

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

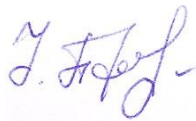
**ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ АНІЗОТРОПНОГО
МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ**

Студент гр. ЕП.мз-02с



А.О. Смірнов

Науковий керівник
канд. фіз.-мат. наук, доцент



І.М. Пазуха

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



І.Ю. Проценко

РЕФЕРАТ

Мета даної роботи полягала у вивченні принципів роботи і основних робочих параметрів електронних сенсорів на основі анізотропного магніторезистивного ефекту, а також у проведенні розрахунків чутливості до магнітного поля тонкоплівкового елемента АМР-сенсора.

Кваліфікаційна робота магістра складається з трьох розділів. У першому розділі було розглянуто причини виникнення анізотропного магніторезистивного ефекту, принцип дії та конструкції АМР сенсорів. У другому розділі було розглянуто застосування феромагнітних тонкоплівкових систем, таких як Co/Cr(Cu)/Co та Co/Gd/Co, Fe/Gd/Fe, при формуванні чутливих елементів сенсорів магнітного поля. Показано, що дані системи можуть бути використані при створенні магнітних датчиків повороту, детектування магнітних полів та індукційних пристроїв, які використовують для запису інформації.

У третьому розділі проведені розрахунки величини чутливості до магнітного поля для тришарових систем: (Co(5)/Ag(d_{Ag})/Py(30)) та (Co(30)/Ag(d_{Ag})/Py(5)), де $d_{Ag} = 3-15$ нм. Показано, що найбільша величина чутливості до магнітного поля S_B для зразків у свіжосконденсованому стані дорівнює 5,21 %/Тл, а процес термовідпалювання спричиняє її зростання.

Робота викладена на 34 сторінках, зокрема, містить 17 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел із 30 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНІЗОТРОПНИЙ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ, СЕНСОР, ТОНКОПЛІВКОВІ ФЕРОМАГНІТНІ СИСТЕМИ, ТЕРМООБРОБКА, ЧУТЛИВІСТЬ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ АНІЗОТРОПНОГО МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ.....	6
1.1. Причини виникнення анізотропного магніторезистивного ефекту....	6
1.2. Анізотропний магніторезистивний ефект як основа для створення сенсорів магнітного поля.....	10
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ФЕРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ПРИ ФОРМУВАННІ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	14
2.2. Система Co/Cr(Cu)/Co.....	14
2.1. Система Co/Gd/Co, Fe/Gd/Fe.....	20
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТІ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТОНКОПЛІВКОВОГО ЕЛЕМЕНТУ СЕНСОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	27
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

ВСТУП

Останнім часом у світовій науці інтенсивно розвивається напрямок по розробці різноманітних датчиків. Розробляються новітні конструкції датчиків, призначені для вимірювання тиску, щільності, температури і інших фізичних параметрів, необхідних для управління технологічними процесами [1-6]. Один з найбільш розвинутих напрямків це розробка датчиків, принцип дії яких пов'язаний зі змінами базового параметру при зміні магнітного поля.

Дослідження останніх років, присвячених вивченню магнітних і магніторезистивних властивостей феромагнітних плівкових систем, дозволило впровадити нові підходи при конструюванні сенсорів неелектричних величин. Зокрема, застосування нанорозмірних матеріалів як чутливих елементів сенсорів дозволило не тільки зменшити лінійні розміри приладів, а й розширити галузі їх практичного застосування завдяки прояву у даних системах квантових ефектів.

Дослідження фізичних властивостей багат шарових та багатокомпонентних тонкоплівкових феромагнітних систем пов'язано з тим, що вони застосовуються як чутливі елементи сенсорів. Комбінуючи складові компоненти таких наноструктур, можна змінювати їх електрофізичні, магнітні, магніторезистивні та інші властивості. Зокрема, для таких систем є характерним прояв анізотропного магніторезистивного ефекту, що покладений в основу роботи АМР-сенсорів. Використання тонкоплівкових систем дозволяє не тільки покращити, наприклад, чутливість сенсора, але й зробити його більш стабільним до впливу факторів зовнішнього середовища.

У зв'язку з цим метою даної роботи було вивчення принципу функціонування і основних робочих параметрів електронних сенсорів на основі анізотропного магніторезистивного ефекту, а також у проведенні розрахунків чутливості до магнітного поля тонкоплівкового елемента АМР-сенсора.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ АНІЗОТРОПНОГО МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ

1.1. Основи анізотропного магніторезистивного ефекту

У 1857 році Вілям Томсон вперше описав анізотропний магніторезистивний ефект (АМО). Томсон зауважив, що питомий опір феромагнітних матеріалів залежить від кута між напрямом електричного струму та орієнтацією намагніченості поля [7]. Для реалізації ефекту АМО необхідно до феромагнітного зразка, по якому пропускають електричний струм, прикласти зовнішнє магнітне поле. Результатом дії магнітного поля є зміна величини питомого опору при збільшенні його індукції. При цьому властивості матеріалу будуть залежати від вибраного напрямку прикладеного магнітного поля.

Причиною виникнення анізотропного магніторезистивного ефекту у феромагнітних матеріалах є особливості їх зонної структури. У феромагнетиків зонна структура представляє собою s - і d -зони, що перекриваються при енергії, яка дорівнює енергії Фермі. В результаті обмінної взаємодії у феромагнітних металах d -зона для електронів із протилежно спрямованими спінами розщеплюється, внаслідок чого щільність станів для спінів спрямованих вниз, буде відрізнятися від станів для спінів, спрямованих вгору, як це схематично показано на рисунку 1.1.

Рівень Фермі для основного напрямку спінів знаходиться всередині sp -зони та рух електронів у феромагнетикі подібний до руху в немагнітному металі. Спін-залежне розсіювання у феромагнетиках відбувається при переходах електронів провідності між нерозщепленою $4s$ і розщепленою $3d$ зоною. Для неосновного напрямку спінів електронів sp - і d -зони є гібридизованими, а рівень Фермі лежить у середині d -зони. Гібридизована spd -зона феромагнетиків характеризується високою щільністю станів, що

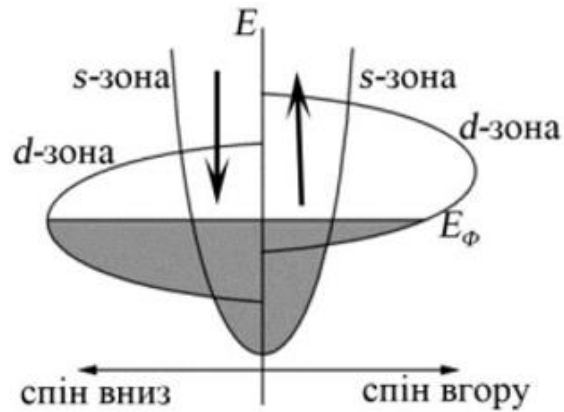


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення орієнтації спінів при різній щільності електронів. Із роботи [10]

призводить до зменшення середньої довжини вільного пробігу електронів із неосновним напрямом спіну у порівнянні з основним.

Кількісною характеристикою АМО є магніторезистивний коефіцієнт $\Delta\rho/\rho$, який можна описати наступною формулою:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{\rho_l}{\frac{1}{3}\rho_l + \frac{2}{3}\rho_l} \quad (1.1)$$

де $\bar{\rho}$ – середнє значення питомого опору зразка який був розмагнічений.

Залежність зміни опору ΔR анізотропної структури від напрямку електричного струму I і кута φ між вектором намагніченості M феромагнетика можна описати наступною формулою:

$$\Delta R = (\Delta\rho/\rho)R \cos^2 \varphi \quad (1.2)$$

де $(\Delta\rho/\rho)$ – коефіцієнт МО ефекту.

При вивченні магніторезистивних і магнітних властивостей матеріалів, що мають нанокристалічну структуру, суттєве значення починає відігравати енергія магнітної анізотропії. Виникнення енергії магнітної анізотропії

пов'язано з тим, що у різних напрямках магнітні властивості матеріалу будуть різні.

Значення загальної енергії анізотропії матеріалу буде залежати від:

- енергії магнітокрісталічної анізотропії (анізотропії кристалічної ґратки);
- морфологічної анізотропії (анізотропії геометричної форми);
- анізотропії механічного напруги;
- наведеної анізотропії (за умови прикладання зовнішнього магнітного поля);
- обмінної анізотропії.

У випадку нанорозмірних матеріалів найбільший внесок у величину загальної енергії анізотропії дають енергія магнітокрісталічної анізотропії і енергія морфологічної анізотропії [9].

Крім того при формуванні чутливих елементів сенсорів на основі феромагнітних матеріал з АМО, також необхідно враховувати такі процеси як фазоутворення та ефективність розсіювання електронів в об'ємі тонкоплівкових зразків. Це важливо з тієї точки зору, що дані процеси можуть впливати на фізичні властивості чутливих елементів та, як наслідок, на робочі параметри сенсора. Також при застосуванні багат шарових систем важливим є методика їх формування та режими термообробки, оскільки ці фактори також можуть впливати на структурну цілісність системи і якість інтерфейсів між окремими шарами, змінюючи амплітуду анізотропного магніторезистивного ефекту.

Важливе значення також має магнітний стан системи. Відомо, що для феромагнітних матеріалів характерним є наявність доменної структури. Найбільша зміна магнітних властивостей матеріалів пов'язана саме зі зміною їх доменної структури. Магнітний домен – це область речовини, в межах якої всі некомпенсовані електронні спіни атомів орієнтовані в одному напрямку. Домени розділені в просторі доменними стінками, що мають характеристичну товщину і енергію, пов'язану з їх формуванням. Їх виникнення є результатом конкуренції внесків мінної енергії та енергії магнітної анізотропії.

Описуючи зміну питомого опору у феромагнітному тонкоплівковому зразку необхідно враховувати двовимірність даної системи. Аналізуючи

систему координат, в якій розміщений магніторезистивний зразок, як це показано на рисунку 1.2, зміну питомого опору для поздовжньої та поперечної геометрій можна записати у спрощеному вигляді наступним чином:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{\parallel} & 0 \\ 0 & \rho_{\perp} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

де ρ – питомий опір;

ρ_{\parallel} – питомий опір паралельний до зразка;

ρ_{\perp} – питомий опір перпендикулярний до зразка.

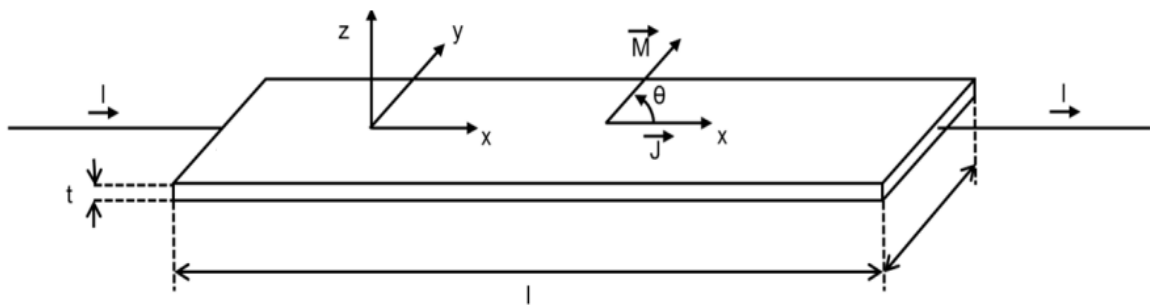


Рисунок 1.2 – Схема елемента тонкої плівки. Із роботи [11]

Як результат, зміна питомого опору плівкового зразка залежить тільки від внутрішньої намагніченості та його кута між напрямком електричного струму. Зміну у провіднику опору можна подати у вигляді наступної формули, де $\rho = \rho_{\parallel}$ при $\theta = 0^\circ$ і $\rho = \rho_{\perp}$ при $\theta = 90^\circ$.

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} + \rho_{\perp})\cos^2\theta = \rho_{\perp} + \Delta\rho\cos^2\theta \quad (1.4)$$

де $\rho(\theta)$ – питомий опір (θ – кут напрямку електричного струму);

ρ_{\perp} – питомий опір перпендикулярний до зразка;

ρ_{\parallel} – питомий опір паралельний до зразка;

$\Delta\rho$ – середній питомий опір у зразку.

Співвідношення $\Delta\rho/\rho$ називається магніторезистивним коефіцієнтом та застосовується для визначення коефіцієнта корисної дії магніторезистивного датчику. Наприклад, коефіцієнт магніторезистивної корисної дії для сплаву NiFe становить декілька відсотків при кімнатній температурі [12].

1.2. Анізотропний магніторезистивний ефект як основа для створення сенсорів магнітного поля

Дифузійні процеси, фазоутворення та інтерфейсне розсіювання впливають на характеристики чутливих елементів плівкових сенсорів. Методи отримання та термообробка зразків обумовлюють їх певний фазовий стан тобто зберігання індивідуальності шарів чи гранульованих станів, що в свою чергу впливає на магніторезистивні властивості структур з можливим спін-залежним розсіюванням електронів. За умови, що опір феромагнітного матеріалу залежить від взаємної орієнтації векторів намагніченості та густини електричного струму в зразках спостерігається анізотропний магнітоопір. Відповідно, будуть реалізовані умови для виникнення анізотропного магнітоопору, який буде проявлятися у зміні величини опору при зміні взаємної орієнтації векторів намагніченості та густини електричного струму [13]. У магнітовпорядкованих середовищах присутній додатковий внесок в магніторезистивний ефект, який визначений анізотропією опору через присутність в системі спонтанної намагніченості. Однак, при температурі, що перевищує температуру Кюрі, він повністю зникне. Механізми створення магнітоанізотропного стану у плівках з одного феромагнітного шару може бути конденсаційного або термічного походження.

Такі механізми будуть характеризуватися дисперсією кута та амплітудою. Така локальна анізотропія проявляється у кристаліті плівкової форми, яка визначається, як локальна кристалографічна та анізотропна мікронапруженість. У багатошарових плівкових системах анізотропія магнітних властивостей пов'язана з формуванням твердих розчинів або гранульованих сплавів в об'ємі

системи внаслідок розмиття інтерфейсів. Дослідження в таких системах показали, анізотропія магнітоопору проявляється при переході від поздовжньої геометрії вимірювання до поперечної геометрії вимірювання, а також при переході у перпендикулярну геометрію.

Крім тонкоплівкових феромагнітних систем, на сьогоднішній день спостерігається підвищена зацікавленість також до феромагнітних наночасток, що пов'язано з їх унікальними властивостями, які відрізняють і від фізичних властивостей масивних матеріалів, і тонкоплівкових, що обумовлено проявом квантових розмірних ефектів. Особливістю наночастинок є те, що у залежності від розміру вони можуть перебувати у однодоменому магнітному стані і внаслідок цього мають відмінні магніорезистивні властивості [14].

Згідно теорії, значне зростання коерцитивної сили феромагнітного металу відбувається саме при переході від однодоменої до багатодоменої структури [15]. Завдяки особливостям структурних, магнітних і магнітрезистивних властивостей феромагнітні наночастинок знайшли широке практичне застосування в електроніці: при створенні жорстких дисків з надвисокою щільністю запису інформації, магнітних нанопристроях, надчутливих датчиків магнітного поля та ін. [16]. В даний час все більше використання знаходять анізотропні магнітрезистивні сенсори, які призначені для розв'язування різноманітних типів задач.

АМО-датчики характеризуються великими значеннями чутливості плівкової системи, забезпечують високий рівень первинного сигналу, широкий робочий температурний діапазон, надійність та точність роботи [17]. У принцип дії АМО датчика покладено застосування матеріалів, в яких проявляється анізотропний магнітрезистивний ефект, наприклад це може бути тонка плівка феромагнітного матеріалу, електричний опір якої змінюється в залежності від взаємної орієнтації струму та вектора намагнічуваності 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. На рисунку 1.3 наведено спрощену схему конструкції АМО-датчика.

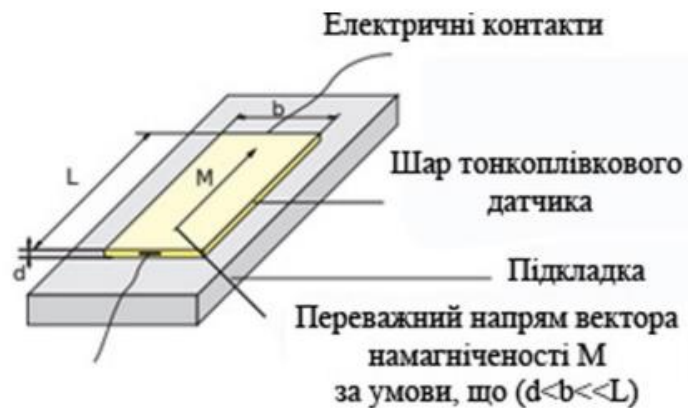


Рисунок – 1.3 Схематичне зображення тонкоплівкового АМО датчика. Із роботи [17]

На підкладку з напівпровіднику використовуючи метод випарування у вакуумі відбувається формування шару чутливого матеріалу який має вигляд стрічки, за умови що геометричні розміри стрічки відповідало вимогам $d < b \ll l$, де d – товщина, l – довжина та b – ширина 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 АМО датчикам в задачах вимірювання швидкості, положення та струму створюють датчики Хола. При порівнянні цих типів датчиків, виявляється, що датчики магніторезистивного типу мають ряд переваг. По-перше, основна перевага вносить напрямок зовнішнього магнітного поля, замість його величини, як в ефекті Хола. По-друге, широкий вибір магнітів для вимірювання, незалежно від їх залишкової намагніченості. По-третє, 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). Крім того АМО сенсори є температурно-стабільними вже після конденсації та мають розширений температурний діапазон (233 – 433°K).

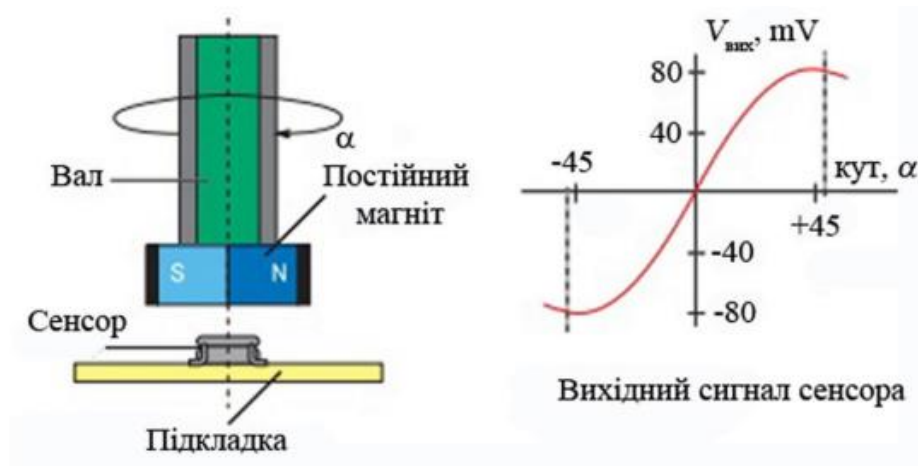


Рисунок 1.4 –Принцип роботи датчика кута повороту. Із роботи [17]

Вказані переваги АМР сенсорів особливо важливі в автомобільному будівництві та умовах жорсткої експлуатації, для якої характерні перепади температур та високі механічні вібрації. Висока чутливість також дозволяє використовувати АМР-сенсори для детектування слабких полів в навігаційних схемах, в який ефект Хола не застосовується та в якості сенсорів кутів повороту. На рисунку 1.4 наведено принцип вимірювання кутів. Основні сфери застосування датчиків повороту - автоелектроніка та робототехніка. Також широко використовуються сенсори детектування слабких полів на основі АМО.

РОЗДІЛ 2

ЗАСТОСУВАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ФЕРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ПРИ ФОРМУВАННІ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

2.1. Функціональний елемент сенсора на основі системи Co/Cr(Cu)/Co

Дослідження останніх років пов'язані з широким використанням на практиці різноманітних пристроїв, базовими компонентами яких вступають феромагнітні матеріали. Це викликано широким їх використанням при виготовленні сенсорів різних типів. Крім того вони застосовуються при розробці сучасних магнітних голівки для запису інформації на жорстких дисках та стрічкових накопичувачів інформації, індукційних пристроїв запису інформації, а також датчики зчитування магнітного поля. Новітні тенденції розвитку сенсорів в електроніці вимагають сукупного підходу до дослідження структурно-фазового стану, магнітооптичних і магніторезистивних властивостей сенсорів на основі чутливих елементів під дією на сенсорів різних температур з метою створення датчиків які мають стабільні характеристики [18]. Комбінуючи тонкоплівкові шари Co (Fe) з іншими як магнітними, так і немагнітними компонентами (при цьому товщина шару не повинна перевищувати 20 нм), можна реалізувати різноманітних структур, які й стали основою для виготовлення великої кількості різних пристроїв в спінтроніці, мікроелектроніці, датчиків чутливих елементів повороту, пристроїв зчитування та запису інформації.

У даному взаємовідношенню збільшується застосування у практиці нових систем із здійсненням розсіюванням спін-залежних електронів, наприклад таких як, Co/Cr [19]. Пошук нових поєднань магнітних і немагнітних матеріалів, пов'язаний з тим, що класичні поєднання Co/Cu, Fe/Cu вже не можуть задовольнити високим вимогам, які відносяться до нинішніх датчиків магнітного поля за такими параметрами, як індукція насичення, коефіцієнт

прямокутності, коерцитивна сила та чутливість системи. Крім того класичні системи часто проявляють нестабільність у процесі роботи під впливом факторів зовнішнього середовища.

Системи, компонентами яких виступають такі матеріали як Co і Cr, хоч і не дозволяють отримати значну амплітуду магніторезистивного ефекту, однак внаслідок того, що мають стабільні магнітні параметри також можуть бути альтернативою класичним системам. Також враховуючи той факт, що Co і Cr, практично не розчиняються один в одному у процесі конденсації та термообробці до 1000 К, то сформовані на їх основі чутливі елементи будуть проявляти магніторезистивні властивості, які не залежать від структурно-фазового стану системи.

У роботі [19] була запропонована універсальна концепція виготовлення універсального тонко плівкового температурного датчика магнітного поля. Як чутливий елемент цього сенсора була використана багатошарова плівкова система, в якій була мінімізована дія процесів фазоутворення та дифузії на межі розподілу окремих шарів. Схематично структура чутливого елемента датчика магнітного поля представлена на рисунку 2.1. Як видно з рисунку 2.1 чутливий

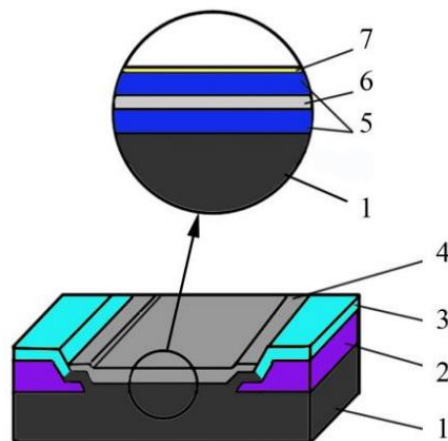


Рисунок 2.1 – Схематична конструкція зразка чутливого елемента датчика магнітного поля: 1 – підкладка; 2 – мідні контактні ділянки; 3 – плівка Ag; 4 – чутливий елемент; 5 – плівка Co або Fe; 6 – плівка матеріалу Me = Cr, Cu [19]

елемент представляє собою тришарову плівкову систему. При цьому були запропоновані дві варіації цієї системи: Fe/Me/Fe та Co/Me/Co, де Me = Cu (Cr).

Формування чутливого елемента проводилося методом пошарової електронно-променевої конденсації. Важливим при цьому було дотримання умов осадження: тиск газів залишкової атмосфери $p \sim 10^{-4}$ Па; швидкість осадження $\omega = 0,02 - 0,08$ нм/с (при формуванні шарів Fe, Co) та 0,01–0,03 нм/с (при формуванні шарів Cu та Cr). Для покращення адгезії між нижнім шаром тришарової структури та підкладкою, процес осадження здійснювався на підігріті 450 К підкладки. Також це дозволяє позбутися частини структурних дефектів вже на стадії конденсації. Завершувався процес виготовлення чутливого елемента нанесенням захисного покриття, в ролі якого виступає шар Ag товщина якого не перевищує 5 нм. Перед осадження чутливого елемента на поверхні підкладки формувалися мідні контактні майданчики методом термічного випарування.

У роботі [19] були запропоновані 4 модифікації чутливого елемента:

- 1) системи Co(5)/Cr(d_{Cr})/Co(20)/П, де $d(Co) = \text{const.}$, $d(Co) = 3-20$ нм;
- 2) системи Co(d_1)/Cu(d_{Cu})/Co(d_2)/П, де $d(Cu) = 5-20$ нм, а товщини Co змінювалися в межах від 5 - 30 нм, товщина шарів Co d_1 та d_2 – в межах від 5 до 30 нм;
- 3) системи Fe(d_{Fe})/Cu(12)/Fe(28)/П, де товщина верхнього шару Fe дорівнювала $d(Fe) = 15-20$ нм;
- 4) системи Fe(d_{Fe})/Cr(20)/Fe(22)/П, де товщина верхнього шару Fe дорівнювала $d(Fe) = 8-18$ нм.

Для зразків четвертої серії також були проведені додаткові дослідження впливу концентрації компонент на величину чутливості до магнітного поля, величини коерцитивної сили та амплітуди АМО-ефекту. Це було зроблено для того, щоб визначити систему з оптимальними робочими параметрами, сформованого на її основі сенсора. При цьому на кожному етапі досліджень контролювався фазовий стан чутливого елемента. Зокрема було показано, що чутливий елемент АМР сенсора Co/Cr/Co/П має стабільний фазовий стан

ОЦК-Cr + ГЦП-Co у температурному діапазоні 300-800 К. Лише за умов термообробки до 900 К відбувається формування інтерметалідної фази CoCr та оксиду Cr₂O₃.

Отже такий фактор як стабільність фазового стану у температурному інтервалі 300-800 К є важливою перевагою з практичної точки зору для системи Co/Cr/Co/П у порівнянні із іншими, оскільки даний процес не буде впливати на магнітнорезистивні властивості і робочі параметри чутливого елемента.

Таблиця 2.1 містить узагальнену інформацію стосовно того як впливає концентрація компонент у системі Co/Cr/Co/П на амплітуду анізотропного магнітнорезистивного ефекту.

Рисунок 2.2 ілюструє як залежить амплітуда магнітнорезистивного ефекту від орієнтації прикладеного зовнішнього магнітного поля, а саме враховує зміну кута повороту при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком кута 10°. На рисунку 2.2 наведені дані як для чутливого елемента Co(5)/Cr(5)/Co(20)/П після формування у вакуумі та після термообробки за температур 800 та 1000 К [21]

Таблиця 2.1 – Значення величини АМО при кімнатній температурі для плівкових систем на основі Co і Cr [20]

Система	c _{Co} , ат.%	АМО, %		
		T _п =450 К	T _в =800 К	T _в =1000 К
Co (15)/П	100	2.43	13.75	-
Co(5)/Cr(3)/Co (20)/П	89	2.93	1.94	3,38
Co(5)/Cr(5)/Co (20)/П	83	5.37	3.69	6,65
Co(5)/Cr(8)/Co (20)/П	76	16.70	13.56	3,20
Co(5)/Cr(10)/Co (20)/П	71	0.11	32.27	2,23
Co(5)/Cr(13)/Co (20)/П	66	8.36	10.36	75,57
Co(5)/Cr(15)/Co (20)/П	53	2.39	8.73	12,85
Co(5)/Cr(20)/Co (20)/П	56	11.24	5,15	3,81

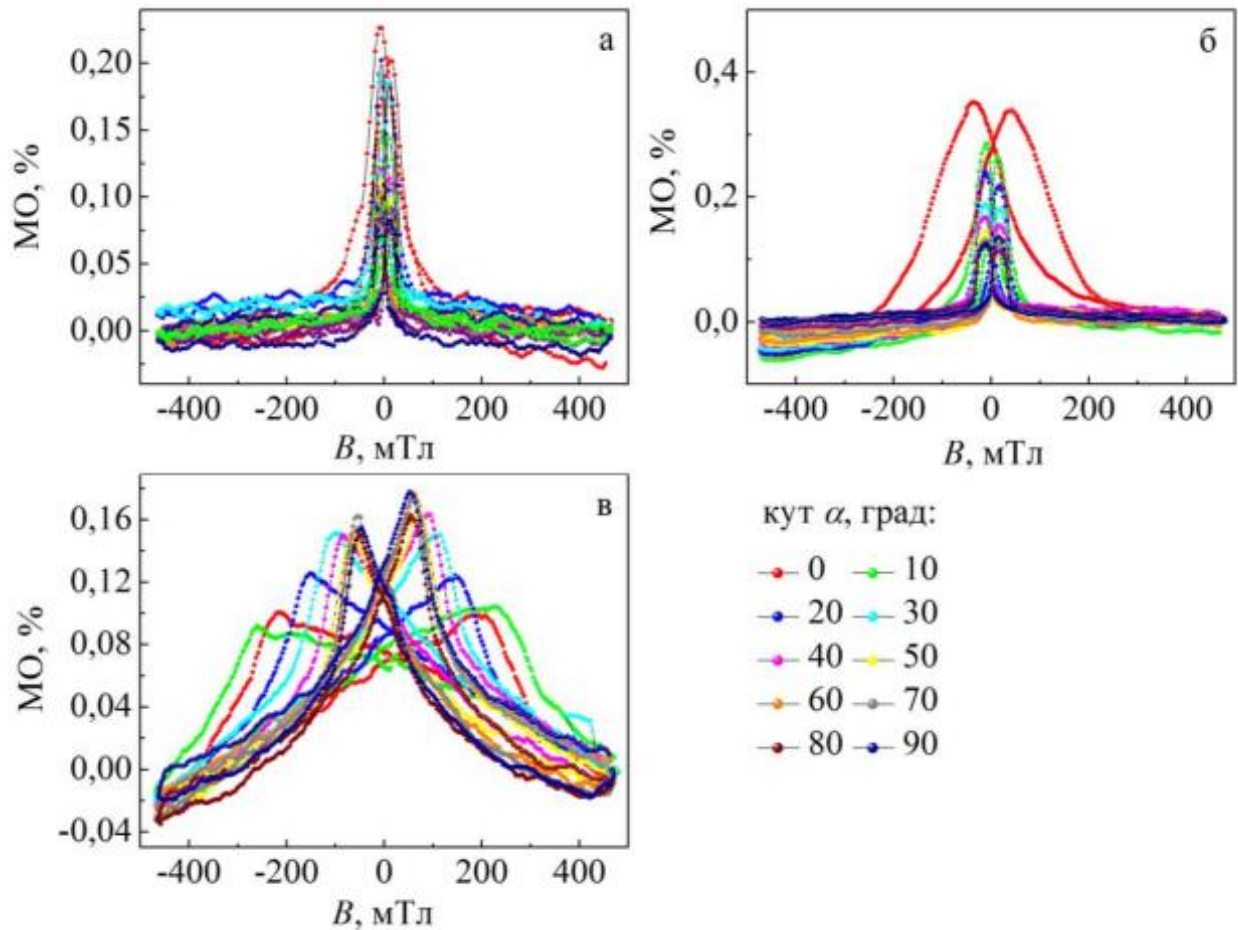


Рисунок 2.2 – Залежність розміру магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії вимірювання з кроком кута 10° для плівкового зразка Co(5)/Cr(5)/Co(20)/П у свіжесконденсованому стані (а) та вслід термовідпалювання до $T_B = 800$ (б) та 1000 К (в) [21]

Для чутливих елементів після формування зміна кута повороту з 0° до 90° спричиняє зменшення амплітуди магніторезистивного ефекту, при цьому значення коерцитивної сили практично не змінюється. Інша ситуація спостерігається і для зразків після термообробки за температури 800 К. По перша має місце зміна форми магніторезистивної петлі, а величина ефекту зменшується з 0,30 до 0,1 % при збільшенні кута повороту з 0° до 90° (рис. 2.2 б). Збільшення температури термообробки до 1000 К (рис. 2.2 в) має місце вже зростання амплітуди магніторезистивного ефекту при зміні орієнтації магнітного поля з поперечної до перпендикулярної.

Аналізуючи дані стосовно зміни залежності величини коерцитивної сили для чутливих елементів $\text{Co}(15)/\text{Cr}(x)/\text{Co}(20)/\text{П}$ після термообробки, то можна зазначити, що при обертання зразка з 0° до 90° спричиняє зменшення величини B_c для всього діапазону кутів [21]. Причину цього автори [21] вбачають у розворотом систему від осі важкого намагнічування до осі легкого намагнічування. Зміна величини B_c зі зміною кута орієнтації магнітного поля також є проявом магнітної анізотропії в системі. Враховуючи характер прояв даного ефекту при зміні кута повороту можна сформулювати тонкоплівкові чутливі елементи з прогнозованим значення величини коерцитивної сили при роботі сенсора і зміні кутів від 0° до 90° .

Застосовуючи формулу (2.1) було проведено розрахунки величини B_c для систем на базі Co і Cr при зміні товщини проміжного шару та умов термічної обробки.

$$B_c(a) = B_c(0)/\cos a \quad (2.1)$$

де $B_c(0)$ – значення коерцитивної сили при орієнтації магнітного поля (В) вздовж осі легкого намагнічування.

Як засвідчили дослідницькі результати формула (2.1) дала гарне узгодження дослідних результатів з розрахунками на (рис. 2.3 а) для більшості обраних умов, що демонструє перспективність можливого використання цієї

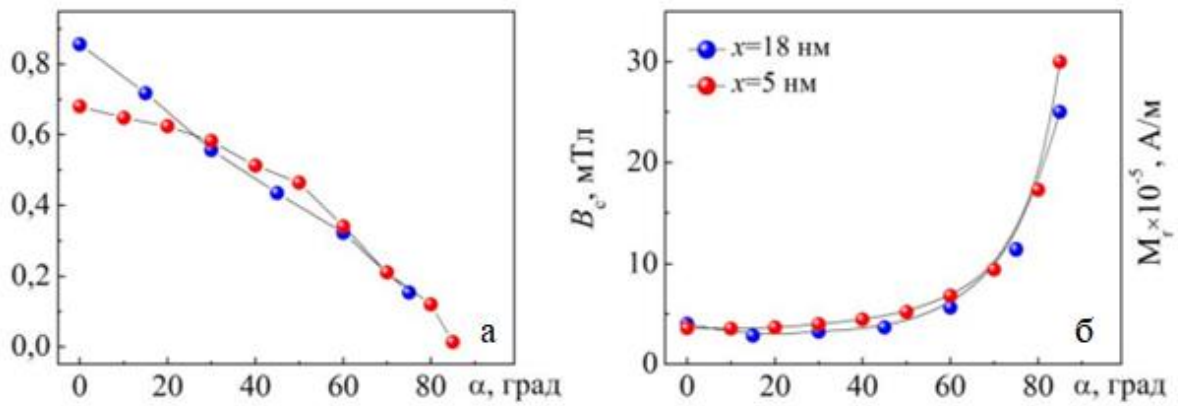


Рисунок 2.3 – Залежність величини прикладеного зовнішнього магнітного поля (а) та залишкової намагніченості (б) від коерцитивної сили для тришарової плівкової системи $\text{Co}(15)/\text{Cr}(x)/\text{Co}(20)/\text{П}$ при повороті зразка на кут до 85° , де $x = 5, 18$ нм [21]

плівкової системи у датчиках повороту. На (рис. 2.3) приведена залежність коерцитивної сили B_c для зразків від повороту кута, позначає найбільші вподобання до коерцитивної сили анізотропної плівок з тонким прошарком Cr.

Аналізуючи магніторезистивні та магнітні властивості плівкової системи, потрібно також відзначити величезну вагу коерцитивної сили B_c (> 200 мТл) в системі плівок при товщині $d_{\text{Cr}} \geq 10$ нм, що, як вже зазначалося, є особливим для плівкових систем зі розсіюванням електронів як спін-залежним. Максимальні значення коерцитивної сили були зафіксовані у перпендикулярній геометрії у всьому діапазонному відрізку термовідпалюванні, що можна пояснити присутністю важкої вісі намагнічування в геометрії вимірювання. Зауважимо, що також було проведено дослідження зміни залишкової намагніченості від повороту кута зразка (рис. 2.3 б), отримані результати будуть використані як робочі характеристики при виготовленні датчиків магнітного поля. Аналізуючи залежність залишкової намагніченості від кута для зразків плівки $\text{Co}/\text{Cr}/\text{Co}$ у свіжесконденсованому виді можна відзначити, що незалежно від товщини шарів плівки та загальної товщини прошарків, величина залишкової намагніченості буде зменшується зі зростанням кута.

Підсумовуючи вище сказане можна зробити наступні висновки. По-перше, системи типу Fe/Me/Fe та Co/Me/Co, де Me = Cu (Cr) доцільно застосовувати при виробництві стабільних датчики, призначених для детектування слабких магнітних полів. По-друге, той факт, що фазовий стан систем не змінюється в інтервалі температур 300-800 К, дозволяє розробити сенсори зі стабільними робочими параметри у даному температурно діапазоні. Тобто виключити фактор температуру, як один факторів, що зумовлює нестабільність роботи сенсорів. По-третє, застосування чутливого елемента, сформованого на основі Co і Cr дозволяє реалізувати стабільні значення таких величин як індукція магнітного поля, амплітуда магніторезистивного ефекту та чутливості системи.

Крім того, слід відмітити, що конструкція запропонованого чутливого елемента сенсора магнітного датчика є простою з точки зору виробництва та подальшої експлуатації досить легка у виробництві та використанні як датчика повороту, сенсора магнітного поля з високою чутливості до зміни індукції магнітного поля, а також багатофункціонального сенсора, призначеного для одночасного вимірювання температури та амплітуди МО. Перспективним напрямком застосування таких сенсорів є виготовлення на їх основі індукційних пристроїв для запису інформації.

2.2 Функціональний елемент сенсора на основі системи Co/Gd/Co, Fe/Gd/Fe

АМР-датчики знайшли широке використання для потреб автоелектроніки, промисловості та навігаційних систем, тощо. До основних їх переваг можна віднести високу роздільну здатність; висока чутливість до знаку вимірюваного магнітного поля; відносно широкий частотний діапазон ($f = 0-1000$ Гц); широкий діапазон робочих температур (200– +430 К); низький номінальний струм; термостабільність і швидкодія; низький опір ($R \sim 850$ Ом), що мінімізує тепловий шум магніторезистивного чутливого елемента. Крім

цього, до переваг АМР-датчиків варто віднести малі геометричні розміри і масу, високу технологічність виробництва, відносно низьку вартість, а також високі показники надійності і терміну експлуатації.

Вкрай важливо при непрямій оцінці опору, забезпечувати як точне утримування струму збудження, так і вимірювання вихідної напруги. При цьому потужність, що розсіюється на резистивному датчику повинна бути досить малою, щоб уникнути помилок, які пов'язані з самонагріванням чутливого елемента. Це можливо, коли номінал струму збудження мінімізований. Згідно з цим при дослідженні магніторезистивних властивостей ми використовували постійний струм величиною 1 мА. Необхідно також враховувати, що на режим роботи АМР-датчика впливає не тільки коливання температури, а й зовнішні фактори, зокрема паразитні магнітні поля.

Принцип дії АМР-датчиків заснований на використанні анізотропного магніторезистивного ефекту, тобто на здатності магнітного матеріалу змінювати опір у залежності від взаємної орієнтації протікаючого струму і вектора переважної намагніченості магнітних доменів плівки. Зовнішнє магнітне поле B повертає вектор намагніченості плівки M на кут α , значення якого залежить від напрямку і значення такого поля.

Розглянемо спрощену схему конструкції АМР-датчика (рис. 2.4), запропоновану у роботі [25]. На підкладку (або монтажну плату) наноситься шар чутливого матеріалу. Для виготовлення підкладок використовують скло, ситал або кремній, що характеризуються великою теплопровідністю. Також важливим є, щоб коефіцієнт термічного розширення (КТР) підкладки та тонкоплівкового чутливого елемента були близькими за величиною. Зверху на чутливий елемент такого датчика наносяться контакти. Після цього його можна монтувати в корпус або наносити захисне покриття. У даному випадку, найбільш очевидний спосіб вимірювання опору полягає у пропусканні постійного електричного струму через наявний резистивний елемент з наступним вимірюванням падіння напруги на ньому.

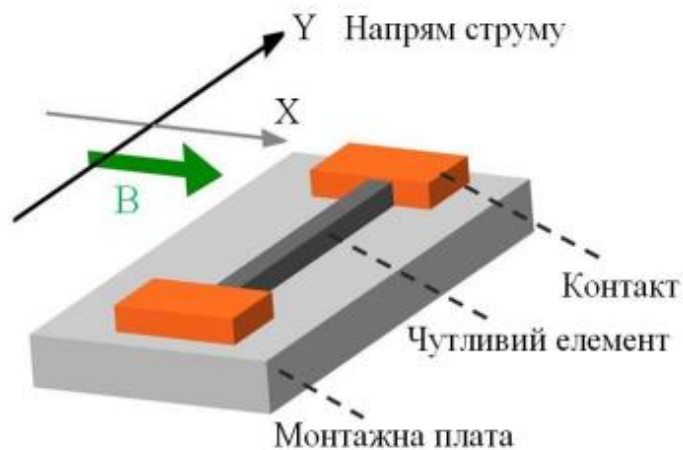


Рисунок 2.4 – Спрощена схема анізотропного магніторезистивного датчика [22]

Для таких тонкоплівкових датчиків анізотропний опір R чутливого елемента в залежності від кута α між напрямками електричного струму чутливого елемента датчика і керуючого постійного магнітного поля описується за формулою Фойгта-Томпсона [22]:

$$R = R(\alpha) = R_0 \sin^2 \alpha + R_{90^\circ} \cos^2 \alpha \quad (2.2)$$

де R_{90° – питомий електричний опір чутливого елемента при $\alpha = 90^\circ$.

R_0 – електричний опір матеріалу чутливого елемента при $\alpha = 0^\circ$.

При формуванні структури чутливого елемента важливе значення має здатність датчика реагувати на зміну магнітного поля незалежно від геометрії вимірювання. Також, величина чутливості до магнітного поля, щоб забезпечити швидке реагування датчика на зміну вхідного сигналу (наприклад, миттєве замикання/розмикання електричного кола у системах автоматизації) або для того, щоб була можливість забезпечити високу точність вимірювання при детектуванні слабких полів.

Анізотропні магніторезистивні датчики повинні мати високі чутливість та рівні первинного сигналу, широкий робочий температурний діапазон, достатню міцність, надійність і точність роботи. Крім того, вони відрізняються малим

зміщенням і значною нечутливістю до магнітних і механічних допусків, що дозволяє використовувати їх у різних сферах.

Максимальне значення чутливості плівкової системи до магнітного поля визначалося за формулою [25]:

$$S_B = \Delta R (\Delta R / R(B_S))_{max} / \Delta B \quad (2.3)$$

де $(\Delta R / R(B_S))_{max}$ – найбільше значення магнітоопору; B_S – поле насичення; ΔB – зміна індукції магнітного поля від насичення B_S до розмагнічування.

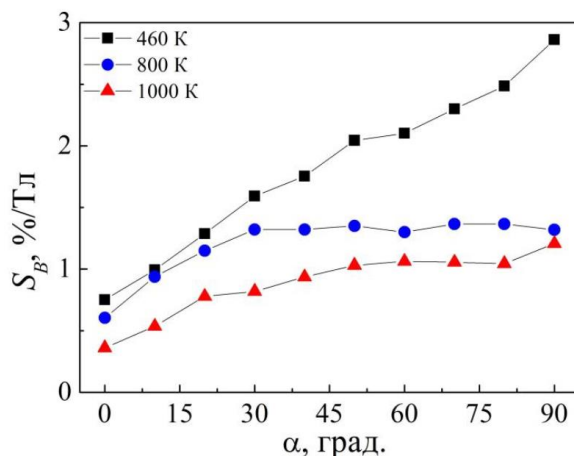
S_B вимірюється у %/Тл та дає інформацію про співвідношення величин магнітоопору і поля насичення.

Результати розрахунків величини S_B у трьох геометріях вимірювання для одношарових плівок Co і Fe та тришарових плівкових систем Co/Gd/Co та Fe/Gd/Fe у свіжосконденсованому стані та після термообробки приведені у таблиці 2.2 [25]. Аналіз цих даних показує, що одношарові плівки Co характеризуються більшою магнітною чутливістю до магнітного поля у порівнянні з плівками Fe у всіх геометріях вимірювання. Подібна тенденція величини S_B спостерігається і для тришарових плівок. Тришарові плівки Co/Gd/Co мають більшу магнітну чутливість до магнітного поля ніж Fe/Gd/Fe. Внесення прошарку з Gd у плівку феромагнітного металу призводить до зростання величини S_B , причому воно більш явно виражене для тришарових плівок Fe/Gd/Fe. Після термообробки не проявляється явно вираженої тенденції до зміни величини S_B для всіх розглядуваних плівок і тришарових систем [25].

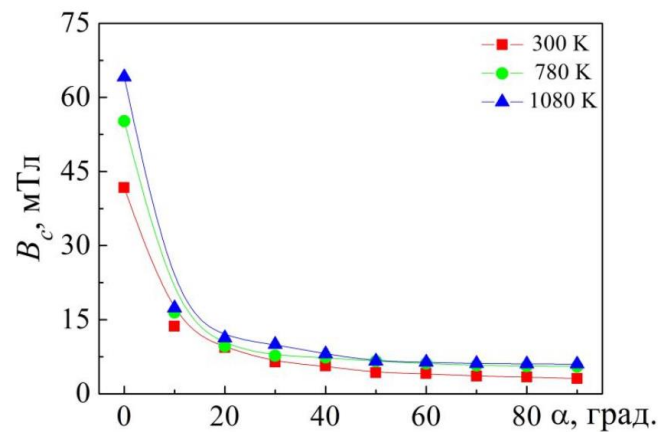
При використанні таких плівкових систем, як чутливих елементів датчиків положення, важливим фактором є вплив орієнтації зовнішнього магнітного поля на величину S_B . Розглянемо на прикладі тришарової плівки Co(5)/Gd(10)/Co(20)/П вплив зміни орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі на величину S_B для свіжосконденсованої плівки та після її термообробки. Як видно з рисунка 2.5а при переході від перпендикулярної геометрії вимірювання до поперечної чутливість до магнітного поля падає не залежно від

Таблиця 2.2 – Значення чутливості плівкової системи до магнітного поля при різних геометріях вимірювання для тришарових плівок у свіжосконденсованому стані та після термічної обробки [25]

Структура чутливого елемента	$S_B, \%/T$					
	$T = 460 \text{ K}$			$T = 800 \text{ K}$		
	геометрія вимірювання			геометрія вимірювання		
	перпенд.	попер.	позд.	перпенд.	попер.	позд.
Co(5)/Gd(5)/Co(20)/П	1,93	0,74	0,61	-	-	-
Co(5)/Gd(15)/Co(20)/П	1,53	0,81	0,25	2,11	0,85	0,33
Co(5)/Gd(10)/Co(20)/П	0,75	2,86	0,66	1,32	0,61	0,54
Fe(5)/Gd(1)/Fe(20)/П	0,44	0,12	0,11	0,15	0,66	0,16
Fe(5)/Gd(5)/Fe(20)/П	0,63	0,24	0,23	0,41	0,76	0,47
Fe(5)/Gd(10)/Fe(20)/П	0,51	0,32	0,29	0,27	0,52	0,23



а



б

Рисунок 2.5 - Залежність величини чутливості S_B (а) та величини коерцитивної сили (б) від напрямку орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі та температури відпалювання для тришарової плівки Co(5)/Gd(10)/Co(20)/П [25]

температури термообробки. Плівкова система Co(5)/Gd(10)/Co(20)/П у свіжосконденсованому стані характеризується лінійною робочою характеристикою, що є дуже важливим з точки зору практичного використання [25]. Після термообробки до 800 К чутливість зменшується, а робочі характеристики відхиляються від лінійної залежності. Подальша термообробка до 1000 К призводить до зменшення величини S_B , хоча на характер залежності вона суттєвим чином не впливає. З цього можна зробити висновок, що такі системи можуть бути використані у якості чутливих елементів датчиків та сенсорів. Як видно з рисунка 2.5а у процесі довготривалої експлуатації або суттєвого перегріву датчика його характеристики можуть відхилитися від лінійних. За цим непрямо можна судити із даних про термообробку. Такі датчики будуть мати стабільні лінійні робочі характеристики у діапазоні температур 300- 460 К, що свідчить про їх велику перспективність використання [25].

Ще одним із можливих підходів застосування тришарових плівок Co/Gd/Co як чутливих елементів магніторезистивних датчиків є використання у якості робочої характеристики не зміни величини магнітоопору (у наслідок зміни кута α між напрямом електричного струму чутливого елемента датчика (I) і напрямом керуючого магнітного поля (B)), а коерцитивної сили. На рисунку 2.5б приведено залежність величини коерцитивної сили від напрямку орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі (дані були отримані з магніт резистивних петель гістерезису) після різних температур відпалювання для тришарової плівки Co(5)/Gd(10)/Co(20)/П. Як бачимо із даних наведених на

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТІ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТОНКОПЛІВКОВОГО ЕЛЕМЕНТУ СЕНСОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Аналіз літературних даних (див., наприклад, [26, 27]) та низка експериментальних даних засвідчує, що більшість тонкоплівкових матеріалів, навіть із ГМО, не дозволяють значною мірою підвищити чутливість до магнітного поля: порівняно великі значення МО таких матеріалів досягаються в досить сильному магнітному полі. Наприклад, величина амплітуди ГМО багат шарової плівки Co/Cu близько 60 % реалізується в магнітному полі індукцією 0,2 Тл [28]. Чутливість виготовленого із такого матеріалу магніторезистивного елемента не більше за 0,4 %/Тл, що на порядок менше, ніж для традиційних магніторезистивних елементів.

Оскільки чутливість багат шарових систем істотно збільшується за зменшення антиферромагнітної взаємодії між магнітними шарами, то існує значна кількість різних способів послаблення антиферромагнітної взаємодії. Найбільш простий із них реалізується за рахунок збільшення товщини немагнітного прошарку. Так, за товщини близько 2,1 нм (другий антиферромагнітний максимум) напруженість магнітного поля насичення для багат шарових зразків Co/Cu зменшується до 40 мТл, тобто у 5 разів. Відповідно у стільки ж разів підвищиться і чутливість.

При виборі плівкової системи як елементна база мікроелектроніки важливу роль, крім МО, відіграє ще й величина поля насичення B_S . Найменші значення B_S досягаються в спін-вентильних структурах за рахунок різниці величини коерцитивної сили магнітних шарів, різної товщини шарів або виготовленням із шарів різних матеріалів [29]. На величину поля насичення плівкових зразків значною мірою впливає термооброблення – потрібно враховувати зміну МО під час відпалювання, яка може бути також досить значною. Тому в працях, присвячених застосуванню АМО – структур у сенсорній техніці (див., наприклад, [30]), вводиться поняття чутливості S_B

плівкової системи до магнітного поля. У даній роботі розрахунки чутливості досліджуваних нанорозмірних плівкових матеріалів до магнітного поля були проведені за співвідношенням

$$S_B = \left| \frac{(\Delta R/R(B_s))_{max}}{\Delta B} \right| \quad (3.1)$$

де $\Delta R/R(B_s)$ – максимальне значення магнітоопору; ΔB – зміна магнітної індукції від насичення (або максимального значення) B_s до розмагнічування B_c , величина якої фактично дорівнює $\Delta B = B_s + B_c$ (рис. 3.1).

Зазначимо, що величина S_B , як правило вимірюється в %/Тл (або в %/(кА/м)) та свідчить про те як співвідносяться між собою величини магнітоопору та поля насичення.

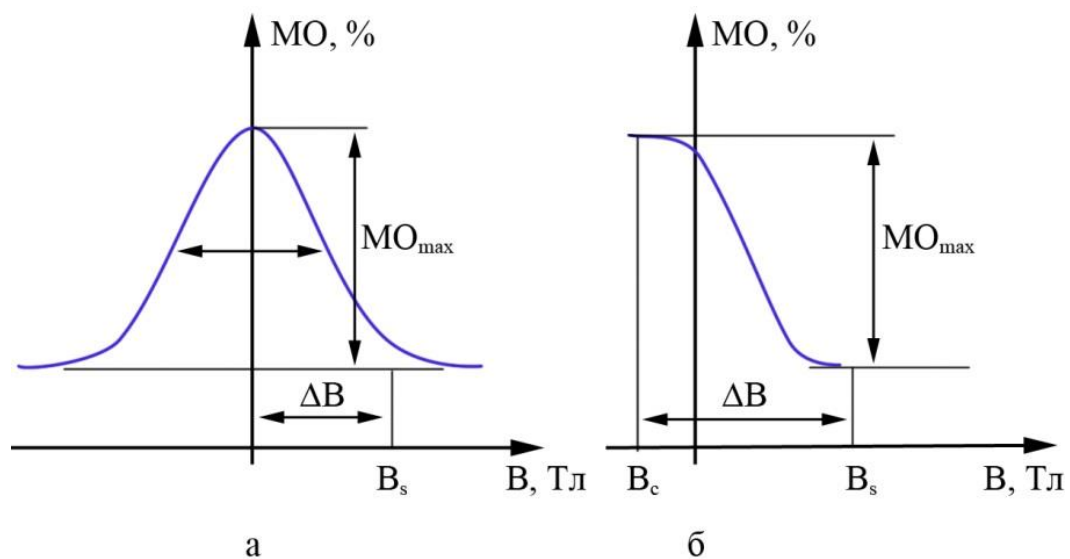


Рисунок 3.1 – Схема визначення чутливості до магнітного поля для випадку магніторезистивної залежності без (а) і з гістерезисом (б) [30]

У цій роботі розрахунки магнітного поля до чутливості проводилися для наступних плівкових систем (рис. 3.2):

- 1) системи $\text{Co}(5)/\text{Ag}(d_{\text{Ag}})/\text{Py}(30)/\text{П}$ (П – ситалова підкладка, $d_{\text{Ag}} = 3..15$ нм – товщина немагнітного шару);
- 2) системи $\text{Co}(30)/\text{Ag}(d_{\text{Ag}})/\text{Py}(5)/\text{П}$ ($d_{\text{Ag}} = 3..15$ нм – товщина срібла).

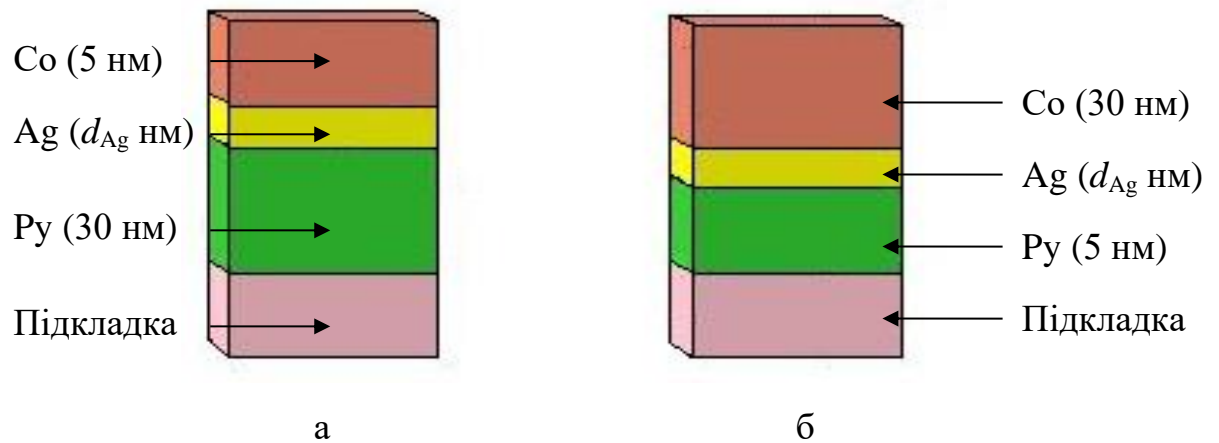


Рисунок 3.2 – Структури плівок функціонального сенсорного елементу магнітного поля: а – $Co(5)/Ag(d_{Ag})/Py(30)/П$; б – $Co(30)/Ag(d_{Ag})/Py(5)/П$ [30]

Приклади польових залежностей для досліджуваних структур наведені на (рис. 3.2). При формуванні чутливих елементів сенсорів суттєве значення має здатність робочого елементу реагувати на зміну прикладеного магнітного поля, незалежно від його орієнтації, а також величина чутливості до магнітного поля (S_B). Дані умови необхідні для забезпечення швидкого реагування робочого елементу сенсору магнітного поля, на зміну вхідного сигналу (наприклад, миттєве замикання/розмикання електричного ланцюгу в системах автоматизації), а також для наявності високої точності вимірювання при детектуванні слабких полів. Результати розрахунків величини чутливості зведені у (табл. 3.1).

Аналіз розрахункових результатів величини S_B для спін-вентильних структур показав, що максимальна величина S_B у свіжосконденсованих зразках становила 5,21 %/Тл.

Практично для всіх зразків процес відпалювання до 500 К призводить до покращення чутливості до магнітного поля систем $Co/Ag/Py$ обох серій. При цьому, збільшення величини S_B в процесі відпалювання до 500 К для систем обох серій з $d_{Ag} = 3$ нм виявилось більш суттєвим (практично в 5 разів) у порівнянні з іншими зразками. Максимальне значення чутливості в даному випадку становило 8,40 %/Тл. Характер зміни S_B в процесі відпалювання на пряму пов'язаний як зі змінами у формі польових залежностей, так і величини

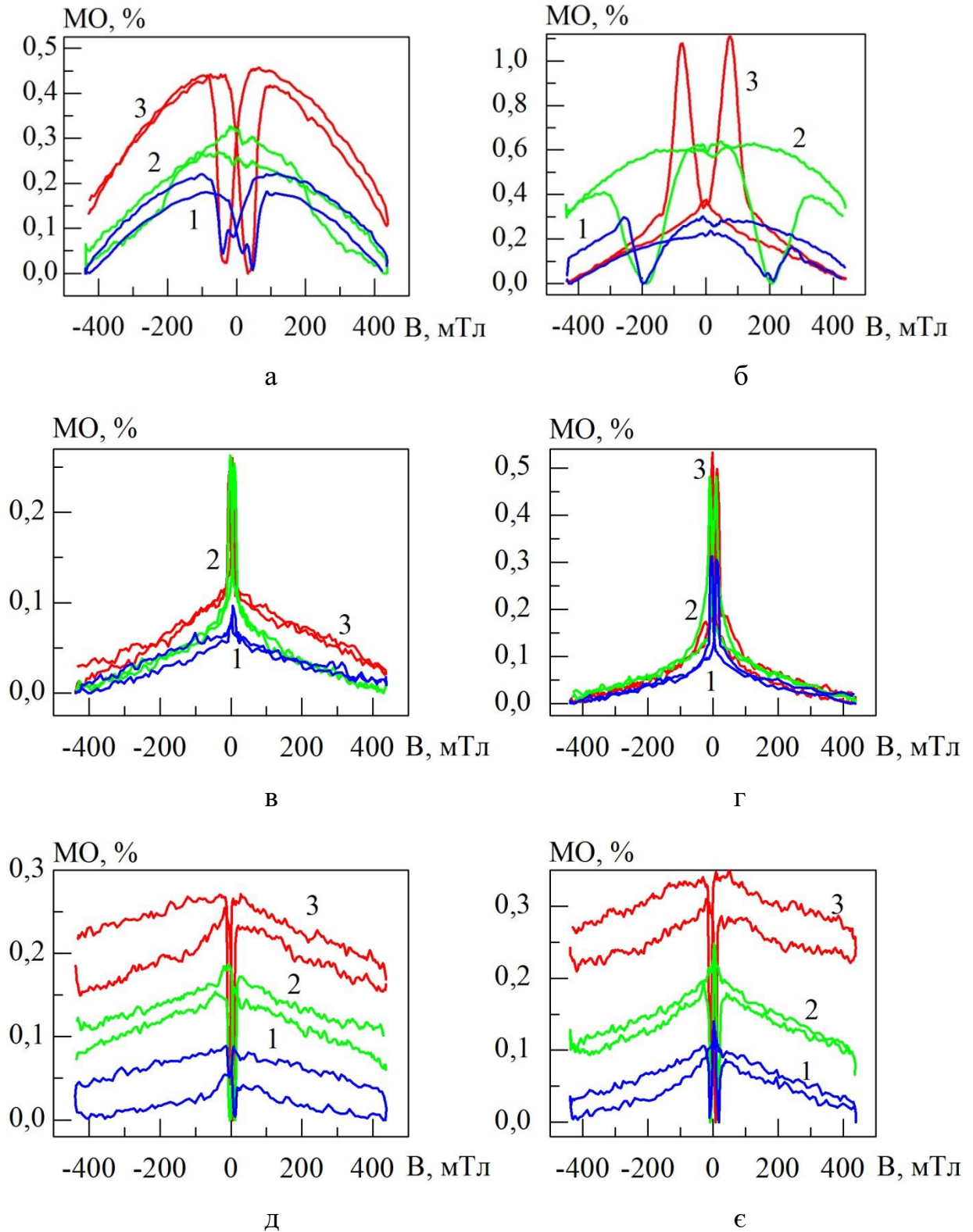


Рисунок 3.3 – Залежність магнітоопору від індукції магнітного поля для плівкових систем $\text{Co}(5)/\text{Ag}(3)/\text{Py}(30)/\text{П}$ (а, в, д) та $\text{Co}(5)/\text{Ag}(15)/\text{Py}(30)/\text{П}$ (б, г, е) при перпендикулярній (а, б) поперечній (в, г) та повздовжній (д, е) орієнтаціях магнітного поля та $T_B = 300$ (1), 530 (2) і 750 К (3) [30]

Таблиця 3.1 – Чутливість тонкоплівкових систем Co/Ag/Py [30]

Зразок	S_B , %/Тл								
	перпендикулярна			поперечна			поздовжня		
	300 К	500 К	750 К	300 К	500 К	750 К	300 К	500 К	750 К
Co(5)/Ag(3)/Py(30)/П	0,38	0,74	0,61	0,71	3,52	3,04	0,54	2,57	4,18
Co(5)/Ag(6)/Py(30)/П	0,44	0,89	0,87	3,92	4,40	4,37	2,41	2,98	3,23
Co(5)/Ag(9)/Py(30)/П	0,59	1,07	0,77	5,21	5,53	6,71	0,31	5,00	5,03
Co(5)/Ag(12)/Py(30)/П	0,42	0,93	0,68	3,62	3,71	3,67	2,13	1,94	2,36
Co(5)/Ag(15)/Py(30)/П	0,33	0,64	2,13	4,33	8,40	6,17	1,13	3,25	4,95
Co(30)/Ag(3)/Py(5)/П	0,11	0,5	0,27	1,67	7,17	6,21	0,77	6,88	4,03
Co(30)/Ag(6)/Py(5)/П	0,15	0,45	0,30	4,50	3,88	3,52	0,36	1,04	0,98
Co(30)/Ag(9)/Py(5)/П	0,20	0,39	0,71	1,68	3,19	3,84	0,47	0,88	0,79
Co(30)/Ag(12)/Py(5)/П	0,28	0,46	0,44	2,34	4,04	4,09	0,34	0,50	0,26
Co(30)/Ag(15)/Py(5)/П	0,22	0,32	0,60	1,91	3,26	2,80	0,35	1,88	2,33

МО, які в свою чергу спричиняються змінами у структурно-фазовому стані досліджуваних зразків.

В цілому ж комплексний аналіз структурно-фазового стану, МО, величини V_C та S_B досліджуваних систем дозволяє зробити висновок, що вони в залежності від товщини немагнітного шару та режиму термообробки можуть задовольняти вимогам, які висуваються як до датчиків з високою швидкістю реагування на зміну магнітного потоку, так і при створенні стабільних датчиків, основною функцією яких є детектування слабких магнітних полів. Виключити вплив високої температури на робочі характеристики можна використовуючи зразки, що пройшли термообробку.

ВИСНОВКИ

1. Сучасні світові тенденції розробки сенсорів поля полягають у комплексному підході до їх виготовлення, який включає: використання нових матеріалів, які мають нові та більш широкі функціональні можливості технічного застосування; вивчення фізичних процесів, які відбуваються в чутливих елементах з метою покращення їх характеристик; удосконалення технологій та методик одержання стабільних електрофізичних властивостей чутливих елементів.

2. Аналіз плівкових сенсорів на основі мультишарів Co/Cu, Fe/Cr свідчить про те, що у порівнянні з мультишарами чи гранульованими сплавами, плівкові матеріали із спін-залежним розсіюванням електронів у вигляді багатошарових плівок та спін-клапанних структур, простіші з точки зору виготовлення, а також мають великий потенціал застосувань в різних галузях.

3. Система Co/Cr(Cu)/Co у залежності від типу та концентрації компонент може бути використана в цифрових і аналогових схемах для швидкого реагування на зміну магнітного потоку, або при створенні стабільного датчика для виявлення слабких магнітних полів.

4. Тришарові плівки системи на основі Co і Gd характеризуються високою чутливістю до магнітного поля, стабільними та високими значеннями коефіцієнтів прямокутності, це дозволяє розглядати їх як перспективний матеріал у виготовленні конструктивних елементів для новітнього приладобудування, засобів зберігання інформації та АМО-датчиків.

5. Проведені розрахунки величини чутливості до магнітного поля S_B для тришарових систем двох серій: I – (Co(5)/Ag(d_{Ag})/Py(30)) та II – (Co(30)/Ag(d_{Ag})/Py(5)) серій, де $d_{Ag} = 3..15$ нм. Показано, що найбільша величина S_B для зразків у свіжосконденсованому стані становила 5,21 %/Тл.

6. Процес термовідпалювання спричиняє зростання величини чутливості до магнітного поля. Збільшення величини S_B в процесі термовідпалювання до 500 К для систем обох серій з $d_{Ag} = 3$ нм виявилось найбільш суттєвим (практично в 5 разів) у порівнянні з іншими зразками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Piskin H., Akdogan N. Interface-induced enhancement of sensitivity in NiFe/Pt/IrMn-based planar hall sensors with nanoTesla resolution // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2019. – V. 292. – P. 24-29.
2. Van Su Luong, Anh Tuan Nguyen, Anh Tue Nguyen. Exchange biased spin valve-based gating flux sensor // *Measurement*. – 2018. – V. 115. – P. 173-177.
3. Muhammad Zahir Iqbal, Ghulam Hussain, Salma Siddique, Muhammad Waqas Iqbal. Graphene spin valve: An angle sensor // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – V. 432. – P. 135-139.
4. Чешко І.В., Костенко М.В., Гребинаха В.І., Логвинов А.М., Проценко С.І. Формування приладових наноструктур спін-клапанного типу на основі Co і Cu // *Ж. Нано Електрон. Фіз.* – 2016. – Т.8, №3. - С.03041.
5. Spin Valves with the Controlled Shift of Low-Field Hysteresis Loop and High-Sensitive Sensing Elements on Their Basis / T.A. Chernyshova, M.A. Milyaev, L.I. Naumova, et al. // *Phys. Met. Metallogr.* – 2018. – V.119. – P. 530-535.
6. Highly sensitive giant magnetoresistance (GMR) based ultra low differential pressure sensor / Umesh P. Borole, Sasikala Subramaniam, Ishan R. Kulkarni // *Sens. Actuat. A: Phys.* – 2018. – V. 280. P. - 125-131.
7. GMR biosensor arrays: A system perspective / D.A. Hall, R.S. Gaster, T. Lin, et. al. // *Biosens. Bioelectron.* – 2010. – V. 25. – P. 2051–2057.
8. Кондрахова Д. М. Взаємний зв'язок властивостей і структури плівкових чутливих елементів сенсорів магнітного поля: автореф. дис. на здобуття наук.ступення канд. фіз-мат наук: спец. 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. –суми, 2015. 23 с.
9. Куницький Ю.А., Курилюк В.В., Однодворець Л.В., Проценко І.Ю. Основи спінтроніки: Матеріали, прилади та пристрої. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 127 с.
10. Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing. *Sensors/* C. Reig, M.-D. Cubells-

- Beltran, D.R. Muñoz. – 2009. – V. 9. – P. 7919–7942.
11. Lisa Jogschies, Daniel Klaas, Rahel Kruppe, Johannes Rittinger, Piriya Taptimthong, Anja Wienecke, Lutz Rissing and Marc Christopher Wurz. Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications // Open access sensors. – 2015. – P. 28665-28689
 12. Magnetic Domain Analysis of GMR Spin Valves with CoFe Electrodes via Magnetic Force Microscopy / J. Dise, R. Schmidt, J. Wu, R. Stearrett // Center Spintronics and Biodetection Team. Am. Phys. Soc. - 2013. – V. 1. – P. 14003.
 13. Shamsutdinov N.R. The effect of Cu interlayers on grain size and stress in sputtered Fe-Cu multilayered thin films / N.R. Shamsutdinov, A.J. Bottger, F.D. Tichelaar // Scripta Mater. – 2006. – V. 54. – P.1727 – 1732.
 14. Synthesis and magnetic properties of iron nanoparticles confined in highly ordered mesoporous carbons/ Tai-Ming Zhang, Dong-Lin Zhao, Li Yin [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – V.508, № 1. – P. 147 – 151.
 15. Xia Zhan Synthesis and magnetic properties of Cu-coated Fe composite nanoparticles/ Xia Zhang, Baosheng Wang, Xinxin Xu// Appl. Surf. Sci. – 2010. – V.256, № 13. – P. 4109 – 4113.
 16. Amyn S. Teja Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles/ Amyn S. Teja, Pei-Yoong Koh// Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 2009. – V.55, №1-2. – P.22 – 45.
 17. Dimitrova Thin film integrated AMR sensor for linear position measurements / P. Dimitrova, S. Andreev, L. Popova // Sensors and Actuators A. – 2008. – V. 147. – P. 387 – 390.
 18. Фізичні основи спітроніки: навч. посібн. / О.І. Товстолиткін, М.О.Боровий, В.В. Курилюк та ін.. // Вінниця: Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
 19. Vector magnetisation measurements on thermally evaporated CoCr multilayers and solid solutions for spintronic applications / Chiolerio A., Martino P., Coisson M. et. al. // J. Mag. Magn. Mat. – 2009. – V.321. – P.3099 – 3103.
 20. Kondrakhova D.M. Thin film systems based on Co and Cr or Cu: magnetoresistive properties and application / Kondrakhova D.M., Pazukha I.M.,

- Protsenko I.Yu. // *Universal J. Phys. and Appl.* – 2014. – V. 2, № 2. – P. 85 – 89.
21. Annealing behavior of structural and magnetic properties of evaporated Co thin films / I. Cheshko, M. Jergel, Y. Halahovets, et al. // *J.Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – V.42. – P.135406– 135414.
22. Бараночников М.Л. Мікромагнітоелектроніка. Т. 1./М.Л. Бараночників. - М.: ДМК Прес, 2001. - 544 с.
23. Говорун Т.П. Електрофізичні властивості нанокристалічних плівок кобальту із покриттям Ni або SiO₂ / Т.П. Говорун, Л.В. Дехтярук, А.М. Черноус // *Металлофіз. новейшие технол.* - 2007. - Т. 29, № 11. - С. 1479 1493.
24. Temperature dependence of exchange anisotropy in monodisperse cobalt nanoparticles with a cobalt oxide shell / M. Spasova, U. Wiedwald, M. Farle et al. // *J. Mag.Mag. Mater.* – 2004. – V. 272–276, № 2. – P. 1508-1509.
25. Exchange bias in nanostructures / J. Nogués, J. Sort, V. Langlais et al. // *Phys. Rep.* – 2005. - V. 422. - P.65-117.
26. Bakonyi I. Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): progress and problems / I. Bakonyi, L. Peter // *Prog. Mater Sci.* – 2010. – V. 55. – P. 107– 245.
27. 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.
28. Лобода В. Б. Сучасні методи дослідження речовини. Спеціальний фізичний практикум: навч. посіб. / В. Б. Лобода, В. С. Іваній, Ю. О. Шкурдода; за заг. ред. В. Б. Лободи. – Суми : Університетська книга, 2010. – 259 с.
29. Структура та магніторезистивні властивості тришарових плівкових систем CoNi/Ag(Cu)/FeNi / В. Б. Лобода, В. О. Кравченко, Ю. О. Шкурдода // *Журнал нано- та електронної фізики.* – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 21–27.
30. Псевдоспін-вентильні структури: принципи формування, магнітні та магніторезистивні властивості / І. М. Пазуха, С. І. Проценко, І. В. Чешко, Ю. О. Шкурдода; за заг. ред. проф. С. І. Проценка та доц. І. М. Пазухи – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 158 с.