу точних і потужних аналітичних інструментів, що використовують біологічний чутливий елемент як біосенсор.

Глюкометри, що використовують стратегію електрохімічного виявлення кисню або перекису водню з використанням іммобілізованого електрода глюкозооксидази, започаткували відкриття біосенсорів. Останні досягнення в біологічних техніках та приладах, що включають флуоресцентну мітку до наноматеріалів, підвищили межу чутливості біосенсорів. Використання аптамерів або нуклеотидів, афітіл, пептидних масивів і полімерів із відбитком молекул дає інструменти для розробки інноваційних біосенсорів порівняно з класичними методами. Інтегровані підходи дали кращу перспективу для розробки специфічних і чутливих біосенсорів з високим регенеративним потенціалом.

Різні біосенсори, починаючи від наноматеріалів, полімерів і закінчуючи мікробами, мають більш широкі потенційні можливості застосування. Дуже важливо інтегрувати багатоаспектні підходи до розробки біосенсорів, які мають потенціал для різноманітного використання [21].

3.2.2 Переваги біосенсорів. Біосенсори на основі наноматеріалів

В останнє десятиліття стрімко зросла кількість розробок біосенсорів з використанням нанотехнологій. Проте більшість цих робіт є емпіричними і стосуються окремих типів перетворювачів та біосенсорів. Переважно розробники обирають тип наноматеріалу без ґрунтовного аналізу можливостей різних систем перетворення сигналу, специфічних особливостей перетворювачів та

біоселективного матеріалу. Тому основні переваги біосенсорів не завжди використовуються з максимальною ефективністю [22].

До речі серед переваг біосенсорів слід відзначити їхню високу чутливість і селективність; швидкість аналізу та відсутність необхідності попередньої підготовки проби; простоту використання; досить широкий діапазон речовин, які можуть бути детектовані; можливість мініатюризації і високий рівень інтеграції; можливість створення мультисенсорів; придатність для використання в польових умовах; порівняно низьку собівартість за умови масового виробництва [19].

Можливі різні шляхи використання наноматеріалів для покращення аналітичних характеристик біо- та хемосенсорів: наноматеріали можуть бути коїммобілізовані (тобто закріплені на твердому носії) разом із біологічною складовою, або ж інтегровані в поверхню перетворювача. Також деякі наночастинки можна самостійно застосовувати як селективний елемент хемосенсорів. Це забезпечує широкий спектр підходів до вдосконалення аналітичних характеристик біосенсорних пристроїв. Отже, залежно від поставлених задач можна контрольовано змінювати необхідні характеристики сенсорів, підбравши відповідний наноматеріал та розробивши процедуру його застосування [22].

Для розробки іммобілізації біосенсорів використовується широкий спектр наноматеріалів, починаючи від наночастинок золота, срібла, кремнію та міді, матеріалів на основі вуглецю, таких як графіт, графема та вуглецеві нанотрубки. Крім того, матеріали на основі наночастинок забезпечують велику чутливість і специфічність для розробки електрохімічних та інших типів біосенсорів. Серед металевих наночастинок наночастинки золота мають потенційне застосування через їхню стійкість до окислення і майже не мають токсичності, тоді як інші наночастинки, такі як срібло, окислюються та мають токсичний прояв, якщо використовуються для внутрішнього застосування в медицині, як ліки. Здебільшого використання наноматеріалів для біосенсорів має потенційні проблеми, які необхідно вирішити, якщо вони будуть використовуватися для біомедицини. Крім того, стратегії посилення сигналу на основі наночастинок

мають потенційні переваги та недоліки. Тим не менш, наноматеріали вважаються критичними компонентами в біоаналітичних пристроях просто для підвищення чутливості та меж виявлення для виявлення однієї молекули. У цьому контексті варто згадати винахід наночастинок на основі платини для електрохімічної ампліфікації з реакцією на одну мітку для виявлення низької концентрації ДНК. Аналогічно, напівпровідникові квантові точки та нанокристали оксиду заліза, що мають оптичні, а також магнітні властивості, можуть бути ефективно пов'язані з лігандами, націленими на пухлину, такими як моноклональні антитіла, пептиди або невеликі молекули, щоб націлюватися на пухлинні антигени з високою спорідненістю та специфічністю. Технологію квантових точок можна застосувати для розуміння мікросередовища пухлини для лікування, а також для доставки нано-медицини. Використання біосенсорів консольного розміру (мілі-, мікро- та нано-кантилеверів) навіть критично проаналізовано через їх потенціал застосування в різних областях [21].

ВИСНОВКИ

1. Вивчено фізичні основи магніторезистивних ефектів, а саме явищ анізотропного, гігантського та тунельного магнітоопорів. Встановлено, що гігантський магнітоопір обумовлений обмінною взаємодією, анізотропний – спін-орбітальною, а тунельний – тунелюванням електронів через потенційний бар'єр.

2. Встановлено, що найбільшим коефіцієнтом характеризується тунельний магнітоопір (до 150%). Гігантський магнітоопір при вимірюваннях за кімнатної температури характеризується значеннями до 50%, а анізотропний до 4%.

3. Встановлено, що магнітні плівкові матеріали, що характеризуються явищами АМО, ГМО та ТМО знайшли широке застосування у автомобілебудуванні завдяки відсутності механічної взаємодії між рухомими об'єктами, у спінтроніці при виготовленні датчиків, пам'яті з довільним доступом, тунельних контактів, у біомедицині при виготовленні біосенсорів, сконструйованих за принципом Lab-on-a-chip «лабораторія на чипі».

4. Встановлено, що отримання плівкових структур методом термічного випаровування у вакуумі має такі переваги: чистота зразків (відсутність оксидів та нітридів), можливість формування необхідного структурного стану у залежності від режиму осадження, а відповідно – можливість впливу на фізичні параметри тонкоплівкових зразків.

5. Встановлено, що невідпалені зразки плівкових сплавів на основі пермалою та срібла товщиною $d = 40$ нм характеризуються ізотропним магнітоопором в широкому інтервалі складу при $0,28 \leq x_{\text{Pb}} \leq 0,80$ (де x_{Pb} – частка пермалою у сплаві). Відпалювання зразків вказаного плівкового сплаву при температурі $T_{\text{відп.}} = 700\text{K}$ призвело до формування анізотропних магніторезистивних властивостей у вказаних плівкових зразках. Такі зразки можуть бути перспективними при застосуванні їх у якості чутливих елементів сенсорів напрямку магнітного поля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. Adem, S. Jain, M. Sveiven, [et al.]. Giant magnetoresistive biosensors for real-time quantitative detection of protease activity // *Scientific Reports – Nature Portfolio*. – 2020. – 10 vol., 7941 issue. – 1-10 p.
2. H.M. Shen, L. Hu, X. Fu. Shen H.M. Integrated Giant Magnetoresistance Technology for Approachable Weak Biomagnetic Signal Detections. Shanghai, Hangzhou: School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, 2018. – 18 p.
3. Daughton J.M. GMR applications // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – Elsevier. – 1999. – 192 vol., 2 issue. – 334-342 p.
4. Han W. Perspectives for spintronics in 2D materials // *Apl. materials*. – American Institute of Physics. – 2016. – 4 vol., 3 issue. – 1-9 p.
5. W. Wang, Y. Wang, L. Tu [et al.]. Magnetoresistive performance and comparison of supermagnetic particles on giant magnetoresistive sensor-based detection system // *Scientific Reports*. – Nature Research. – 2014. – 4 volum., 5716 issue. – 1-5 p.
6. D.A. Hall, R.S. Gaster, T. Lin [et al.]. GMR biosensor arrays: A system perspective // *Biosens. Bioelectron*. – Elsevier. – 2010. – 25 vol., 9 issue. – 2051-2057 p.
7. I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel [et al.]. Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications. – Bielefeld, Lahnu: Faculty of Physics, University of Bielefeld, Sensitec GmbH, Georg-Ohm-Straße 11 – 2016. – 904. p.
8. L. Jogschies, D. Klaas, R. Kruppe [et al.]. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications. – Garbsen: Institute of Micro Production Technology, Centre for Production Technology, Leibniz Universitaet Hannover, 2015. – 15 p.
9. О.І. Товстолиткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, В.В. Куницький. Фізичні основи спінтроніки. – Вінниця: Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.

10. M. Djania, Yu. Ramli. Development of Sensors Based on Giant Magnetoresistance Material – Bandung, Padang: Procedia Engineering 32, 2012. - 68 p.
11. S. Tumanski. Thin Film Magnetoresistive Sensors. – Warsaw: CRC Press, 2001. – 576 p.
12. D. Peng, J. Wang, L. Wang [et al.]. Electron transport properties of magnetic granular films // Science China Physics, Mechanics & Astronomy. – Science China Press. – 2013. – 56 vol., 1 issue. – 15-28 p.
13. T.R. McGuire, R.I. Potter. Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys // IEEE Transactions on magnetics. – IEEE Magnetics Society. – 1975. – 11 vol., 4 issue. – 1018 - 1038 p.
14. A. Johnson, H. Siegle, H. Hahn. Effect of Anisotropy Influences on the Angle Dependent Resistance Changes in IrMn Spin-Valves // Physica Status Solidi A. – Wiley-VCH. – 2002. – 189 vol., 3 issue. – 637-642 p.
15. B.A. Gurney, M. Carey, C. Tsang [et al.]. Spin Valve Giant Magnetoresistive Sensor Materials for Hard Disk Drives // Ultrathin Magnetic Structures IV. Applications of Nanomagnetism. – Springer. – 2004. – 4 vol., – 149-175 p.
16. V.D. Krishna, K. Wu, A.M. Perez, J.-P. Wang. Giant Magnetoresistance-based Biosensor for Detection of Influenza A Virus // Front. microbiol. – Frontiers Media S.A. – 2016. – 7 vol., 400 issue. – 1-8 p.
17. I.O. Shpetnyi, D.M. Kondrakhova, S.I. Vorobiov [et al.]. The structural-phase state and magnetoresistive properties of thin film alloys obtained by co-evaporated Cu and Co // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – North Holland (Elsevier). – 2019. – 474 vol., issue 1. – 624-631 p.
18. C. Reig, S. Cardoso; S.C. Mukhopadhyay. Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors. From Basis to State-of-the-Art Applications. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – 300 p.
19. О.І Мириглод, І.М Мириглод. Колективне авторство в українській науці: Маргєнальний ефект, чи нове явище? – Львів: Наукометрія і видавнича справа, 2020. – 48 с.

20. Tarun Agarwal. What is a Biosensor: Types & Its Applications. Raleigh: – Electronics projects focus, 2018. – 12 p.
21. S.Vigneshvar¹, C.Sudhakumari, B.Senthilkumaran, H. Prakash. Recent Advances in Biosensor Technology for Potential Applications – An Overview // Front. Bioeng. Biotechnol. – VIT University Chennai Campus, Department of Animal Biology, University of Hyderabad, School of Life Sciences, University of Hyderabad. – 2016. – 4 vol., issue 11. – 2-4 p.
22. А. Долінський, В Кремень. Як удосконалити електрохімічні біосенсори, використовуючи наноматеріали. Київ: – Національна академія наук України, 2021 – 22 с.