

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота здобувача вищої освіти
Сенсори магнітного поля на основі багатокomпонентних матеріалів
спеціальності 171 - Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП.м-01н

Т.В.Шкарупа

Науковий керівник

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

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

«02» травня 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Шкарупи Тараса Валерійовича

Тема роботи **Сенсори магнітного поля на основі багатокомпонентних матеріалів**

затверджена наказом по університету від «18» квітня 2022 р., № 0270-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 17 травня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) На момент постановки задачі кваліфікаційної роботи дослідниками різних країн був накопичений значний експериментальний матеріал стосовно електрофізичних і магніторезистивних властивостей металевих плівкових матеріалів із різною кількістю компонентів. Вимірювання магнітоопору (МО) цих матеріалів вказують на те, що він може бути звичайним або гігантським МО. У літературних джерелах міститься інформація про використання багатокомпонентних плівкових матеріалів як чутливих елементів сенсорів магнітного поля. У зв'язку з цим мету роботи можна сформулювати таким чином: аналіз літературних даних стосовно МО дво- п'ятикомпонентних металевих плівок та можливості їх застосування як чутливих елементів сенсорів магнітного поля.

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

1. Вступна частина, літературний огляд експериментальних результатів різних авторів, крім співробітників кафедри ЕЗПФ.

2. Методика і техніка експерименту, які практикуються на кафедрі ЕЗПФ.

3. Експериментальні результати стосовно МО одно- і двокомпонентних плівок з різною кількістю шарів.

4. Експериментальні результати стосовно МО три- п'ятикомпонентних плівок з різною кількістю шарів.

5. Висновки на основі аналітичного аналізу експериментальних результатів

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

Слайди № 1-2. Титульний лист, актуальність і мета роботи, .

Слайди № 3-5. Літературний огляд, методика і техніка експерименту.

Слайди № 6-8. Експериментальні залежності для МО багатошарових одно-двокомпонентних плівок.

Слайди №9-10. Експериментальні залежності для МО багатошарових три-п'ятикомпонентних плівок.

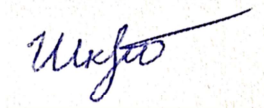
Слайди №11-12. Приклади застосування плівкових матеріалів в сенсорах магнітного поля; висновки.

6. Дата видачі завдання 02.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.05.2022 р.	вик.
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 12.05.2022 р.	вик.
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 17.05.2022 р.	вик.
5.	Попередній захист роботи	24.05.2022 р., онлайн	вик.
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	26.05.2022 р., онлайн	вик.

Здобувач вищої освіти



Шкарупа Т.В.

Науковий керівник



Проценко І.Ю.

РЕФЕРАТ

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні особливості сенсорів магнітного поля та магніторезистивні властивості багатокомпонентних матеріалів сенсорної електроніки.

На основі літературних даних показано, що розвиток сенсорної електроніки стимулює пошук нових багатошарових систем з заданими параметрами стійкими до впливу різних зовнішніх факторів.

Робочими елементами сенсорів на основі металевих плівок часто можуть бути шари Co/Cu, Fe/Cr. Якщо порівнювати плівкові матеріали із СЗРЕ з мультишарами і гранульованими сплавами, то вони значно простіші у виготовленні, а також мають велику перспективу застосувань для різноманітних складових приладів. З наукової і практичної точки зору визиває зацікавленість у порівнянні фізико-механічних властивостей, а саме магнітних, магнітооптичних та магніторезистивних, систем із різним ступенем розчинності окремих компонент.

Робота викладена на 36 сторінках та складається з трьох розділів, містить 12 рисунків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКОВІ СИСТЕМИ, БАГАТОКОМПОНЕНТНІ МАТЕРІАЛИ,

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПЛІВКОВОЇ СЕНСОРИКИ	7
1.1 Концепція формування чутливих елементів магнітоелектроніки	7
1.2 Застосування плівкових систем з спін-залежним розсіюванням електронів, як чутливих елементів датчиків неелектричних величин	8
1.3 Датчики на основі анізотропного магніторезистивного ефекту	12
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ.	16
2.1 Методика формування багатокомпонентних плівок	16
2.2. Анізотропія магнітних властивостей	19
РОЗДІЛ 3 МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	22
3.1. Магніторезистивні властивості багатокомпонентних плівкових матеріалів	22
3.2. Функціональні та технологічні особливості сенсорів магнітного поля	24
ВИСНОВКИ.....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	31

ВСТУП

У різноманітних технологічних процесах, на сучасних виробництвах широко застосовуються датчики різних фізичних величин: тиску, температури, деформації, вологості, індукції магнітного поля і інші. Крім датчиків температури [1-4], тиску, які застосовуються найчастіше, виходять на передній план техніки такі специфічні датчики, як сенсори магнітного поля.

Приладобудування з застосуванням сенсорів на основі тонких металевих плівок стимулювало розвиток методики і техніки одержання різноманітних мультишарів на основі металів з широким спектром фізико-хімічних властивостей. Тонкі плівки на основі феромагнітних та немагнітних металів із СЗРЕ знайшли застосування як елементна база у приладах мікроелектроніки, спінтроніки і сенсорів.

Мета роботи полягала в аналізі літературних даних стосовно магніторезистивних властивостей багатокомпонентних плівкових матеріалів, які використовуються як чутливі елементи сенсорів магнітного поля.

Результати роботи були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка», м. Суми, 2020 рік.

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПЛІВКОВОЇ СЕНСОРИКИ

1.1 Концепція формування чутливих елементів магнітоелектроніки

За останні десятиріччя в результаті поєднання мікроелектроніки, спінтроніки та інтегральних магніточутливих елементів виникла нова науково-технічна галузь електроніки – магнітоелектроніка. Цей технічний напрям відноситься до твердотільної електроніки і пов'язаний із впливом магнітного поля на магнітооптичні і магніторезистивні властивості тонких багат шарових плівок. Взевши за основу ці ефекти, можна виготовити ряд різноманітних магнітних приладів, таких як датчики тиску, газу, температури, магнітних характеристик неелектричних величин, та ін. Серед переваг таких приладів, слід назвати повну електричну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів, детектування малої величини і напряму індукції магнітного поля з високою локальністю та ін.

Дуже стрімкий розвиток магнітоелектроніка отримала в останнє десятиліття у зв'язку з відкриттям гігантського і тунельного магніторезистивних ефектів у тонкоплівкових мультишарах та негомогенних магнітовпорядкованих середовищах. У немагнітних провідниках зміна опору виникає під дією сили Лоренца на рухомий електрон і в звичайних умовах цей ефект відносно невеликий. У той час, як в магнітних матеріалах та магнітовпорядкованих наноструктурах поляризація спіна електрона, поряд із силою Лоренца, дає додатковий внесок в магніторезистивний ефект і відносно дуже великі зміни магнітоопору можуть бути отримані навіть при досить слабких магнітних полях. Подальше застосування та розвиток цих ефектів неможливі без глибокого розуміння фізики явищ. Відгалудження магнітоелектроніки, в основу якого покладено поняття спіну - називають спінелектронікою або спінтронікою. Серед великої кількості ефектів, які

знайшли широке застосування в магнітоелектроніці та спінтроніці, слід виділити звичайний лоренцівський магнітоопір (ЛМО), анізотропний магнітоопір (АМО) феромагнітних матеріалів і сплавів, гігантський магнітоопір (ГМО) в мультишарах та неоднорідних магнітних середовищах, тунельний магнітоопір (ТМО) тунельних контактів з феромагнітними електродами. Ряд магніторезистивних ефектів у даний час знаходить широке застосування в промисловості. Наприклад, ефекти АМО і ГМО використовуються в голівках зчитування магнітних дисків, розроблені прототипи магнітної пам'яті на цих ефектах. Практично всі вони використовуються в якості фізичної основи роботи магніточутливих датчиків.

Значного поширення набули: дискретні й інтегральні перетворювачі магнітного поля, магнітокеровані і магніточутливі інтегральні схеми, магнітні датчики і функціональні магнітоелектронні пристрої. Перелічені прилади мають не тільки самостійне застосування, але і можуть служити базою для створення сучасних магнітоелектронних приладів та обладнання різного призначення. Вироби магнітоелектроніки та спінтроніки використовуються при створенні плівкових сенсорів систем управління виробничими процесами, в автомобільній електроніці, вимірювальній та обчислювальній техніці, побутових приладах та ін.

1.2 Застосування плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів як чутливих елементів датчиків неелектричних величин

Робочим елементом плівкових сенсорів часто виступають мультишари на основі Co/Cu, Fe/Cr та інших плівкових систем. Мультишари на основі магнітних і немагнітних шарів це перші системи, в яких було зафіксовано явище гігантського магнітоопору. Це насправді складні для виготовлення плівкові структури, що представляють інтерес, коли в них реалізується обмінна антиферомагнітна взаємодія, яка дуже залежить від дотримання повторюваності значення товщин фрагментів мультишару. Осциляційний характер розмірних залежностей величини гігантського магнітоопору для

даних структур можна спостерігати при зміні товщини магнітного чи немагнітного прошарку через прояв обмінної взаємодії. Однак невирішеним лишається питання про оптимальну кількість фрагментів та їх структурну стабільність під дією температури та часу.

У порівнянні із мультишарами чи гранульованими сплавами [11] значно простішими з точки зору їх технологічного виготовлення можуть бути спінкляпанні структури, що є основними приладовими структурами на основі матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів, які знайшли широке розповсюдження в мікроелектроніці та спінтроніці.

Частіше за все спін-кляпанні структури реалізуються на основі гігантського магніторезистивного ефекту в багат шарових тонкоплівкових структурах з фіксованим напрямком намагніченості одного з шарів за допомогою розташованого поруч шару антиферромагнітика. Структура чутливого елемента такого приладу і петлі гистерезису від намагніченості і магніторезистивного ефекту представлені на рис. 1.1, відповідно. Механізм зміни намагніченості такої структури при зміні напрямку зовнішнього магнітного поля на протилежний легко зрозуміти, виходячи із міркувань, приведених з роботи [17]. У разі направлення зовнішнього магнітного поля в напрямку намагніченості фіксованого шару опір структури зменшується. Інтеграція таких спінчутливих приладів у традиційну електроніку на основі напівпровідникових матеріалів дасть можливість отримати принципово нові функціональні пристрої. Найбільш поширеною є четверта група, до якої відносяться спін-кляпанні структури, в яких реалізується ефект ГМО.

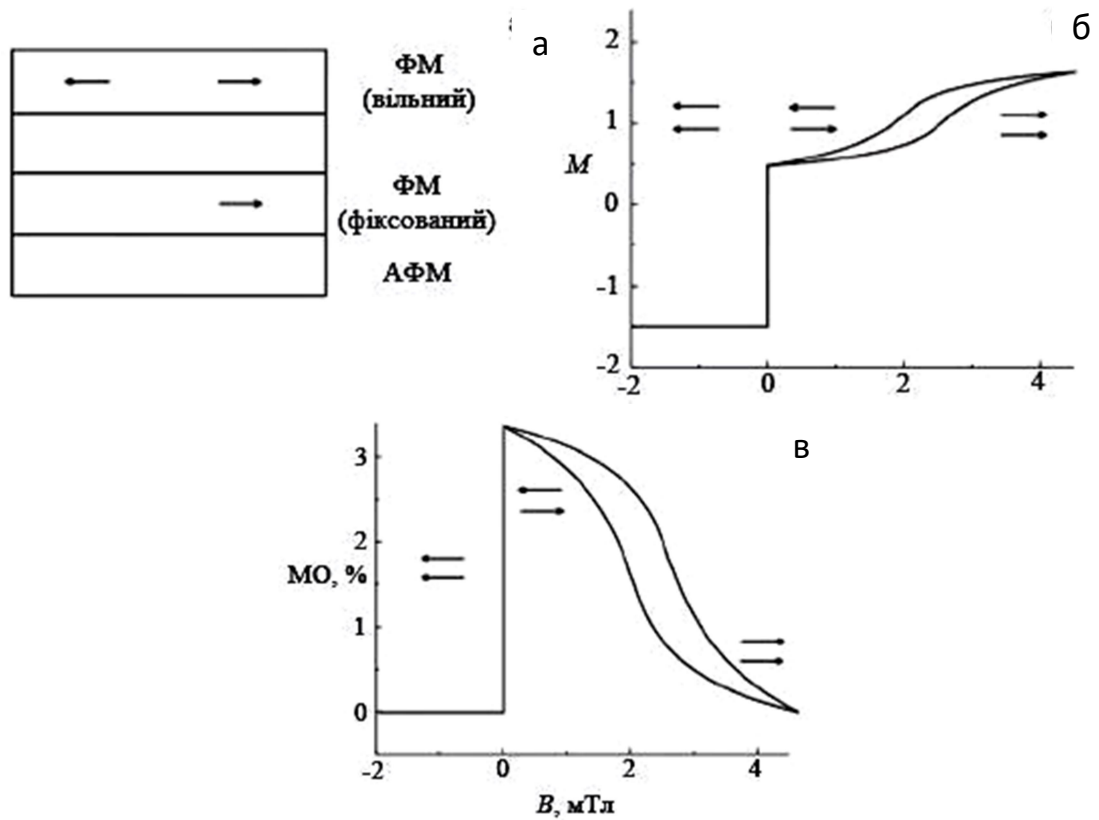


Рисунок 1.1 – Схематична будова спін-вентильного чутливого елементу(а), петлі гістерезису намагніченості(б) і ГМО спінвентилля (в) при кімнатній температурі. Із роботи [17]

На сьогоднішній день такі структури є одними з основних, які застосовуються в сенсорному приладобудуванні.

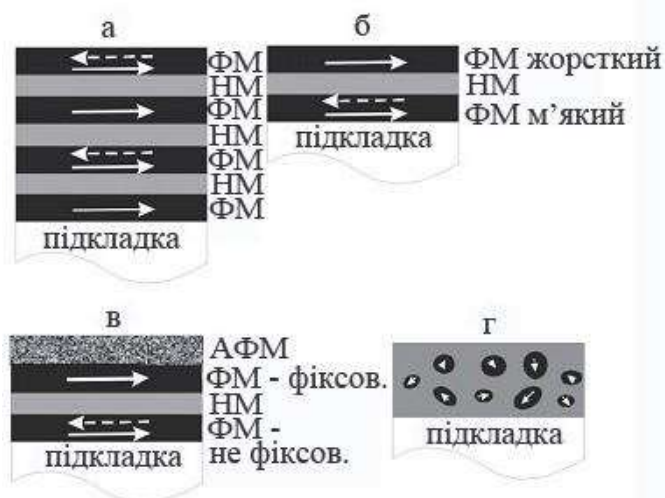


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення структур, у яких спостерігається явище ГМО: магніточутлива багатошарова структура (а), псевдо – спін-вентиль (б), спін-вентиль (в), неоднорідна (гранульована) ферромагнітна плівка (г).

Різноманітні структури, в яких спостерігається явище ГМО, наведені на рисунку 1.2 [17]. Слід відмітити, що присутність антиферомагнітного прошарку не є необхідною умовою для спостереження ГМО. Антиферомагнітного впорядкування можна досягти використанням пошарово сконденсованих феромагнітних шарів із різною коерцитивної силою. У цьому випадку магнітні моменти магнітом'якого і жорсткого шарів переорієнтуються в різному магнітному полі, тим самим, створюючи інтервал магнітних полів в якому вони мають антипаралельну орієнтацію і великий опір шарів. Ще один шлях змінити напрямок намагніченості – використання спін-вентилів. У цьому випадку напрямок намагніченості одного шару фіксується обмінною взаємодією з відповідним антиферомагнітним шаром, у той час як намагніченість інших можна легко змінити прикладенням зовнішнього магнітного поля. У гранульованих системах, в яких також спостерігається ефект ГМО, феромагнітні гранули знаходяться в матриці немагнітного матеріалу. Випадково орієнтовані магнітні моменти феромагнітних гранул можуть бути впорядковані магнітним полем, що також призводить до зменшення опору.

Порівнюючи різноманітні сенсори, можна прийти до висновку, що найбільш ефективними є багатофункціональні сенсори, які призначені для одночасного вимірювання декількох величин. Стабільність роботи є однією з найважливіших характеристик будь-якого датчика, тому значна кількість робіт присвячена саме зменшенню впливу зовнішніх негативних факторів на його роботу [26].

Уперше концепцію формування спін-вентильної системи з ефектом ГМО на основі Co/Cu/Co було запропоновано автором [31], а подальша теоретична та практична розробка даної концепції була проведена в роботі [33].

В наш час створено багато мікроелектронних магнітних датчиків різного призначення, в тому числі, датчиків переміщення, наближення, кута повороту і кута нахилу, датчиків положення ротора вентильних

електродвигунів і датчиків швидкості обертання. Актуальним залишається вивчення магнітних властивостей плівкових систем із метою створення датчиків, з наперед заданими властивостями. До найбільш поширених типів перетворювачів магнітного поля можна віднести: елементи Холла, магніторезистори, магнітодіоди, магніточутливі і магнітокеровані інтегральні мікросхеми.

1.3 Датчики на основі анізотропного магніторезистивного ефекту

Відомо, що дифузійні процеси, інтерфейсне розсіювання та фазоутворення впливають на характеристики чутливих елементів плівкових сенсорів. Методи отримання та наступна термообробка зразків обумовлюють їх певний фазовий стан (збереження індивідуальності шарів, утворення т.р. чи гранульованих станів), що в свою чергу впливає на магніторезистивні властивості структур із можливим спін-залежним розсіювання електронів. За умови, що опір феромагнітного матеріалу залежить від густини електричного струму та взаємної орієнтації векторів намагніченості в зразках спостерігається анізотропний магнітоопір (АМО) [34]. У магнітовпорядкованих середовищах присутній додатковий внесок в магніторезистивний ефект, який обумовлений анізотропією опору через присутність в системі спонтанної намагніченості. Однак при температурах вище Кюрі він зникає.

Механізми виникнення магнітної анізотропії в одношарових феромагнітних плівках можуть бути конденсаційного або термостимульованого походження. Дані механізми характеризуються амплітудою та кутовою дисперсією. У полікристалічних плівках проявляється локальна анізотропія, яка визначаються одноосною, локальною кристалографічною та анізотропією мікронапружень. На відміну від одношарових плівок у багатошарових плівкових системах має місце анізотропія магнітних властивостей проміжних шарів, плівкових або

гранульованих сплавів та твердих розчинів. Широко досліджується анізотропія магнітоопору зразків, яка спостерігається при переході від однієї геометрії вимірювання до іншої.

Окрім тонкоплівкових систем, все більшу увагу дослідників привертають наночастинки феромагнітного матеріалу розташовані в матриці немагнітного. Підвищений інтерес до наночастинок пов'язаний з їх унікальними властивостями, які досить сильно відрізняються від властивостей масивних матеріалів, що зумовлено розмірними ефектами.

Інтенсивне дослідження наночастинок феромагнітних металів пов'язане з відкриттям у них незвичайних магнітних властивостей. Особливість застосування наночастинок пов'язана з їх однодоменністю. Згідно теорії однодоменності, значне збільшення коерцитивної сили феромагнітного металу відбувається при переході від багатодоменної до однодоменної структури.

У зв'язку з особливостями магнітних, структурних та магніторезистивних властивостей наночастинок, вони мають досить широкий діапазон використання: створення чутливих елементів датчиків магнітного поля, жорстких дисків з надвисокою щільністю запису інформації, магнітних нанопристроїв та ін.

На сьогодні все більше застосування знаходять анізотропні магніторезистивні датчики, які призначені для вирішення різноманітних задач. АМР-датчики характеризуються великими значеннями чутливості плівкової системи, забезпечують високий рівень первинного сигналу, широкий робочий та температурний діапазон, надійність і точність роботи.

У принцип дії АМР-датчика покладено застосування анізотропного магнітного ефекту, а саме властивості магніторезистивного матеріалу, наприклад тонкої плівки з феромагнітного матеріалу, можливості змінювати опір у залежності від взаємної орієнтації струму та вектора намагніченості магнітних доменів плівки. Зовнішнє магнітне поле B повертає вектор

намагніченості плівки M на деякий кут α , значення якого залежить від напрямку та величини магнітного поля.

У роботі [35] наведено спрощену схему конструкції АМР-датчика (рис. 1.3). На напівпровідникову підкладку за методикою тонкоплівкового осадження наноситься шар чутливого матеріалу у вигляді стрічки, так, щоб її геометричні розміри задовольняли вимогам $d < b \ll l$, де d – товщина, b – ширина та l – довжина стрічки. При дотриманні цієї умови вектор намагніченості M буде мати напрям вздовж плівки, який співпадає з напрямком струму при дії зовнішнього магнітного поля.

Певну конкуренцію АМР-датчикам в задачах вимірювання швидкості, положення та струму створюють датчики Хола. При порівнянні цих типів датчиків, виявляється, що датчики магніторезистивного типу мають ряд переваг: а) основний внесок вносить напрямок зовнішнього магнітного поля,

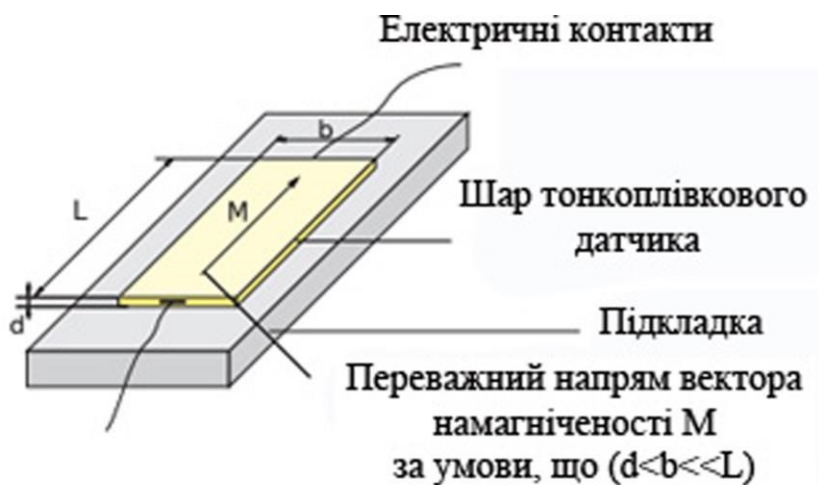


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення тонкоплівкового АМР-датчика. Із роботи [35]

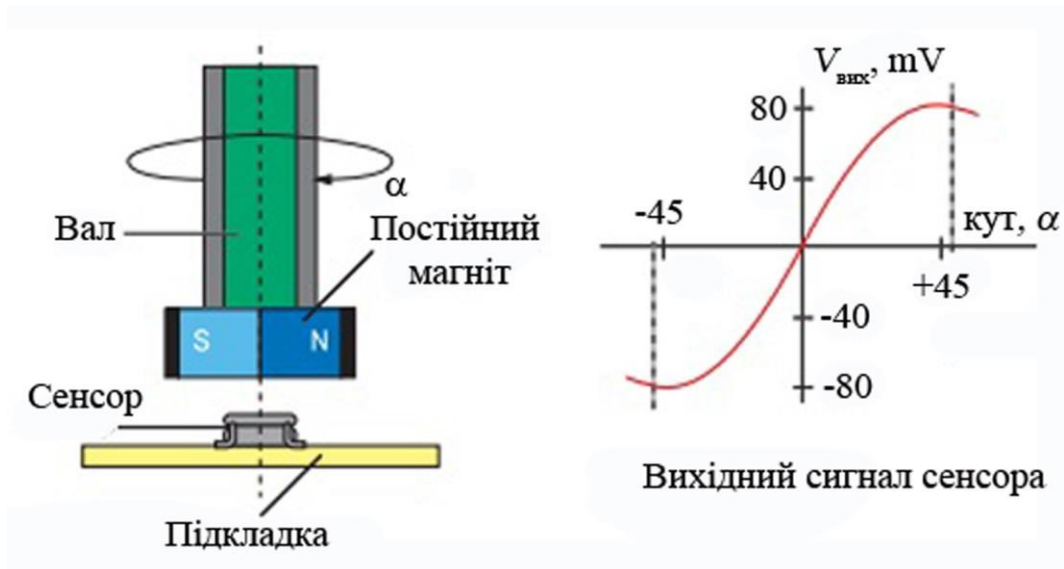


Рисунок 1.4 – Принцип роботи датчика кута повороту. Із роботи [35] замість його величини, як в ефекті Холла – широкий вибір магнітів для вимірювання, незалежно від їх залишкової намагніченості; б) робота в зоні насичення та напруженості поля датчика свідчить про незалежність від магнітного дрейфу в часі та під дією температури від механічних припущень (відстані між магнітом та датчиком).

Вказані переваги АМР-датчиків особливо важливі в автомобільному будівництві та умовах жорсткої експлуатації, для якої характерні перепади температур та високі механічні вібрації. Висока чутливість також дозволяє використовувати АМР-датчики для детектування слабких полів в навігаційних схемах, в яких ефект Хола не застосовується та в якості датчиків кутів повороту. На рисунку 1.4 наведено принцип вимірювання кутів. Основні сфери застосування сенсорів повороту – автоелектроніка та робототехніка. Також широко використовуються датчики детектування слабких полів на основі АМО. Основна сфера їх застосування – вимірювання магнітного поля Землі. Для побудови двоосного компаса необхідно використовувати два сенсорних АМР елемента, які розміщено під кутом 90° один до одного.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика формування багатокомпонентних плівок

Для створення плівкових матеріалів різного ступеня ентропійності на основі металів (Fe, Ni, Co, Cu, Al, Mo і Cr) використовували вакуумну установку типу ВУП-5М ($p \sim 10^{-3}-10^{-4}$ Па), схема робочої камери якої зображена на рис.2.1. Пошарова або одночасна конденсація плівок відбувалась з використанням випарників двох типів: молібденових човників та електронно-променевих гармат.

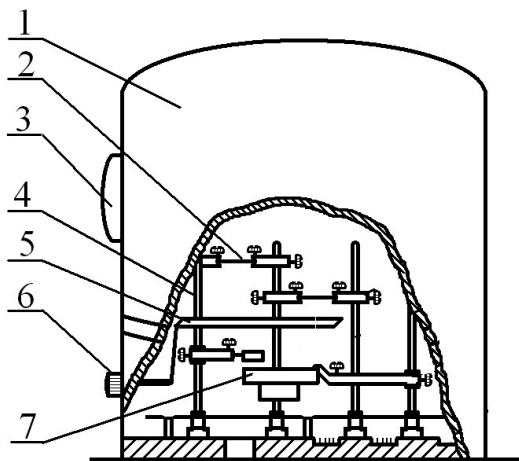


Рисунок 2.1 – Схема робочої камери ВУП-5М (а): 1 – корпус робочої камери; 2 – випарувачі; 3 – спостережувальне віконце; 4 – стійка; 5 – захисна маска; 6 – обертова ручка маски; 7 – столик для відпалювання зразків

Плівкові матеріали створювалися шляхом варіювання швидкості конденсації (ω), температури підкладки ($T_n = 300 - 500$ К) і температури відпалювання ($T_g = 300 - 900$ К). Випарування робилося електронно-променевим (Co, Mo) та терморезистивним (Fe, Ni, Cr, Al, Cu) методами, товщина окремих шарів (d) змінювалась від 10 до 30 нм.

Час відпалювання при максимальній температурі складав 15 хвилин, а швидкість охолодження 3 К/хв. У робочій вакуумній камері знаходились пристрої для формування плівкових матеріалів та вивчення їх властивостей. З використанням цифрових мультиметрів UT70D та UT70B контролювалися електричний опір плівок і температура підкладки.

Товщина плівок спостерігалася *in situ* методом кварцового резонатора (точність 10 %), для чого використовували промисловий резонатор типу РГ-08 з частотою 10 МГц та частотомір ЧЗ-54.

Одновременна конденсація металів відбувалась при окремому розташуванні випарників, підкладок та датчиків товщини (рис. 2.2, а). На позиції рис. 2.2, б представлена схема розміщення випарників.

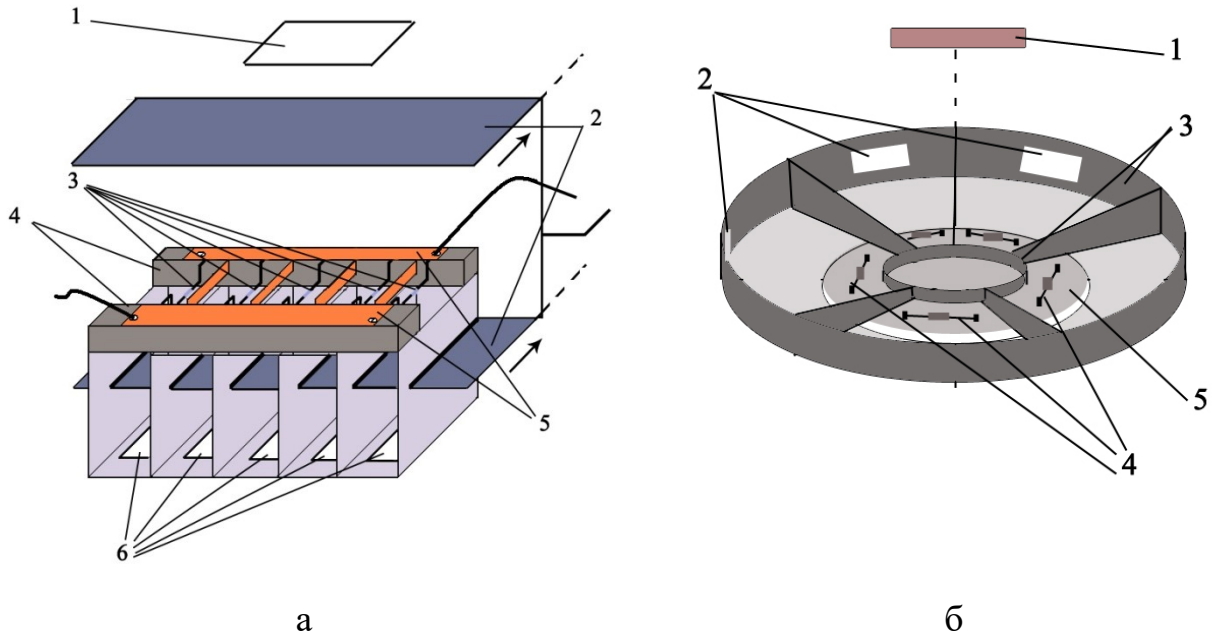


Рисунок 2.2 – Конструкція систем випарників для одночасної конденсації (а): 1 – підкладка; 2 – суміщені рухливі екрани; 3 – вольфрамові випарники; 4 – керамічні ізолятори; 5 – металеві контакти для підведення напруги до випарників; 6 – свідки для визначення товщини окремих компонентів ВЕС інтерферометричним методом; конструкція випарників для одночасної і пошарової конденсації (б): 1 – підкладка; 2 – свідки для вимірювання товщини; 3 – система суміщених екранів; 4 – вольфрамові випарники; вольфрамові випарники; 5 – керамічний ізолятор

У магістерській роботі вказані експериментальні результати дослідження властивостей мультишарів, які були отримані зі швидкістю осадження $\omega \cong 0,1-3$ нм/с. При даному режимі конденсації та зазначеної температурної обробки можемо створити плівкові системи з різними структуровими особливостями. Двокомпонентні гранульовані сплави можемо отримати двома методами.

Традиційним є метод одночасної конденсації з двох джерел ($Me_1 + Me_2/P$), який у роботі застосували для одержання гранульованих сплавів на основі Fe і Ag. У іншому способі отримати гранульований стан плівкового зразку можна за допомогою методики пошарової конденсації ($Me_2/Me_1/P$) з подальшим термовідпалом, яку використовували для систем на основі Co і Ag. Процес вакуумного відпалювання плівкових систем до різних температур відпалювання (400–950 K) відбувався з постійною швидкістю нагрівання–охолодження 2 K/хв. та ізотермічним відпалюванням при даній температурі протягом 15 хвилин. Особливо підкреслимо, що при таких методах формування вказаних типів плівкових систем, у них можлива реалізація магнітоопору (МО), анізотропного магнітоопору (АМО) та ефекту гігантського магнітоопору (АМО). Для того щоб уникнути впливу структури підкладки на структуру досліджуваних плівок та, як наслідок цього, наприклад, на її магнітну анізотропію, як підкладки використовували пластини кремнію з природним шаром оксиду.

Вимірювання МО проводились у двох геометріях (рис.2.4): паралельній геометрії (CIP – current-in-plane – конфігурації), коли напрям протікання струму паралельний до площини інтерфейсу та перпендикулярній геометрії (CPP – currentperpendicular-to-plane – конфігурації). В останньому випадку напрям протікання струму ортогональний (перпендикулярний) до площини плівки.

На вибір геометрії вимірювання вплинули, головним чином, розміри зразка. Через малу довжину, а, значить, і невеликий опір, довелося відмовитися від CPP-конфігурації, тому вимірювання проводилися лише в паралельній геометрії.

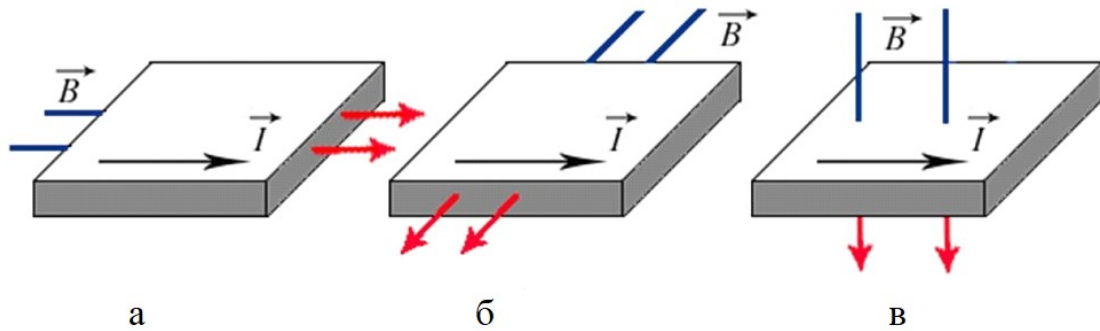


Рисунок 2.3 – Схеми поздовжньої (а), поперечної (б) та перпендикулярної (в) геометрій вимірювання магнітоопору

Вимірювання магніторезистивних властивостей відбувалося при кімнатній температурі в трьох геометріях: поздовжній – магнітне поле паралельне струму і зразку ($B \parallel I, \Pi$), поперечній – поле перпендикулярно струму та паралельно зразку ($I \perp B \parallel \Pi$) та перпендикулярній – лінії магнітної індукції перпендикулярні до струму та зразку ($B \perp I, \Pi$), де B – індукція магнітного поля, I – електричний струм і Π – підкладка, з використанням автоматизованого комплексу.

2.2. Анізотропія магнітних властивостей

Як зазначали у різних джерелах літератури, спостерігається анізотропія магнітних характеристик у полікристалічних феромагнітних плівках Co і Fe. Підтвердженням цьому є дослідження на прикладі плівок Co. Анізотропія структурно-чутлива і дуже змінюється як від товщини зразка, так і температури термічної обробки. На початковій стадії, при відносно низьких температурах, в плівках Co відбувається процес заліковування дефектів. Результатом цього є покращення доменної структури плівки, що виражається у збільшенні магнітної анізотропії зразка. Проте середній розмір кристалітів не змінюється суттєво. Значну зміну у структурі можемо спостерігати при температурах в інтервалах 600–700 K, у той час, коли відбувається процес поліморфного переходу $\text{Co} \rightarrow \text{OЦК-Co}$, при збільшенні середнього розміру кристалітів і коерцитивності

та втратою вираженої магнітної анізотропії, що було показано.

В одношарових феромагнітних плівках проявляє себе механізм виникнення магнітної анізотропії конденсаційного і термостимульованого походження. Наведені механізми анізотропії характерні амплітудою та кутовою дисперсією. Локальна анізотропія в полікристалічних плівках визначається локальною кристалографічною та анізотропією мікронапружень. На відміну від одношарових плівок перевагою багатшарових плівкових систем є спостереження анізотропії магнітних властивостей проміжних шарів твердих розчинів, плівкових сплавів або гранульованих сплавів. При дослідженні магніторезистивних властивостей також можемо побачити певну анізотропію магнітоопору зразків. Під час переходу від однієї геометрії вимірювання до іншої відбувається анізотропія величини магнітоопору. Прикладом є наведена залежність магнітоопору тришарової системи $\text{Ag}(5)/\text{Fe}(10)/\text{Ag}(5)/\text{П}$ при різних кутах вимірювання. Слід зазначити, що тут і далі під кутом повороту маємо на увазі поворот, при якому відбувається перехід від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання МО. У цьому випадку, зміна величини магнітоопору пов'язана зі зміною середньої довжини вільного пробігу λ_0 електронів провідності під дією сили Лоренца при наявності кристалографічної анізотропії тонких феромагнітних шарів.

Анізотропний магнітоопір (АМО) спостерігається, коли опір феромагнітного матеріалу залежить від взаємної орієнтації векторів намагніченості та густини електричного струму.

На рисунку 2.4 наведені приклади анізотропного магнітоопору для плівкових систем $[\text{Pd}(1,1)/\text{Fe}(0,9)]_{10}/\text{П}$

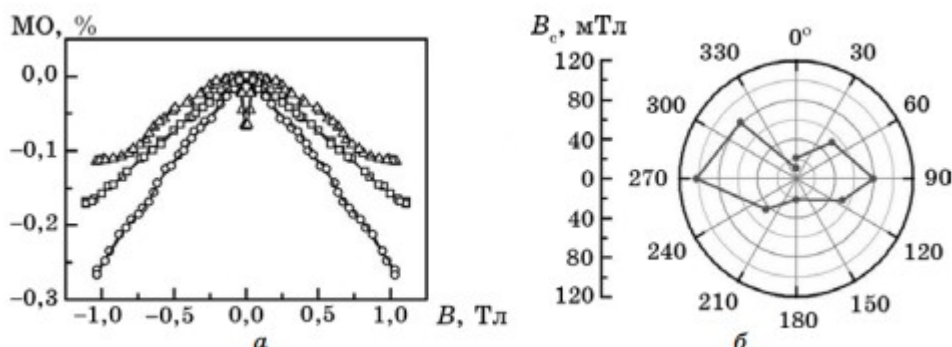


Рисунок 2.4 - Анізотропний магнітоопір плівкової системи [Pd(1,1)/Fe(0,9)]10/П (а) при $T = 300$ К (геометрії вимірювання: поздовжня (\odot), поперечна ($*$) і перпендикулярна (ρ)) та залежність коерцитивної сили від кута вимірювання для системи [Pd(0,9)/Fe(0,6)]10/П відпаленої до $T_B = 780$ К (б)

У залежностях розрізняють дві ділянки: зростання МО при магнітних полях до 0,2 Тл і зменшення МО, що спостерігається при збільшенні індукції. Наявність цих двох ділянок є результатом прояву ефекту анізотропного магнітоопору.

РОЗДІЛ 3 МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Магніторезистивні властивості багатокомпонентних плівкових матеріалів

У деяких плівкових системах можлива реалізація умов формування гранульованого стану магнітних компонентів. Найбільшу схильність до цього, як показують дослідження (наприклад, виявили системи на основі Co та Cu і у меншій мірі — на основі Co і Au або Ag). На стадії утворення гранульованого стану можемо також спостерігати за зміною форм петель гістерезису МОКЕ та магнітоопору, який проілюстровано на рис. 3.1. Гранульовані стопи, на відміну від інших структур, не мають у своєму складі структурносуцільних шаруватих утворень магнітного компонента з доменною структурою. Магнітні гранули в цих сплавах, а саме при великій різниці у розмірі, мають широкий діапазон магнітного поля перемагнітування. Тому площа під кривою МО набагато більша, ніж в інших випадках, а для МОКЕ характерні великі значення коерцитивності.

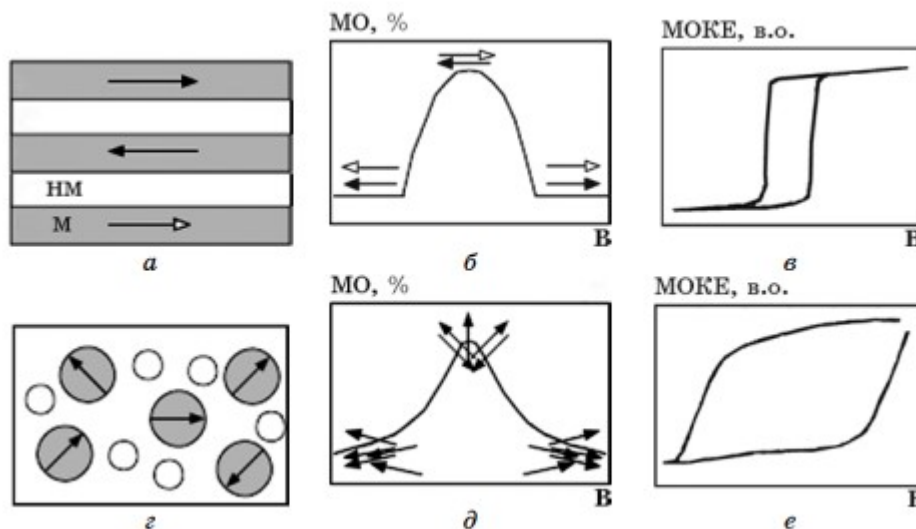


Рисунок 3.1 - Схематичні представлення багатошарової плівкової системи у вигляді мультишарів (а) або гранульованих твердих розчинів (г) та відповідні їм типові залежності МО (б, д) і МОКЕ (в, е) від індукції магнітного поля. М — немагнітний, М — магнітний шар, стрілками вказані напрямки векторів намагніченості.

Дослідження на прикладі середньо- та високоентропійних плівкових сплавів [36-43] вказують на спільні особливості і закономірності умов реалізації ізотропного (ГМО) магнітоопору, АМО, розмірних, температурних та концентраційних ефектів. Було встановлено, що при певних умовах (деяка оптимальна концентрація магнітної компоненти, термообробка зразків до 700-800 К) у плівках ВЕС залежності питомого опору від індукції магнітного поля мають усі ознаки ГМО із амплітудою (0,1-0,3)%. ГМО переходить в АМО при термовідпалюванні до $T > 700\text{K}$ або при перевищенні концентрації магнітних компонент. Амплітуда АМО має приблизно таку ж величину, як і у випадку ГМО (рис. 3.1) [44].

Відмітимо, що велике значення B_c у невідпалених ВЕС (рис.3.1, а-в) можна пояснити із точки зору великого розкиду розмірів гранул або їх аналогів - областей локально підвищеної концентрації магнітної компоненти, на яких, в силу різних причин, не реалізується СЗРЕ. У той же час якщо сформувати більш-менш ефективну систему гранул після термообробки, то спостерігається стабільний ефект ГМО (рис.3.2) [45]. Типові залежності величини магнітоопору від індукції B представлені на рис. 3.2.

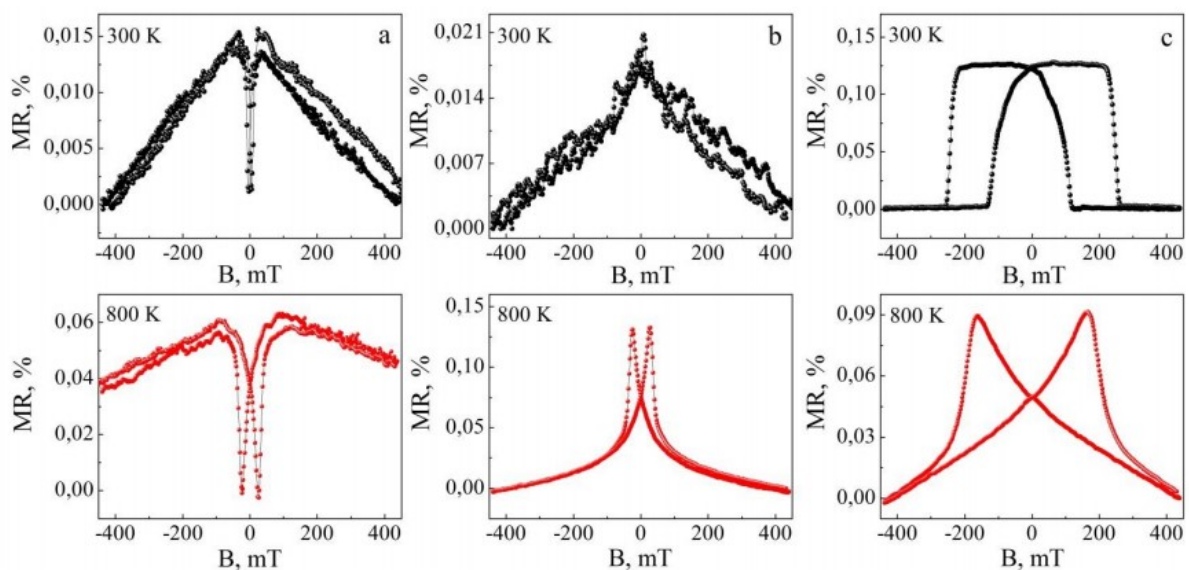


Рисунок 3.2 - Залежність магнітоопору від індукції магнітного поля для плівкового зразка Al(4)/Cu(3,2)/Co(4,5)/Cr(5,2)/ Fe(4,7)/Ni(4)/П в трьох орієнтаціях індукції відносно напрямку електричного струму

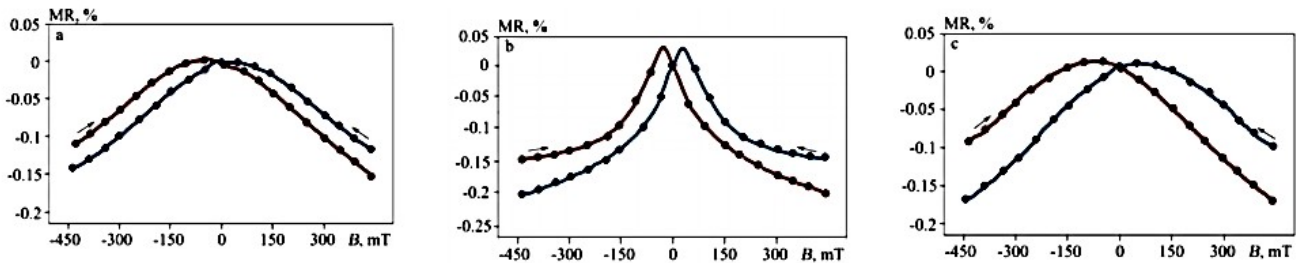


Рисунок 3.3 - Польова залежність ГМО для плівкових ВЕС Co(20)/Ni(14)/Cu(20)/Fe(30)/Al(18)/П після відпалювання до 810 К в трьох геометрія вимірювання – поздовжній (а), перпендикулярній (б) та поперечній (в) відповідно. Стрілками показаний напрям циклів «намагнічування - розмагнічування»

Амплітуда МО в межах 0,15 – 0,17% у трьох геометріях вимірювання і його польова залежність говорять про реалізацію ефекту ГМО. Така ситуація можлива лише у випадку спін-залежного розсіювання електронів, і тому ми приходимо до висновку, що таке розсіювання відбувається на квазігранулах, оскільки іншого механізму запропонувати неможливо.

У всіх випадках для низько-, середньо- та високоентропійних сплавів амплітуда МО при $T=300\text{K}$ має відносно малу величину (в основному на рівні 0,2-0,4%), що є типовою ситуацією для плівкових систем, які відносяться до класу СЕС або ВЕС. Лише в окремих випадках [44] амплітуда МО досягає величини 0,8-1,0%. Абсолютно малу величину МО має у випадку ВЕС.

3.2 Функціональні та технологічні особливості сенсорів магнітного поля

Магнітопружні датчики володіють високою чутливістю, а також простотою і надійністю конструкції. Принцип дії магнітопружних датчиків

заснований на використанні магнітопружного ефекту - фізичного явища, що полягає у зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією механічних сил.

У даний час відомі десятки конструкцій МД, які знайшли застосування для дистанційного контролю та регулювання різних виробничих процесів.

Переваги магнітопружних датчиків проявляються в найбільшій мірі при вимірюванні параметрів об'єктів, що працюють в важких умовах експлуатації (прокатні стани, шахтні підйоми, бурові установки і т. п.).

З огляду на можливість широкого застосування магнітопружних датчиків в промислових цілях, приділяється все більше уваги питанню про технологічність конструкції. Виходячи з цього, в цілому ряді випадків перевага віддається магнітопружним датчикам, в яких чутливий елемент виготовлений із суцільного матеріалу і має циліндричну форму, а котушки розміщуються поза тіла чутливого елемента.

Конструктивними елементами датчика, здійснюючими механічне перетворення, є зовнішній механічний перетворювач і чутливий елемент. За допомогою зовнішнього механічного перетворювача вимірювальний параметр може змінюватися за величиною, знаком або видом. Наприклад, в деяких датчиках, що вимірюють розтягуюче зусилля, вимірюваний параметр перетворюється на зусилля стиску чутливого елемента, а датчиках, що вимірюють стискує або розтягуюче зусилля, параметр перетворюється на зусилля скручування чутливого елемента.

Аналіз конструктивних схем відомих магнітопружних датчиків дозволяє виділити дві основні групи:

1. Магнітопружні датчики, в яких використовується зміна магнітних характеристик матеріалу чутливого елемента в якому-небудь одному або двох взаємно перпендикулярних напрямках. До них відносяться магнітопружні датчики:

- електричного опору;
- дросельного;

- мостового;
- диференційно-трансформаторного;
- шунтового типів.

Магнітопружні датчики, в яких використовується зміна ступеня магнітної анізотропії матеріалу чутливого елемента. До них відносяться :

- магнітоанізотропні;
- сельсині датчики трансформаторного типу.

Принцип дії МД дросельного типу заснований на зміні повного електричного опору котушки 1, що живиться змінним струмом і створюючий магнітний потік в чутливому елементі 3, до якого прикладено вимірюване зусилля.

У магнітопружному датчику електричного опору через електроди 1 до чутливого елемента підводиться змінний струм, а за допомогою електродів 2 вимірюється падіння напруги на ділянці чутливого елемента 3, яке при незмінному струмі пропорційно електричному опору цієї ділянки.

Принцип дії магнітопружного датчика мостового типу заснований на вимірюванні різниці повних електричних опорів котушок 1, магнітні осі яких взаємно перпендикулярні. У магнітопружного датчика шунтового типу при відсутності вимірюваного зусилля магнітний потік, створений котушкою збудження 1, замикається в основному через магнітопровід, не охоплений вимірюваною котушкою. Під дією вимірюваного зусилля магнітний опір магнітопровода 3, виготовленого із матеріалу з позитивною магнітострикцією, в осьовому напрямку зростає, і частина потоку, обумовлена величиною вимірюваного зусилля, відгалужується в шунтувальний магнітопровід, охоплений вимірювальною котушкою 2, з якої знімається вихідна напруга.

Вибір типу та конструктивної схеми МД визначається вимогами, яким він повинен відповідати.

До числа цих вимог належать:

1. Велика потужність вихідного сигналу.

2. Перетворення механічної напруги, що виникають у рухомих деталях. У цих випадках з метою підвищення надійності зазвичай застосовуються безконтактні МД, а чутливий елемент виготовляється з суцільного матеріалу.

3. Технологічність виготовлення, а також малий розкид вихідних характеристик при серійному виготовленні МД. Цим вимогам більшою мірою відповідають МД з циліндричними чутливими елементами.

4. Лінійність перетворення. Оскільки, як буде показано нижче, магнітопружне перетворення має принципово нелінійний характер, то найбільш доцільним є застосування тієї схеми МД, яка забезпечить можливість лінеаризації вихідної характеристики. Кращі результати в цьому відношенні отримані для безконтактних МД трансформаторного та диференційно-трансформаторного типів.

Вимірювальні системи з магнітопружними датчиками можуть бути розділені на дві групи. До першої групи належать схеми із вторинними приладами безпосередньої оцінки, а до другої – системи з приведенням вихідного параметра до нуля (нульбалансні). Нуль-балансні системи мають велику чутливість (до 0,07% від межі вимірювання).

Існує два зусилля магнітопружних датчиків промислового призначення (стискаючі і розтягуючі). Найбільш широке поширення одержали МД стискаючих та розтягуючих зусиль з багатосекційними чутливими елементами кільцевої та призматичної форми.

При застосуванні ефекту Холла, вимогам високої експлуатаційної надійності відповідають трансформаторні і магнітоанізотропні магнітопружні перетворювачі (МПП). Вони знайшли застосування в судових автоматичних системах управління для контролю і виміру: крутного моменту, механічної напруги, вантажних і тягових зусиль.

У МПП використовують магнітопружний ефект, який проявляється в тій чи іншій мірі у всіх феромагнітних матеріалів і полягає в зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією пружних механічних напруг. Спільне використання трансформаторного МПП і магнітоанізотропного

перетворювача (МАП) з датчиком Хола дозволило розробити багатофункціональні датчики механічних величин.

Удосконалення магнітопружного перетворювача в теперішній час йде в основному шляхом пошуку матеріалів, що поєднують високу тензочутливість, стабільність коефіцієнта перетворення і високу механічну міцність. Принципи дії пристроїв і основні характеристики МПП, отримані на основі досліджень електромагнітних процесів.

Ефект Хола – непарний гальваномагнітний ефект (пропорційний першого ступеня напруженості магнітного поля). Датчики Холла застосовуються для вимірювання лінійних та кутових переміщень будь-яких об'єктів, що знаходяться в магнітних полях.

Застосування датчиків Холла в значній мірі зменшує вплив потоків розсіювання, створюваних обмоткою збудження, на вихідний сигнал трансформаторного магнітопружного перетворювача.

Магнітоанізотропні перетворювачі відрізняються високою стабільністю і невеликою похибкою.

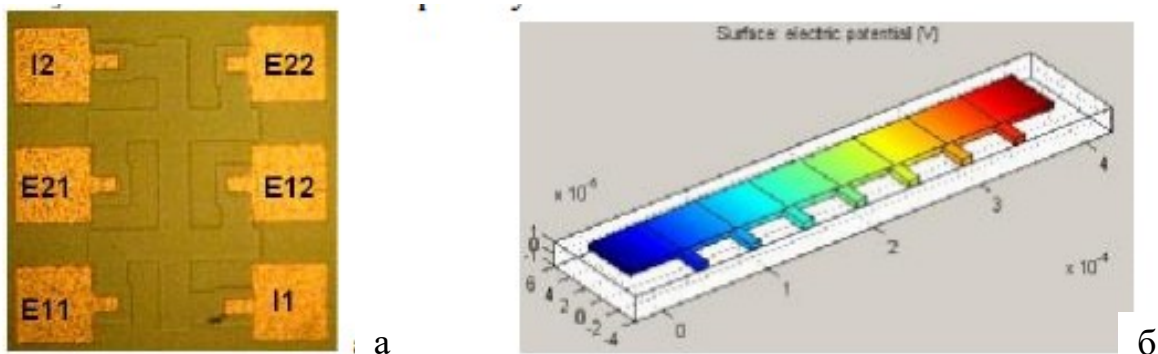


Рисунок 3.4 – Структура (а) та модель (б) сенсора магнітного поля [38]

Для матеріалів з позитивною магнітострикцією магнітна проникність вздовж осі x зменшується, в той час як уздовж осі y вона залишається

незмінною. Таким чином, під дією механічного зусилля матеріал МПП стає анізотропним.

Виникнення анізотропії матеріалу магнітопроводу призводить до спотворення магнітних силових ліній, які з кіл перетворюються в еліпси.

Гальваномагнітні сенсори є одним з найбільш поширених засобів вимірювання магнітного поля. Їх характеризує здатність вимірювання в широкому діапазоні магнітного поля (від одиниць мікроТесла і до десятків Тесла) та температури (від одиниць градусів Кельвіна і до 400 К), мініатюрні розміри (декілька міліметрів), висока технологічність та мінімальна собівартість у масовому виробництві. В даній роботі представлені основні підходи в структурній побудові моделювання та застосування гальваномагнітних сенсорів в біомедичній апаратурі.

В процесі проектування сенсорних пристроїв магнітного поля для біомедичної апаратури необхідно вирішити такі проблеми, як біологічна сумісність, мініатюрність, можливість живлення від мініатюрних автономних джерел живлення. З цією метою створюються спеціальні захисні оболонки магнітометричних зондів, оптимізуються структурні та схемні рішення сенсорних пристроїв. Зокрема, значна увага приділяється оптимізації структури сенсора з точки зору вимог до його функціональності та функції перетворення. Оптимізація конструктивних рішень проводиться шляхом комплексного застосування пакетів FEMLAB та MATLAB. В першому з них проводиться структурне, а в другому – параметричне моделювання. Приклад результату моделювання структури сканера магнітного поля на основі розщепленої холлівської структури наведено на рис. 3.1. Основними галузями застосування розроблених сенсорів є: магніторезонансна томографія, магнітотерапія та елементи керування інтелектуальними засобами протезування.

ВИСНОВКИ

1. На основі літературних даних показано, що розвиток сенсорної електроніки стимулює пошук нових плівкових систем із заданими параметрами стійкості (температура, деформація, вплив електричного і магнітного полів).

2. У порівнянні з мультишарами або гранульованими сплавами, плівкові матеріали із СЗРЕ у вигляді багат шарових плівок та спін-класанних структур значно простіші з точки зору виготовлення і перспективи застосування при виготовленні різноманітних приладових структур.

3. При конструюванні датчиків магнітного поля необхідно мати на увазі проблему стабільності інтерфейсів, які під дією температури та інших факторів можуть деградувати (наприклад, дифузійні процеси можуть викликати розмиття інтерфейсу або утворення інтерметалевих фаз по всьому об'єму плівки) і в результаті буде мати місце зміна електрофізичних властивостей.

4. У плівкових ВЕС спостерігається ізотропний магнітоопір (ГМО) із амплітудою до 0,015%, що пояснюється СЗРЕ на квазігранулах або частинках Ni_3Al .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
2. Хоружний В.А., Письмецький В.О. Функціональна мікроелектроніка, опто- та акустоелектроніка. – Харків, 1995. – 186 с.
3. С. І. Проценко, І. В. Чешко, Д. В. Великодний, О. П. Синашенко, Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко, Успехи физ. мет., 8, № 4: 247 (2007).
4. P.R.N. Childs, J.R. Greenwood, C.A. Long. Review of temperature measurement // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – Vol. 71. – P. 2959–2978.
5. C.J Yeager, S.S Courts. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors // IEEE Sens. J. – 2001. – Vol. 1. – 352–360.
6. Djamal Mitra Development of sensors based on giant magnetoresistance material / Mitra Djamal, Ramli// Proc. Eng. – 2012. – Vol. 32. – P. 60 – 68.
7. Ni₈₀Fe₂₀/Au/Co/Au multilayers as magnetic field sensors / Stobiecki F., Urbaniak M., Szymanski B. [et. al.] // Materials Science-Poland – 2006. – Vol. 24, No3. – P. 833 – 838.
8. Norris A. Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors / Norris A., Saafi M., Romine P. // Construct. Build Mat. – 2008. – Vol. 22. – P. 111 – 120.
9. Шматько. А.А. Электронные приборы сверхвысоких частот / А.А. Шматько // Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2006. – 328 с.
10. Проценко І.Ю. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів / І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова // Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 198 с.

11. Nepijko S.A. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems / S.A. Nepijko, D. Kutnyakhov, L.V. Odnodvoretz [et al.] // J. Nanopart. Res. – 2011. – Vol. 12, No3. – P. 6263 – 6281.
12. Zhang H. Microfabrication and test of a magnetic field sensor using electrodeposited thin film of giant magnetoresistive $(\text{Cu/Co})_x$ multilayers / Zhang H., Wang W. // Microsystem Technologies – 2003. – Vol. 9, No6-7. – P.436 – 440.
13. Giant Magnetoresistance of $(001)\text{Fe}/(001)\text{Cr}$ Magnetic Superlattices / M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1988. – Vol. 61. – P.2472 – 2501.
14. Oscillatory interlayer coupling and giant magnetoresistance in Co/Cu multilayers // D.H. Mosca, F. Petroff, A. Fert [et al.] // J. Mag. Magn. Mater. – 1991. – Vol. 94. – L1 – L5.
15. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / A. Barheleny, V. Gros, J.L. Duvail [et al.] // Nanostruct. Mat. – 1995. – Vol. 6. – P.217 – 226.
16. Parkin S.S.P. Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures / S.S.P. Parkin, // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1995. – Vol. 25. – P.357 – 388.
17. Hirota E. Giant Magneto-Resistance Devices / E. Hirota, H. Sakakima, K. Inomata // N.Y.: Springer. – 2002. – Vol. 40. – P. 240.
18. Du J.H. Microstructural characterisation of CoAg granular films/ J.H. Du, W.J. Liu, Q. Li [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 1999. – Vol. 191. – P.17 – 24.
19. Бараш Л. Спинэлектроника – электроника следующего поколения / Бараш Л. // Компьютерное обозрение. – 2002. – №39. – С.61 – 63.
20. Третьяк О.В. Фізичні основи спінової електроніки / Третьяк О.В., Львов В.А., Барабанов О.В. // – Київ: КНУ, 2002. – 314 с.
21. Tanaka M. Spintronics: recent progress and tomorrow's challenges / Tanaka M. // J. Crystal Growth. – 2005. – Vol. 278. – P. 25 – 37.
22. Лукашевич М.Г. Введение в магнитоэлектронику: курс лекций для студентов физического факультета/ М.Г.Лукашевич // Мн.: БГУ, 2003. – С.73.
23. Magnetoresistance and spin electronics / A. Barthelemy, A. Fert, J.-P. Contour [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2002. – Vol. 242 – 245. – P. 68 – 76.

24. Морозов А.И. Магнитная фазовая диаграмма спин-вентильной структуры ферромагнетик-антиферромагнетик-ферромагнетик с шероховатыми границами раздела / А.И. Морозов, И. А. Морозов // ФТТ. – 2008. – Т.50, Вып. 10. – С. 1846 – 1852.

25. Candid Reig Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing / Candid Reig, María-Dolores Cubells-Beltran, Diego Ramírez Muñoz // Sensors. – 2009. – Vol. 9 (10). – P. 7919–7942.

26. Magnetostrictive GMR sensor of flexible polyimide substrates / T. Uhrmann, L. Bar, T. Dimopoulos [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – Vol. 307. – P.209 – 211.

27. Bannddyopadhyay S. Proposal for a spintronic femto-Tesla magnetic field sensor / S. Bannddyopadhyay, M. Chahay // Physica E. – 2006. – Vol. 27. – P.98 – 103.

28. Robbes D. Highly sensitive magnetometers – a review / D. Robbes D. // Sensor. Actuat. A. – 2006. – Vol. 129. – P.89 – 93.

29. Чешко І.М. Фізичні процеси в функціональних елементах на основі плівкових систем Co/Cu (Ag, Au) із спин-залежним розсіюванням електронів: Автореф. дис. к.ф.-м. наук: 01.04.01 /Сумський державний університет. – Суми, 2009. – 22 с.

30. Vector magnetisation measurements on thermally evaporated CoCr multilayers and solid solutions for spintronic applications / A. Chiolerio, P. Martino, M. Coisson [et. al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2009. – Vol. 321. – P.3099 – 3103.

31. Васильев В.А. Методы уменьшения температурных погрешностей датчиков давления / В.А. Васильев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – №4 – 5. – С.50 – 54.

32. Мокров Е.А. Применение элементов систематологии для минимизации влияния дестабилизирующих факторов на тонкопленочные тензорезистивные датчики давления / Е.А. Мокров, В.А. Васильев, Е.М. Белозубов // Датчики и системы. – 2005. – №3. – С. 10 – 12.

33. Белозубова Н.Е. Повышение устойчивости МЭМС-структур тонкопленочных датчиков давления к высоким температурам и вибрациям / Н.Е. Белозубова, Е.М. Белозубов, В.А. Васильев // 9-я Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса, 2008. – С. 155.

34. Тензорезистивні ефекти в аморфних металевих сплавах / М.П. Семенько, М.І. Захаренко., Ю.А. Куницький [та ін.] // Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. – К. – 2009. – 74 с.

35. Тензоопір аморфних феромагнетиків / М.П. Семенько, М.І. Захаренко, Ю.А. Куницький [та ін.] // Успехи физ.мет. – 2009. – Т. 10. – С. 331 – 388.

36. Bereznyak Yu., Odnodvoret L.V., Poduremne D., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M. High-entropy film alloys: electrophysical and magnetoresistive properties / Springer Proceedings in Physics. Nanooptics, nanophotonics, nanostructures, and their applications. Editors O. Fesenko, L. Yatsenko: Springer International Publishing , 2018. – P. 17 – 24.

37. Bereznyak Yu.S., Odnodvoret L.V., N.I. Shumakova, I.Yu. Protsenko, Z.M. Protsenko, C.J. Panchal, Priya. S. Suryavanshi, P.K. Mehta Thermal coefficient of Resistance of High-entropy Film Alloys // IEEE 8th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties”. – Sumy State University. – P. 01SPN87-1 - 01SPN87-4.

38. Bereznyak Yu., Opielak M., Poduremne D., Protsenko I., Shabelnyk Yu. Crystalline structure and physical properties of multicomponent (high-entropy) film alloys - XII-th International Conference on Ion Implantation and Other Applications of ions and Electrons, Poland, Kazimierz Dolny, 2018. – P.111.

39. Shumakova N.I., Stepanenko A.O., Rylova A.K., Tkach O.P. Magnetoresistive properties of double-component film materials based on Fe or Co and Ag / Modern problems of Condensed Matter V-th international Conference. – Kyiv National University. – 2018. – P. 67 – 68.

40. Bereznyak Yu. S., Poduremne D.V., Shabelnyk Yu.M., Protsenko I.Yu. High-entropy alloys: thermal coefficient of resistance and magnetoresistance /

Modern problems of Condensed Matter V-th international conference, Kyiv National University. – 2018. – P.43.

41. Vorobiov S.I., Protsenko S.I., Panchal C.J., Odnodvoretz L.V., Poduremne D.V., Protsenko I.Yu. Magnetoresistance and magnetic properties high-entropy film alloys with FCC lattice / International Research and Practice Conference: Nanotechnology and Nanomaterials, NANO-2018. – Kyiv National University, 2018. – P. 494.

42. Bereznyak Yu.S., Odnodvoretz L.V., Poduremne D.V., Protsenko I.Yu., Rylova A.K., Shumakova N.I. The phase composition of film materials with different degrees of entropy // IEEE 9th International Conference on «Nanomaterials: Applications & Properties». – Sumy State University. – 2019. – P. 01TFC49-1 - 01TFC49-5.

43. Bereznyak Yu.S., Opielak M., Odnodvoretz L.V., Poduremne D.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M. Crystalline structure and physical properties of high-entropy film alloys // J.Nano- Electron. Phys. – 2019. – V.11, №2. – P. 02026-1–02026-6.

44. Однодворець Л.В., Проценко І.Ю. Магніторезистивні властивості плівкових матеріалів електроніки з різною архітектурою / Modern Engineering Research: Topical problems, challenges and modernity (collective monograph). – 2020. – Prague: Czech Technical University. – P. 317 – 336.