

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

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ПЛІВКОВІ НАНОСТРУКТУРИ З ЕФЕКТАМИ ГІГАНТСЬКОГО ТА
АНІЗОТРОПНОГО МАГНІТООПОРУ ЯК ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ
СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

Студент гр. ЕП - 61

А.О. Смірнов

Науковий керівник

к-т фіз.-мат. наук, доцент

І.О. Шпетний

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми – 2020

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження дипломної роботи є фізичні процеси та явища в плівках, що використовуються як чутливі елементи сенсорної електроніки.

Мета роботи полягає у вивченні особливостей структурного стану та фізичних властивостей плівкових наноструктур, що характеризуються ефектами гігантського та анізотропного магнітоопору та застосовуються як чутливі елементи сенсорної електроніки.

Під час виконання роботи використовували методи термічного випаровування і методику дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків на автоматичному вимірювальному комплексі.

Звіт з кваліфікаційної роботи бакалавра складається з трьох розділів. У першому розділі було розглянуто різні класифікації наноматеріалів: за геометричним принципом будови, за видом просторової кристалічної решітки, за атомною структурою і хімічним складом. Також розглянули фізичні принципи гігантського та анізотропного магнітоопору у плівкових системах. Розглянуто виробничий процес для створення магніторезистивних датчиків. У другому розділі було освоєно методику отримання плівкових магнітних структур методом термічного випаровування у вакуумі також була освоєно дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків. У третьому розділі було проаналізовано результати дослідження магніторезистивних властивостей одношарових та тришарових плівкових системах на основі Fe, Ni і Cu у свіжосконденсованому стані та після проведення термообробки

Робота викладена на 37 сторінках, зокрема, містить 18 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 19 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНІЗОТРОПНИЙ, ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИЙ ЕФЕКТ, НАНОМАТЕРІАЛИ, МАГНІТООПОР, ДАТЧИКИ, ГЕОМЕТРІЯ ВИМІРЮВАННЯ.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПЛІВКОВІ НАНОСТРУКТУРИ ЯК ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	5
1.1. Основні типи наноматеріалів.....	5
1.2. Анізотропний магніторезистивний ефект у тонких плівках.....	9
1.3. Ефект гігантського магнітоопору у плівкових матеріалах.....	12
1.4. Сучасні розробки магніторезистивних сенсорів.....	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	22
2.1. Методика отримання плівок методом конденсації у вакуумі.....	22
2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів.....	24
РОЗДІЛ 3. МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ У ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ	28
3.1. Магніторезистивні властивості в одношарових плівках.....	28
3.2. Магніторезистивні властивості в тришарових плівках.....	29
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

ВСТУП

Вивчення і опрацювання в області магніторезистивних датчиків зіграли вагомую роль в останні десятиліття років. Це призвело до того що чутливі складові сенсорної електроніки стали виготовляти на наноматеріалах, прилади на їх базі стали набагато менші це призвело на їх великий попит. Прогрес наноелектроніки пов'язаний з пошуком нових наноматеріалів, що мають оригінальні фізичні якості, обумовлені квантовими ефектами.

Останнім часом активно вивчаються складові структури наноелементів на основі різних матеріалів наприклад як кремній що може бути змінений сполученими полімерами, на їх базі формуються електричні, оптичні, сенсорні системи з метою граничного застосування квантових ефектів і значущою питомою площею. Взаємодія складових структур мікрочастинок має можливість привести до різниці їх якостей від тих, які властиві окремим компонентам структури. Останні досягнення в технології отримання електропровідних полімерів і нанокompatитів, в яких з'єднані системи напівпровідник полімерна плівка, а ще дослідження їх сенсорних якостей роблять посилення формування на їх базі делікатних плівок, що виконують функцію чутливої речовини в сенсорних приладах. Передбачається, власне що впровадження композитів має можливість сприяти збільшенню чутливості з'єднанням, селективності і міцності плівкових датчиків.

Мета роботи полягає у вивченні магніторезистивних ефектів у магнітних плівкових матеріалах та аналізі сфер застосування магнітних наноструктур як чутливих елементів сенсорної електроніки.

РОЗДІЛ 1. ПЛІВКОВІ НАНОСТРУКТУРИ ЯК ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Основні типи наноматеріалів

Наноматеріали (НМ) – це масивні або дисперсні матеріали (елементи структури – кластери, кристаліти, блоки, зерна), кристалічно геометричні розміри, які хоча б в одному із виміру не перевищували 100 нм і мали нові якісні властивості, експлуатаційні й функціональні характеристики, які проявляються внаслідок того, що частинка має нано розмір. У початковому стані та після проведення певного оброблення, речовини можуть мати не однакову ступінь дисперсності. Частинки за розміром від 1 до 100 нм вважають об'єктами наноматеріалів. У наноматеріалах з'являються нові властивості завдяки їхньому дуже малому розміру [1]. У табл. 1.1 наведено залежність речовини від ступеня дисперсності.

Таблиця 1.1 – Залежність речовини від ступеня дисперсності [1]

Стан речовини	Подрібненість речовини	Ступінь дисперсності, см^{-1}	Число атомів у частинці, шт.
Макроскопічний	Грубодисперсна	$10^0 - 10^2$	$>10^{18}$
	Засіб спостереження: неозброєне око		
Мікроскопічний	Тонкодисперсна	$10^2 - 10^5$	$>10^9$
	Засіб спостереження: оптичний мікроскоп		
Колоїдний	Ультрадисперсна	$10^5 - 10^7$	$10^9 - 10^{12}$
	Засіб спостереження: ультрамікроскоп та сканувальний		
Молекулярний, атомний іонний	Молекулярна, атомна та іонна	$>10^7$	$<10^2$
	Засіб спостереження: мікроскоп з високою роздільною здатністю ($< 0,1$ нм) і сканувальний		

Нанооб'єкти – це система з багатьох компонентів, які діляться на: нанокристал, нанофаза, наносистема, наноструктура, нанокомпозити і т. д. Але

всі найпростіші нанооб'єкти поділяються на два класи – це суцільні (зовнішні) та прості (внутрішні). Суцільні їх класифікують за розмірністю: 1) Тривимірні (3D) вони називаються нанокластерами; 2) Двовірні (2D) – структура з наноплівки; 3) Одновимірні (1D) складаються з нанониток; 4) Нульвимірні (0D) наноточки. У табл. 1.2 наведені види наноматеріалів за геометричним принципом.

Таблиця 1.2 – Види наноматеріалів за геометричним принципом [2]

Характеристики об'єкта	Мірність матеріалу з позиції наноскопічних вимірювань	Мірність матеріалу з позиції макроскопічних вимірювань	Приклади матеріалів
Усі три розміри менше ніж 100 нм	3 – вимірний	0 – мірний	Атомні кластери, квантові точки
Два розміри менші ніж 100 нм	2 – вимірний	1 – мірний	Нанотрубки, нановолокна, квантові дроти
Один розмір менше ніж 100 нм	1 – мірний	2 – вимірний	Наношарові покриття, наноями
Усі три розміри більші ніж 100 нм	0 – мірний	3 – вимірний	Нанокристалічні покриття, Об'ємні матеріали з розміром зерна, нанокompозити

Наноструктури які відносяться до 0D являють собою ізольовані одна від одної системи наночастинок. Структура 1D характеризується наявністю контактів які з'єднують наноблоки в одному напрямку. Розмір блоків в такому випадку не має значення вони можуть складатися з нескінченних шарів нанометрової товщини (наноплівки), або частинок нанометрових розмірів, але при цьому не будучи з'єднаними. 2D наноструктури характеризуються присутністю наноконтактів у двох вимірах. Наприклад, у побудуванні одношарової плівки з наноблоків які розорієнтовані. 3D наноструктурами називаються такі структури у яких наночастинок з'єднуються між собою у

трьох вимірах. Така класифікація надає змогу для того щоб уявити структурний аналіз нанокристалічних матеріалів, характеристику їх зв'язку, орієнтаційні співвідношення типу та структури границь. Діапазон розмірів від 1 до 100 нм був вибраний завдяки існуванню ряду розмірних ефектів, які збігалися з розмірами кристалів що мали характерні розмірами фізичних явищ. Нижня межа симетрії пов'язана з нижньою межею матеріалу, який складається з нанокристалів. Згідно з даними для найбільш широковідомих кристалів з ґратками ОЦК та ГЦК, цей критичний розмір дорівнює трьом сферам координації, що становить приблизно 0,5 нм для заліза та близько 0,6 нм для нікелю. Розмір верхньої межі пояснюється тим, що, з технічної точки зору, зміни фізичних та механічних властивостей матеріалів при розмірі що нижче 100 нм. На рис. 1.1 наведенні просторові кристалічні решітки і елементарна комірка простої кубічної решітки (ґратки).

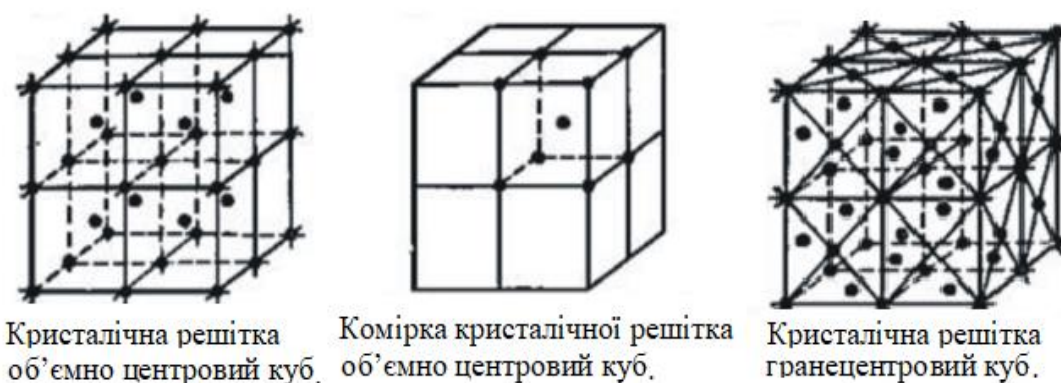
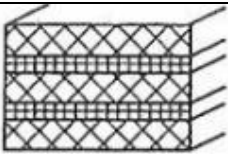
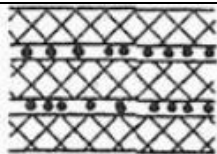
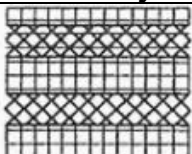
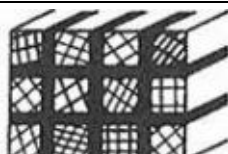
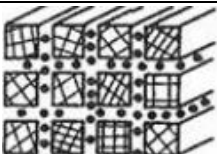


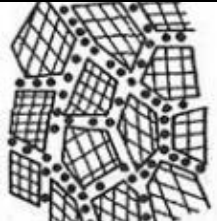
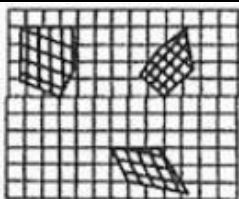


Рисунок 1.1 – Просторові кристалічні решітки і елементарна комірка простої кубічної решітки (ґратки) [2]

Наноматеріали розділили на три категорії. Таке рішення було запропоноване Г. Глейтером [3]. Перша включає в себе матеріали які мають вигляд нанорозмірних частинок, тонких плівок та волокон, що ізольовані або уведенні в матрицю. Друга категорія - це матеріали з наноструктурою, що обмежена тонкою поверхнею шару на масивному матеріалі. Наноматеріали третьої категорії включають в себе наноструктурні масивні матеріали які ділять на два класи. Перший клас - це матеріали, у яких міняється хімічний склад або

атомна структура у самому матеріалі на атомному рівні. Другий клас – це матеріали, які складаються з наноблоків або, як прийнято їх називати кристалами, ці кристали різняться атомною структурою, орієнтацією кристалографічної решітки, хімічний склад, областю між кристалами. Такі матеріали є структурно неоднорідними від матеріалу першого складу які мають однорідну структуру. За границями розділу, розмірами кристалічної решітки та її формами, хімічним або атомним складом все це може відрізнятися ці відмінності значно впливають на структуру наноматеріалів це наведено у (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Класифікація наноматеріалів за атомною структурою і хімічним складом [2]

Форма кристалів	Склад різних кристалів	Склад різних границь і кристалітів	Кристали дисперговані у матрицю різного складу
Шарувата			
Волокниста			
Рівновісна			

Кристалічна решітка в наноструктурних матеріалах розділяються на шарувату форму волокнисту та рівновісну в яких діаметр товщини шару волокна досягає до 100 нм. Кристали за хімічним складом ділять на чотири групи наноматеріалів. До першої групи та найпростішої через однаковий хімічний склад кристалів відносять чисті метали або полікристалічні полімери. Друга група представляє собою наноматеріали, що мають у своїй структурі

кристали з різним хімічним складом це можуть бути структури на багатошаровій основі. У третій групі матеріали в яких різна границя розділу зерен та хімічний склад. В четверту групу входять дисперсні сплави – це матеріали в яких відділення мають нано-розмір. Наприклад, тонкі шари або волокна з кристалів. Такий погляд на наноматеріали дає нам змогу краще зрозуміти та уявити що таке нанокристали та які можливості вони в собі мають.

1.2. Анізотропний магніторезистивний ефект у тонких плівках

Анізотропний магніторезистивний ефект (АМО) вперше був описаний у 1857 році Вільямом Томсоном [5]. Томсон зауважив, що питомий опір ферромагнітних матеріалів залежить від кута між напрям електричного струму та орієнтацією намагніченості поля. Перші технічні додатки цього ефекту були введені через 100 років, як теоретичні та практичні передумови для отримання реалізації тонкоплівкових АМО датчиків. У наступні роки сенсори АМО в основному використовувались як головки для зчитування інформації з магнітного жорсткого диска. Завдяки простоті конструкції, низькій вартості, надійності та стійкості до температури вони були впроваджені в широкий спектр промислових застосувань, включаючи автомобільну, побутову електроніку або біотехнології. В автомобільних та побутових електронних додатках ці магніторезистивні датчики використовуються для визначення швидкості та кута, а також для зондування магнітного поля Землі.

Ефект АМО проявляється в переході струму через металевий зразок в якому спостерігається зміна питомого опору, коли магнітне поле прикладене на зразок який є провідником струму. Ця спрямована залежність магнітних властивостей матеріалу виражена магнітною анізотропією. На атомному рівні виникає ефект АМО його можливо пояснити як наслідок характерної структурної зони в ферромагнітних металах. У цих металах третій діапазон не заповнена до кінця в такому разі четвертий діапазон електронів буде розсіяна на третій діапазонна при застосуванні магнітного поля. Анізотропію

магнітоопору можливо пояснити асиметрією орбіт електронів, які призводять до різного перерізу розсіювання провідних електронів, що рухаються або паралельно, або перпендикулярно напрямку намагнічування. Асиметрія електронних орбіт призводить до наслідку спін-обертowego зв'язку. Можна виділити декілька видів магнітної анізотропії [4]:

- магнітокристалічна анізотропія залежить від властивостей кристалічної структури зразка;
- формова анізотропія має залежність від магнітних властивостей від зовнішніх форм зразка;
- магнітоеластична анізотропія залежить від напруги що викликає зміну магнітних властивостей;
- змінна анізотропія є результатом взаємодії між антиферомагнітними та феромагнітними матеріалами;

Процеси дифузії, фазоутворення, розсіювання електронів впливають на фізичні характеристики чутливих плівкових елементів сенсорних систем. Обробка зразків впливає на їх індивідуальність при утворенні шарів, що змінює магніторезистивні властивості плівки та розсіювання електронів в структурах цієї плівки. Механізми виникнення магнітної анізотропії в феромагнітних плівках одного шару можуть мати конденсаційне або термічно стимульоване походження. Ці механізми характеризуються амплітудою і кутовою дисперсією. У полікристалічних плівках проявляється локальна анізотропія, що спрощує собою анізотропією мікронапружень. Одношарові плівки відрізняються від багатошарових плівок тим, що виявляють анізотропію магнітних властивостей перехідних шарів, плівкових або твердих розчинів і гранульованих сплавів.

Завдяки своїй смуговій структурі всі феромагнітні матеріали мають сильну внутрішню намагніченість. Однак це намагнічування лише однорідне, воно спрямоване в невеликих обмежених обсягах так звані магнітні домени. У полікристалічному насипному матеріалі намагніченість цих доменів відбувається випадковим чином, що розподілений у всіх просторових

напрявках. У феромагнітної тонкої плівки товщина плівки невелика в порівнянні з площинним обсягом областей. Завдяки такій формі анізотропії коефіцієнт демагнетизації, перпендикулярний площині плівки, сильно підвищений, і внутрішню намагніченість можна вважати орієнтованою в площині плівки. Заміна магніто резистентності може трактуватися як двомірна проблема яка спостерігається в датчиках АМО. Розглядаючи систему координат тонкої плівки що зображена на (рис. 1.2), можемо зрозуміти, що питомий опір може бути змінений.

$$p = \begin{bmatrix} p_{\parallel} & 0 \\ 0 & p_{\perp} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

де p – питомий опір зразка;

p_{\parallel} – паралельний питомий опір зразка;

p_{\perp} – перпендикулярний питомий опір зразка.

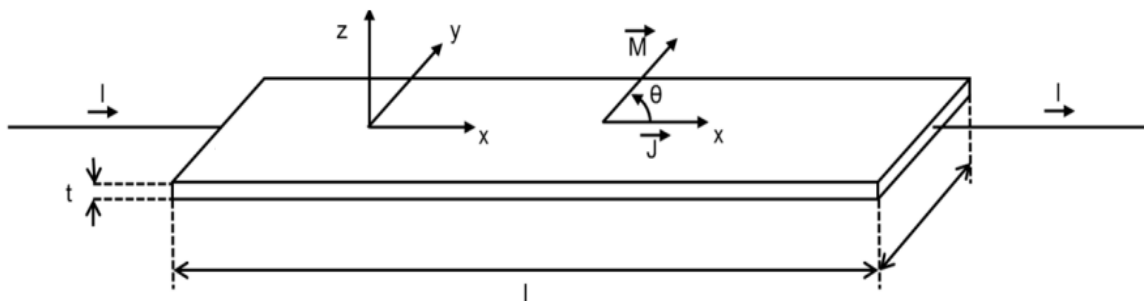


Рисунок 1.2 – схема елемента тонкої плівки [6]

Як наслідок, зміна опору зразка тонкої плівки залежить виключно від кута між напрямком орієнтації електричного струму та його внутрішньої намагніченості. Зміну опору у провіднику можна описати наступною формулою, де p_{\parallel} при $\theta = 0^\circ$ і p_{\perp} при $\theta = 90^\circ$.

$$p(\theta) = p_{\perp} + (p_{\parallel} - p_{\perp})\cos^2\theta = p_{\perp} + \Delta p \cos^2\theta \quad (1.2)$$

де $p(\theta)$ – питомий опір (θ – кут між напрямком електричного струму);

ρ_{\perp} – перпендикулярний питомий опір зразка;

ρ_{\parallel} – паралельний питомий опір зразка;

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

Співвідношення $\Delta\rho / \rho_{\parallel}$ називається коефіцієнтом магніторезистентності та використовується для оцінки коефіцієнта корисної дії магніторезистивного пристрою. При кімнатній температурі магніторезистивний коефіцієнта корисної дії складає декілька відсотків для сплавів NiFe [7].

1.3. Ефект гігантського магнітоопору у плівкових матеріалах

Гігантський магніторезистивний ефект (ГМО) був виявлений у 1988 р. У багатошарових структурах феромагнітної та неферомагнітної тонкої плівки [8]. Ефект ГМО спостерігався при зміні електричного опору у багатошаровому стеку, де феромагнітні шари були з'єднані за допомогою між шарового обмінного зв'язку через немагнітний металевий шар. При вирівнюванні напрямів намагнічення феромагнітних шарів від початкового не паралельного стану до паралельної конфігурації, застосовують зовнішнє магнітне поле, при цьому електричний опір шарів зменшився це наведено на (рис.1.3).

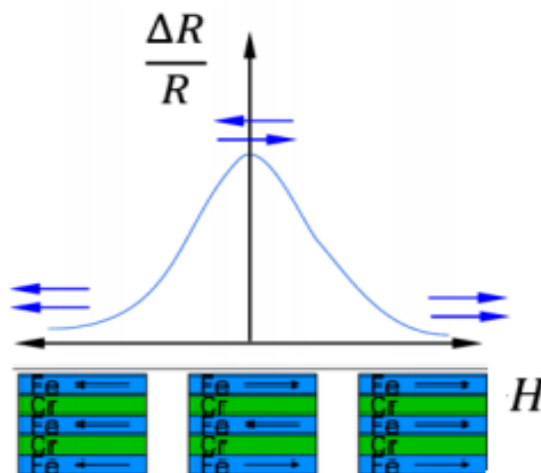


Рисунок 1.3 – Антипаралельні та паралельні вирівнювальні шари з відповідною залежністю опору [8]

Гігантський магніторезистивний ефект пов'язаний на фізичних механізмах спін залежних розсіювань електронів завдяки додавання домішок в зразок наприклад таких як Cr. Розсіювання електронів залежить від того як буде орієнтований спін від магнітного моменту атомів зразку. Електронна провідність майже не взаємодіє з атомами що мають паралельний напрямок відносно у який напрям буде направлений їх спін. Причиною зміни електричного опору є спінова залежність транспорту електронів, яка впливає на швидкість розсіювання на плівкових інтерфейсах для спін – вгору та спін – вниз. Якщо у плівки середній вільний шлях електронів менший, вони рухаються через усі шари. У таких провідниках, які мають добру провідність, наприклад, як золото або мідь, ступінь Фермі розташовується зсередини гібридизованої sp – зони. У такому разі d – зона повністю заповнена. У ферромагнітних провідників інша структура ця структура складається з s – і d – зон, які перекриваються якщо рівень енергії перевищить енергії Фермі. При взаємодії обміну у металах ферромагнетиків d – зона розщеплюється із протилежно спрямованим спіном електронів з цього слідує що щільність спінів угору та спінів униз буде відрізнятися це показано на (рис.1.4).

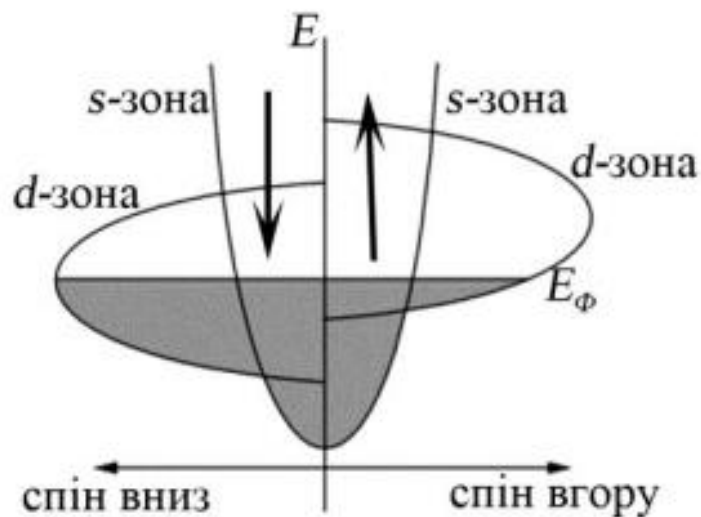


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення щільності електронів при різній орієнтації спінів [8]

Явище ефекту ГМО відрізняється від АМО у феромагнітних матеріалах як кількісних, так і якісних характеристик. По-перше, ГМО є ізотропним незалежно від кута між магнітним полем і електричним струмом. По-друге, опір зменшується помітно, коли намагніченість насичується, тому ознака магнітоопору негативна. А типова крива ГМО та відповідна крива намагніченості показані на (рис. 1.5). Величину ГМО зазвичай визначають як коефіцієнт магнітного опору і подається як:

$$\Delta p / p = (p - p_s) / p_s \quad (1.1)$$

де $\Delta p / p$ – коефіцієнт магнітного опору;

p – максимальний опір навколо нульового магнітного поля;

p_s – опір коли намагніченість насичена.

Зауважимо, що в деяких випадках відбувається зміна опору ($\Delta p = p - p_s$) це співвідношення ділиться на p , що призводить до великої різниці у співвідношенні магнітного опору. Крім того, крива магнітного опору, що показує ГМО, іноді містить внесок ефекту АМО та спостерігається різниця між p_l та p_t . Однак у порівнянні із загальною зміною опір, ефект АМО досить малий і його часто можна ігнорувати. З моменту виявлення ГМО у над решітках Fe, Cr у 1988 р. [1], повідомлялося про різні над решітки. Над решітка – це тонка плівка, що складається з двох або більше різних матеріалів, які по черзі осаджуються в нанометровій шкалі за допомогою підготовки тонкої плівки такими методами, як епітаксія молекулярного променя та розпилення. Усі надрешітки з будь-якою комбінацією феромагнетиків та антиферомагнетиків не виявляють ефект ГМО. У табл.1.4 наведені різні види надрешіток у яких спостерігається ефект ГМО.

Для реалізації ГМО повинні бути реалізовані вимоги. Одна з вимог – антиферомагнітна взаємодія між шарами феромагнетиків через шар антиферомагнетика, що веде до антипаралельного вирівнювання векторів намагніченості в сусідніх шарах при нульовому магнітному полі.

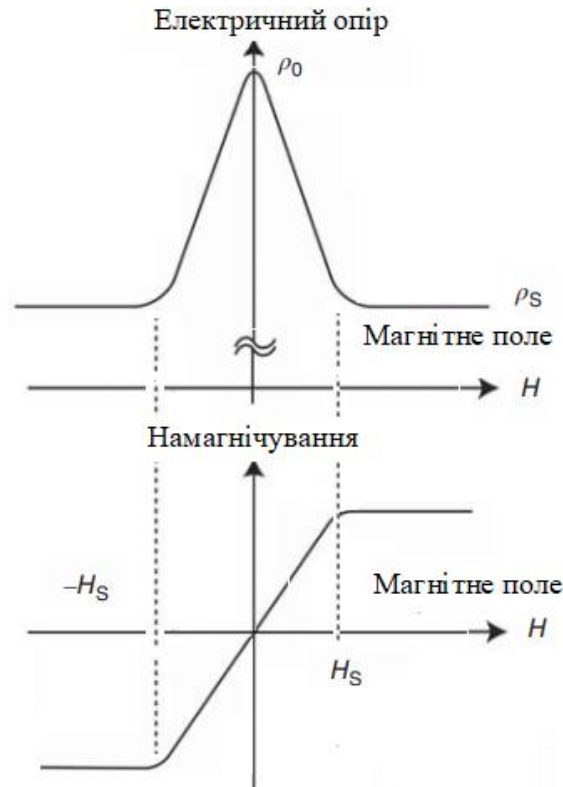


Рисунок 1.5 – Типова крива магнітного опору та крива намагніченості над решітки, що показує ефект ГМО [9]

Таблиця 1.4 – Ефект ГМО в різних видах над решіток [10]

Над решітки	$\Delta\rho/\rho(\%)$ $= (\rho_0 - \rho_s)/\rho_s$	Температура (К)
[Fe (30)/Cr (9)] $\times 30$	85	4.2
[Fe (4.5)/Cr (12)] $\times 50$	220	1.5
	33	300
[Fe (20)/Cr (12)] $\times 20$	33	4.5
[Co (15)/Cu (9)] $\times 30$	78	4.2
	48	300
[(Co (8)/Cu (8.3)] $\times 60$	115	4.2
	65	295
[Fe (10.7)/Cu (13.7)] $\times 15$	26	4.2
	13	-
[Co (6)/Ag (25)] $\times 70$	38	77
	16	-
[Ni (8)/Ag (11)] $\times 20$	26	4.2
[Ni ₈₁ Fe ₁₉ (15)/Cu (8)] $\times 14$	25	4.2
	16	300

Коли магнітне поле застосовується і збільшується, вирівнювання намагніченості перетворюється на паралельне, що зменшує опір, тобто з'явлення ефекту ГМО. Магніторезистивне співвідношення більше на 10% при кімнатній температурі, і досягає від кількох десятків до понад 100% при низькій температурі. ГМО у металевих над решітках обумовлений спін-залежним розсіюванням електронів провідності на межі розділу. Цей ефект сильно залежить від стану інтерфейсу, а ГМО дуже чутливий до структури. Тому ГМО визначається не лише комбінацією металевих елементів. Взагалі можна сказати, що над решітки на основі Fe і Cr на Co і Cu демонструють найбільший ГМО. Крім того, ГМО зазвичай знижується з температурою. На рис.1.5 зображено схематична ілюстрація провідності електронів.

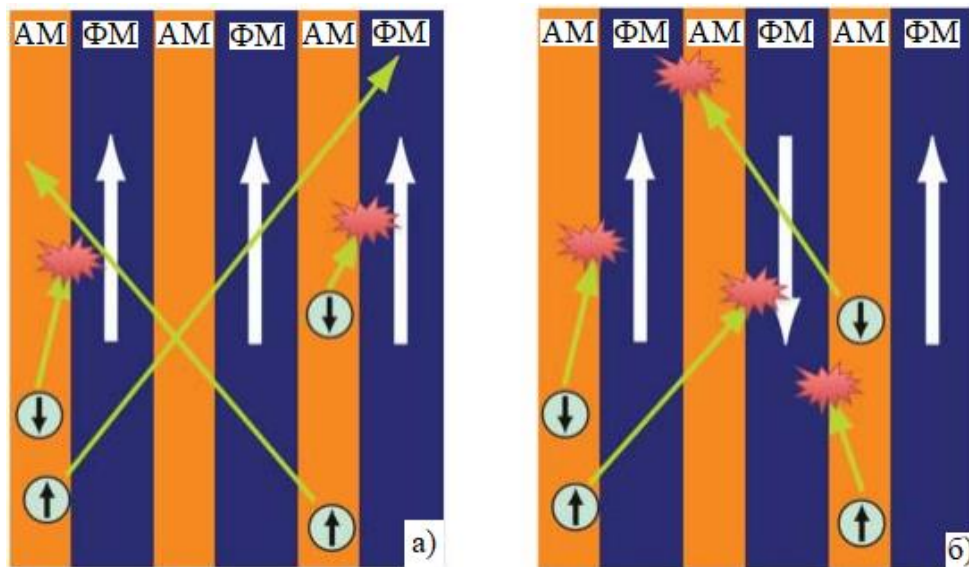


Рисунок 1.6 – Провідність електронів у надрешітці з альтернативно складеним феромагнітним металом та немагнітним металом, а) паралельне, б) антипаралельне вирівнювання векторів намагніченості [11]

Механізм ГМО походить як спін-залежне розсіювання електронів провідності зразка. Спін-залежне розсіювання відбувається в феромагнетних шарах або на інтерфейсах феромагнетиків та антиферомагнетиків. Ми розглянемо модель двох струмів, де проходять електрони верхнього та нижнього спіна це два незалежні канали, не враховуючи спричинення, що відбувається зміна орієнтації спіну. Вірогідність розсіювання електронів

провідності залежить від орієнтування спіна паралельне воно чи антипаралельне намагніченості, це називається спін-залежним розсіюванням. Електричний опір спінів, паралельних та антипаралельних до намагніченість записується як ρ_+ (ρ_-). Взагалі $\rho_+ \neq \rho_-$, і тут ми припускаємо що $\rho_+ < \rho_-$. Іншими словами, електрони зі спінами, паралельними намагніченості, мають низьке розсіювання в той час, як електрони зі спінами антипаралельно намагніченості мають високий рівень розсіювання. Навіть якщо ми припустимо протилежне співвідношення, тобто $\rho_+ > \rho_-$, таке співвідношення не призведе до великих змін.

При цьому електрони не залишаються в одному шарі під час провідності навіть при подачі електричного струму в площині. Якщо вектори намагніченості сусідніх феромагнітних шарів паралельні, то електрони зі спіном угору, паралельні намагніченості майже не розсіюються, що сприяє домінанті провідності, що веде до низького електричного опору. З іншого боку, якщо намагніченість векторів є антипаралельними, то спін угору та спін униз повинні проходити через шари з протилежними векторами намагнічування і значно розсіюватись, що призводить до високого електричного опору.

1.4. Сучасні розробки магніторезистивних сенсорів

Сенсорні пристрої були розроблені, вивчені та впроваджені впродовж останніх двох десятиліть. Інноваційний сенсорний пристрій на основі ефекту АМО був опублікований у 1999 році [11]. Цей пристрій складався з двох елементів з'єднаних паралельно, він служив для вимірювання температури з пшеничного каменю для уникнення перегріву. Крім того, чутливі елементи відрізнялися високим ступенем анізотропії, що забезпечує стійкий стан магнітних доменів, тим самим забезпечує дуже високе співвідношення сигналу від шуму. Перші дослідження з виготовлення гігантських магніторезистивних тонких плівок розпочалися наприкінці 90-х і призвело до розробки технологічних процесів для реалізації багатошарових спінових клапанів ГМО

що складається з Cr, CrMnPt, NiFe, Cu, NiFe стека тонкої плівки. Зразковий сенсорний пристрій, з багатошаровою структурою був представлена у 2007 році [11]. Цей пристрій складався з чотирьох єдиних елементів ГМО в мосту пшеничного каменю, який використовувався для визначення сенсорних характеристик.

Виходячи з цих даних можемо сказати, що поточні дослідження зосередженні на продовженні вивчення магніторезистивних датчиків. Успіхи системної інтеграції сенсорів АМО охоплюють такі основні програми які дозволяють вимірювати магнітне поле Землі та практичні завдання на зразок датчика мереж, встановлених для контролю руху або виявлення стоянок на відкритому просторі. Застосування ефекту АМО у біомедицині, використовуються шари SiO_2 розміром 100 нм, які утворювали згорнуту структуру і могли використовуватися для сортування та моніторингу поодинокі клітини, які були магнітна марковані наночастинками Fe_3O_4 . Іншим аспектом сучасних досліджень є включення магніторезистивних датчиків для областей де застосовуються конструкції з обмеженим простором. У рамках цього аспекту докладаються зусилля щодо реалізування датчика МО на гнучких підкладках, що дозволяють встановлювати на кривих поверхнях, а також на реалізацію дуже тонких, гнучких пристроїв. Аналогічно, оптимізація магніторезистивних датчиків стосовно функціональної спроможності у суворих умовах є ще одним питанням на шляху пошуку нових можливостей для застосування магніторезистивних датчиків.

Сфера гнучкої електроніки – це перспективний ринок що зростає кожної години. Гнучка електроніка виготовляється за низькою вартістю і відрізняються від інших високою механічністю. Використовуються у гнучких платах, тонко плівкових сонячних батареї, транзисторах та в інших приладах. При покритті гнучких полімерів металами шорсткість поверхні полімеру впливатиме на мікроструктуру металевого шару. Крім того, напруга буде спричинена металевими покриттями на полімерах внаслідок двох головних факторів: швидке розсіювання електронів може спричинити перегрів системи та

з'явлення внутрішнього напруження через те, що кристалографічні дефекти утворюються в шарах протягом осадження плівки на підкладку. Це добре впливає на магнітні показники. Технічні проблеми, спричинені взаємодією металевих тонких плівок з їх підкладками це найбільш проявляється при створенні ефекту АМО. Основний недолік виник від перегріву, який з'явився в поліїміді. Група Шмідта з Дрезденського університету спеціалізується на гнучких датчиках ГМО. Вони підвищили продуктивність ГМО внаслідок зниження рівня шорсткості поверхні поліїмиду. Вони розробили пасту яка була створена з кульок зі стеку ГМО. Паста наноситься за допомогою фарбування і може створити ефект ГМО, коли піддаються впливу магнітного поля. Ця концепція може призвести до друку ГМО-датчиків. Зовсім недавно вони представили концепцію використання трансферного друку: кремнієвий носій покритий жертвним шаром, на який наносяться елементи ГМО, і попередньо натягнутою смужкою полідиметилсилоксан (ПДМС), потім наноситься на цей шар ГМО. Коли ця смуга від'єднана від кремнію датчик ГМО переноситься на ПДМС, демонструючи високу здатність до розтягування без тріщини функціональних шарів. Виробничий процес для створення магніторезистивних датчиків наведений на (рис. 1.7) був розроблений в Інституті технології мікроелектроніки.

У цьому процесі світлочутливий поліамідний шар нанесений на кремнієву підкладку товщиною 300 нм. Отвори для контактних накладок розташовуються в поліаміді та впаюються при температурі 350°C. Шари магніторезистивного датчика наносяться на твердосплавний поліїмід що теж має тверду структуру. Після цього тильна сторона кремнію частково видаляється в процесі глибокого травлення реактивного іона. Це створює дуже прямі боки в кремнію, виявляючи кремнієву сітку шириною 200 нм. Рама охоплює виготовлені датчики й дозволяє легко відокремитись за допомогою штампувального інструменту.

Моделювання та вимірювання однаково показали неоднорідну деформацію з максимальною деформацією яка виникає у лівому нижньому куті над контактною колодкою, що спричиняє пошкодження гнучкої підкладки. Таким

чином, щоб запобігти пошкодженню датчиків під час процесу поділу. Рухомий аналог було введено для стабілізації гнучких датчиків під час поділу. Після встановлення виробничого процесу конструкція датчика була змінена з метою покращити магніторезистивних характеристик датчика (рис. 1.8).

Вироблені гнучкі датчики АМО характеризуються магнітним потоком, що показує ефект АМО близько 1,6%. На рис.1.7 наведена відносна зміна опору зразка у змінному магнітному полі. В ідеальному випадку зміна опору має бути однаковим для чергування з негативного на позитивне та чергування з позитивний до негативного. Гнучкі датчики АМО пропонують видатні можливості: представлені датчики мають товщину всього 15 нм, що дає можливість застосовувати їх у місцях, які дуже важко доступні. Наприклад, надзвичайно тонкі проміжки повітря. В порівняння, товщина комерційних кремнієвих підкладок становить від 150 до 300 нм. Зменшення ваги йде разом зі зменшенням товщини підкладки і може представляти інтерес для портативної побутової електроніки.

Електромотори набувають все більшого значення за останні кілька років, особливо коли враховуючи зростаючу актуальність електроавтомобілів. Контроль густини магнітного потоку, зазор між ротором і статором електродвигуна має значний вплив на ефективність. Якщо щільність магнітного потоку в повітряному проміжку відома, можна поліпшити контроль і таким чином, збільшити динамічну реакцію та зменшити споживання енергії. Зазори повітря, як правило, мають дуже невеликий, розміром декілька 100 нм для систем середньої вихідної потужності. При створенні датчика магнітного поля з тривимірним вимірюванням на основі ГМО висотою 250 нм стало можливим вимірювання компонентів магнітного потоку в радіальній і осьовий напрямок (рис. 1.9) представляє інтерес для використання в адаптованій системі управління. Цей датчик заснований на спінових клапанах ГМО завдяки їх високій чутливості та лінійності. Слабкі магнітні потоки використовуються для послаблення зовнішнього магнітного потоку у повітряному зазорі. Магнітний потік повинен бути ослаблений у декількох діапазонів до 100 нм.

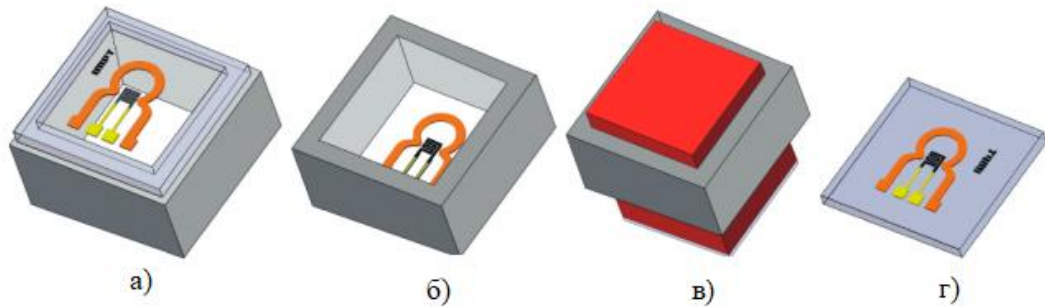


Рисунок 1.7 – Виробничий процес для створення магніторезистивних датчиків: а) датчик розтягується за допомогою кремнієвому каркасу, б) перевертаємо датчик б) за допомогою штампувального інструменту, г) датчик відокремлюється [12]



Рисунок 1.8 – Покращений мікро-датчика а) від першого покоління до б) секунди генерація з більшими кабелями живлення, контактними накладками та зондуванням у формі меандру, площа зі збільшеною кількістю витків [13].



Рисунок 1.9 – Схематичне зображення моторного повітряного зазору із датчиком магнітного поля [14]

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика отримання плівок методом конденсації у вакуумі

У науці є багато методів конденсації плівок у вакуумі, в даному випадку ми розглянемо термічне випаровування у вакуумі. Термічне випарування має найбільш широке застосування в електроніці для створення плівок. Цим методом осаджуються резистивні та металеві плівки, в цьому методі вакуум становить понад $10^{-5} - 10^{-4}$ Торр, схема вакуумного напилення зображена на (рис.2.1). У такому разі середня довжина вільного пробігу молекул які випаровуються з речовини перевищують об'єм у ковпаку, при цьому ці атоми речовини мають рух у всіх напрямках від джерела випромінюються прямолінійно та конденсуються на поверхні, що мають найбільш низьку температуру в тому числі підкладку, на яку осаджуємо плівку.

Підкладка використовується для надійного зчеплення з плівкою та для покращення структури плівки, при випаровуванні матеріалу що розташований в декількох сантиметрів від матеріалу який випаровується. Матеріал який будемо випаровувати, розміщується у випарник який нагрівають струмом поки тиск пари у матеріалу стане більший від тиску вакуумної системи. Самі випарники найбільш виготовляють з міді або вольфраму, тому що вони мають властивості тугоплавких металів. При початку випаровування треба використати заслінку між підкладкою та джерелом випаровування. Перевагою цього методу є простота використання але є і недолік – неможливо випаровувати деякі сполуки матеріалів. Випарники розділяються на два типи – це тигельні та стрічкові. Простотою конструкції та виготовлення виділяються дротові випарники наведенні на (рис. 2.2) виробляються з тугоплавких металів наприклад: тантал, молібден та вольфрам форма яких може відрізнятись. Діаметр дроту повинен бути від 0,5 до 1,5 мм та рівномірним для того щоб уникнути перегрівання. Стрічкові виготовляють у формі тонких стрічок з тугоплавких металів що мають заглиблення для випарників наведенні на (рис. 2.3).

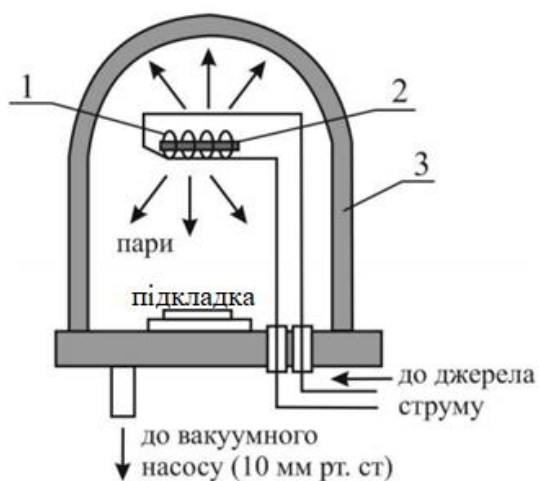


Рисунок 2.1 – Схема вакуумного напилення: 1 – нитка розжарювання; 2 – матеріал що випаровується; 3 – ковпак [15]

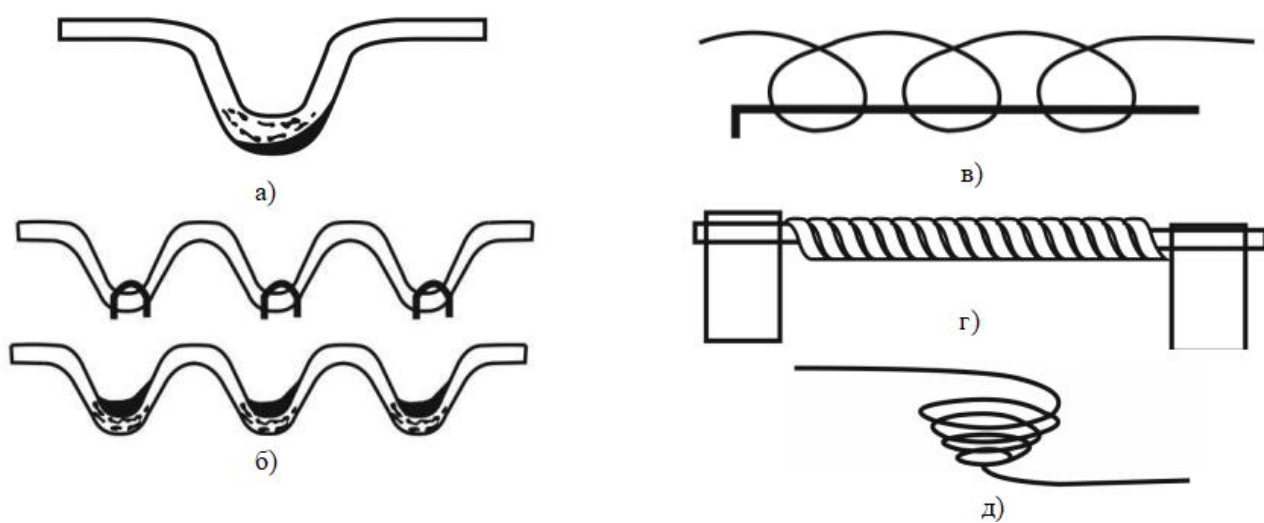


Рисунок 2.2 – Дротові випарники: а) нитка у вигляді шпильки; б) синусоїдальна нитка; в) багатожильна спіраль; г) стрижневий вольфрамовий нагрівач; д) конічна спіраль [15]

Такі випарники є менш економічні через їх ускладнену форму але також мають просту конструкцію. Тигельний випарник за своєю формою нагадує ванну в яку розміщують випарник, такий випарник може бути виготовлений з металу що не буде проводити струм і у такому разі, для того щоб досягти необхідної температури, використовують інший елемент для розігріву матеріалу. Тигельні випарники виготовляються з BeO ($T - 2570\text{ }^\circ\text{C}$), Ta_2O_5 ($T - 1887\text{ }^\circ\text{C}$), графіт – Al_2O_3 , W , Mo , ThO_2 ($T - 3390\text{ }^\circ\text{C}$) [15].

Основний недолік тигельних випарників у тому, що потоки газів змушені проходити через метал що випаровується і через високу температуру, що сконцентрована на стінках тигля, як результат - утворюється зниження фізичних та механічних властивостей покриття.

2.2. Методика дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів

Для того щоб дослідити властивості магніторезистивного зразка потрібно розташувати струм під перпендикулярним кутом до площі зразка, при цьому використовується геометрія у якій розглядаються три взаємно орієнтовані магнітні поля в якому протікає струм з площиною зразка. Магнітне поле повздовжньої геометрії паралельна до площини плівки та струму, а поперечна геометрія магнітного поля паралельне площині зразка та перпендикулярне струму [16]. На рис. 2.4 зображено схема геометрії вимірювання магнітоопору. На ній ми бачимо що при перпендикулярній і поперечний напрям струму перпендикулярний до напруженості магнітного опору, а при повздовжньої геометрії напрям струму сходиться з напрямком напруженості магнітного поля.

Для дослідження магніторезистивного ефекту (МО) використовується програмно апаратний комплекс який створений за чотирьох точковою схемою. Використовується три геометрії вимірювання: поперечна, перпендикулярна, повздовжня.

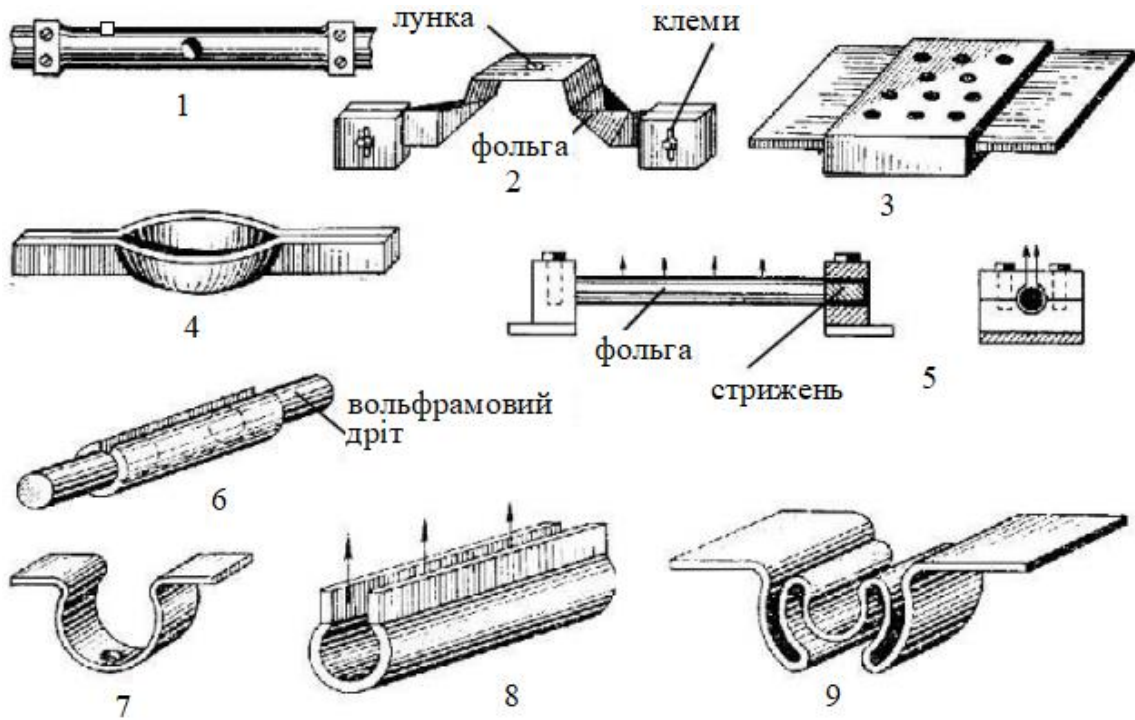


Рисунок 2.3 – Стрічкові випарники: 1,2 і 3 – поверхневі випарники; 4 – човниковий випарник; 5-9 – циліндричні випарники [15]

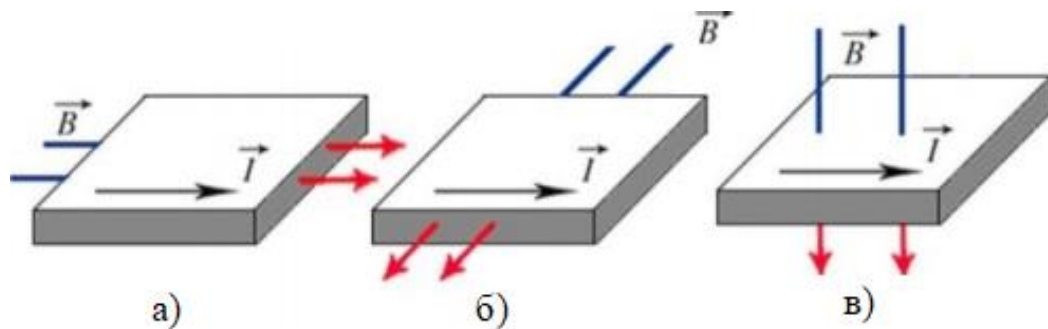


Рисунок 2.4 – схема геометрії вимірювання магнітоопору: а) повздовжньої; б) поперечної; в) перпендикулярної [16]

При цьому зразок треба повернути так, щоб від перпендикулярної та поперечної геометрії зразок був повернутий на потрібний кут. Сама методика описана у роботах [16-17]. Цей комплекс включає в себе: блок живлення (уніполярний), електромагніт, блоку живлення електромагніту Philips PM 2811, 12-ти бітного АЦП-ЦАП NI USB 6008, система реле для того щоб змінювати полярність магнітного поля, модуль повороту зразка та мультиметра для вимірювання електричного опору Keithley 2000 Digital зображений на (рис. 2.5).

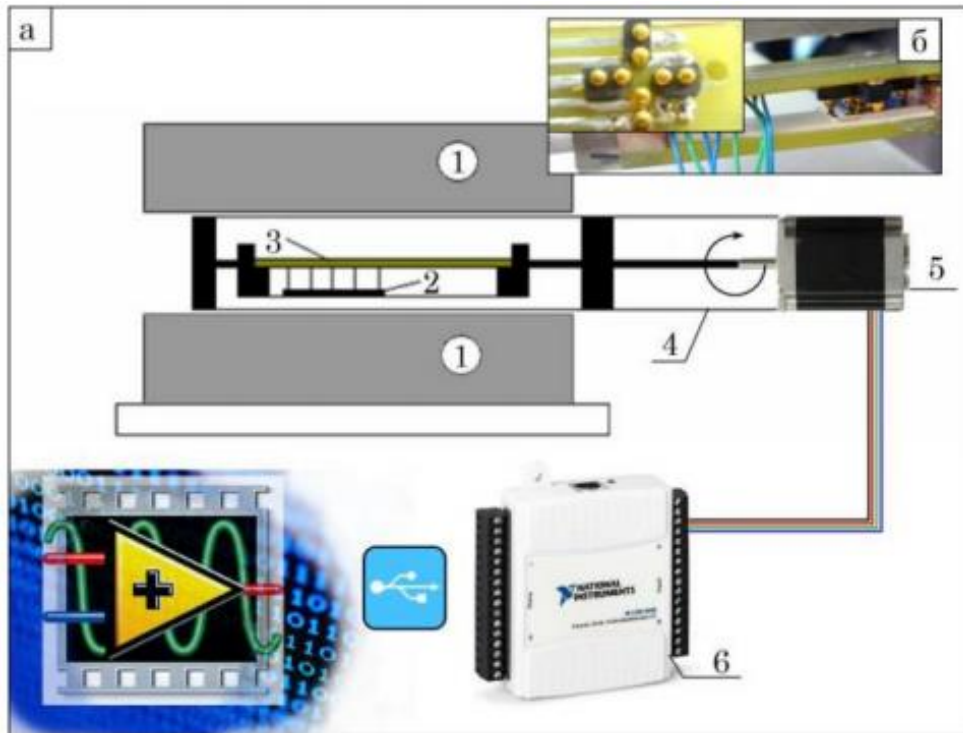


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення комплексу для вимірювання магнітоопору з механізмом повороту зразка (а) та зовнішній вигляд контактів (б): 1 – осердя електромагніту; 2 – зразок; 3 – тримач контактів; 4 – консолі механізму повороту зразка; 5 – кроковий двигун; 6 – модулі збору даних NI USB 6008 [17]

Такий комплекс автоматизований та може самостійно вимірювати зміну магнітного опору у тонких плівках та у різних системах у трьох геометріях вимірювання. Також є можливість повороту зразка в діапазоні кутів $\pm 180^\circ$ з мінімальним кроком 1° у момент вимірювання магнітного опору. Розрахунок магнітного опору відбуваються за формулою:

$$MO = \Delta R/R_B = (R_S - R_S)/R_S \quad (2.1)$$

де MO – магнітоопір;

R_B – опір плівкового зразка в зовнішньому магнітному полі;

R_S – електроопір розмагніченого зразка (в полі коерцитивної сили);

При вимірюванні магнітоопору похибка вимірювання складає 0,002%.

РОЗДІЛ 3. МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ У ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛАХ

3.1. Магніторезистивні властивості в одношарових плівках

Проведемо аналіз результатів дослідження, виконаних авторами [18] по дослідженню магніторезистивних властивостей одношарових та тришарових магнітних плівок. На рис. 3.1 приведені польові залежності магнітоопору у трьох геометріях вимірювання для одношарових плівок та плівок, термооброблених у вакуумі.

Аналіз результатів дослідження дозволяє стверджувати, що у всіх зразках, незалежно від ефективної товщини, спостерігався анізотропний магнітоопір при вимірюванні у поздовжній геометрії вимірювання. У плівках на основі металевих феромагнетиків, які є магнітовпорядкованими речовинами, показує вплив магнітного поля у розсіюванні електронів провідності, що має залежність при спонтанній орієнтації намагніченості. Практичне застосування однорідних магнетиків пов'язується з орієнтацією намагніченості. Через анізотропію магнітоопору у магнітному полі, яке викликало обертання намагніченості, змінило електроопір в зразку. При відпалюванні зразків, прикладене зовнішнє магнітне поле від характерної анізотропної залежності магнітоопору залишається не змінним.

В табл. 3.1 наведено дослідження величин температури термообробки та залежності магнітоопору від ефективної товщини при виконанні вимірювань у трьох геометріях. У перпендикулярній геометрії спостерігається максимальне значення магнітоопору у свіжосконденсованих плівках при різних металах й становить 0,706% для Ni (25)/П та 0,06% для Fe (25)/П, (25) – це ефективна товщина яка вимірюється в нм [18]. Вимірювання величини магнітного опору зменшується при переході від перпендикулярної до поперечної геометрії. Величина магнітоопору не проявляється у всіх плівках після проведення над ними термообробки.

Максимальне значення виміру перпендикулярної геометрії становить 1,303% для Ni (25)/П та 0,096% для Fe (5)/П [18].

Таблиця 3.1 – Залежність величини магнітоопору від ефективної товщини та температури термообробки для одношарових плівок Fe, Co і Ni [18]

Плівка (d, нм)	T, K	МО, %		
		Геометрія вимірювання		
		перп.	попер.	позд.
Fe (5)/П	460	0,035	0,021	-0,011
	700	0,096	0,093	-0,064
Fe (10)/П	460	0,042	0,03	-0,02
	700	0,063	0,063	-0,029
Fe (15)/П	460	0,052	0,028	-0,012
	700	0,031	0,062	-0,01
Fe (20)/П	460	0,048	0,037	-0,025
	700	0,051	0,056	-0,026
Fe (25)/П	460	0,06	0,037	-0,01
	700	0,093	0,072	-0,025
Ni (5)/П	460	0,276	0,125	-0,054
	700	0,415	0,115	-0,065
Ni (10)/П	460	0,352	0,213	-0,067
	700	0,810	0,281	-0,358
Ni (15)/П	460	0,619	0,31	-0,193
	700	0,833	0,104	-0,352
Ni (20)/П	460	0,649	0,283	-0,233
	700	0,778	0,291	-0,261
Ni (25)/П	460	0,706	0,633	0,369
	700	1,303	0,401	-0,271

Магнітоопір зростає якщо збільшувати ефективну товщину плівки, яка була зроблена з феромагнітних металів після термообробки чи у свіжосконденсованому стані.

3.2 Магніторезистивні властивості в тришарових плівках

Властивості магніторезистивних плівок та їх систем ми можемо визначати за їх товщини магнітних шарів та прошарків з рідкоземельного металу,

структурно-фазовим складом матеріалу та за їх геометрією вимірювання. На рис. 3.2 наведено залежність магнітоопору від зовнішнього магнітного поля яке прикладене до структури з тришарової плівки на основі металів Fe, Ni, Dy до термообробки та після її проведення.

В тришарових системах плівки як і в одношарових, не залежно від їх товщин шарів виникає анізотропний магнітоопір. У всіх зразках, при вимірюванні величини магнітоопору у перпендикулярній й поперечній геометрії зростає, при збільшенні індукції в зовнішньому магнітному полі, а при досягненні максимальних значень при B_c , починає з великою швидкістю зменшуватись що призводить до насиченості, а при вимірюванні у повздовжній геометрії все протікає з точності до навпаки. У перпендикулярній геометрії максимальна величина магнітного опору становитиме 1,8 % і 0,3 % для таких систем як Ni(5) / Dy(20) / Ni(20)/П і Fe(5)/ Dy(15) / Fe(20)/П [18]. Магнітоопір зменшується при переході від поперечної до перпендикулярної геометрії вимірювань, та може становити 1,1% для систем на основі елементів Dy і Ni та 0,08% на основі металів Dy і Fe. Температура відпалювання до 700 К не має сильного впливу у трьох геометріях виміру на магнітоопір в плівкових матеріалів на основі металів Dy і Ni теж сама можемо сказати про величину B_c , але при повздовжній та поперечної геометрії вимірювання. Коерцитивність плівок, які пройшли відпалювання при 700 К, при вимірюванні у перпендикулярній геометрії збільшується.

Після проведення відпалювання до температур 700 К, у плівках на основі металів Fe, Dy, Fe в яких не з'явилась оксидна фаза, не було помічено зміни магнітоопору від температури. Термообробка обох систем плівкових зразків при низької температури не буде впливати на фазовий склад цих зразків, при цьому процеси рекристалізації не викликають суттєвого збільшення розміру кристалічних зерен з цього слідує, що доменна структура плівкових зразків не була змінена тобто можемо сказати, що магнітоопір не буде збільшений або зменшений. Після процесу відпалювання при температурі до 800 К у плівках на основі металів Dy і Fe утворюється оксидна фаза ГЦК – Fe_3O_4 це викликає

збільшення магнітоопору у системі плівкових зразків. Було визначено, що магнітоопір і коерцитивна сила у плівкових системах впливає на товщину немагнітних прошарків. На (рис. 3.3) наведено залежність магнітного опору від прикладеного магнітного поля для систем тришарових плівок Ni (5) / Dy (x) / Ni (20) / П (x – ефективна товщина прошарку з Dy).

У (табл. 3.2) наведено залежність магнітоопору від прошарку з Dy, у плівкових системах на основі металів Fe і Dy, з даних на цьому рисунку ми можемо побачити, що магнітоопір має осциляційний характер від залежності товщини прошарку з Dy ця залежність виконується для всіх трьох геометрій вимірювання. Товщина феромагнітного шару має не менш важливий вплив на значення MO та B_c . Тому було досліджено товщини нижнього шару феромагнетик на значення магнітоопору в плівковій системі Ni (5) / Dy (10) / Ni (x) / P, де x - ефективна товщина, яка становила від 5 до 25 нм з кроками 5 нм [19]. Результати цих досліджень показані на (рис. 3.3) на ньому ми бачимо, збільшення магнітоопору через збільшення ефективної товщини нижнього шару Ni аналогічну ситуацію ми можемо спостерігати в системі плівок на основі металів Fe і Dy.

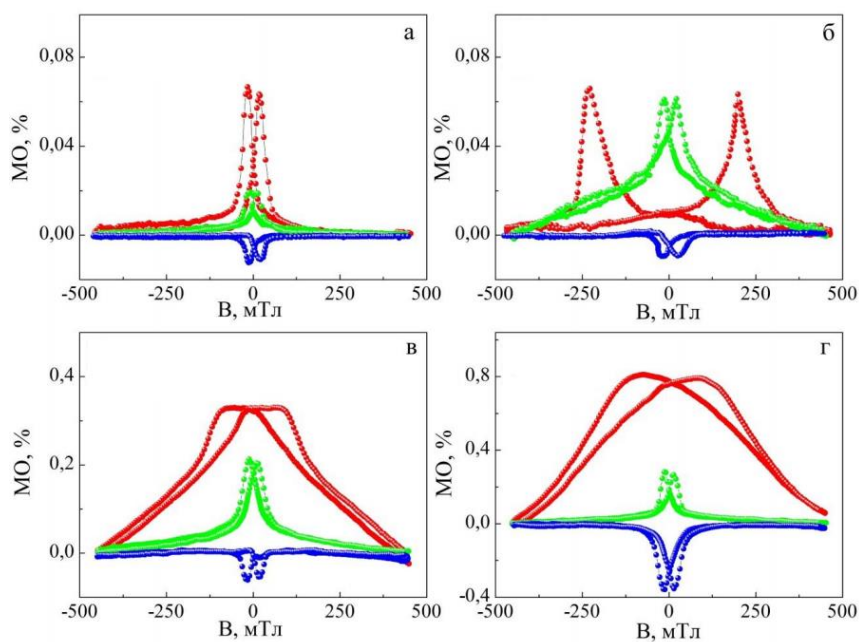


Рисунок 3.1 – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного: перпендикулярній (●), поперечній (●) та поздовжній (●) для плівок у свіжосконденсованому стані: а – Fe (15); в – Ni(20); та після термообробки б – Fe (15); г – Ni(20) [18]

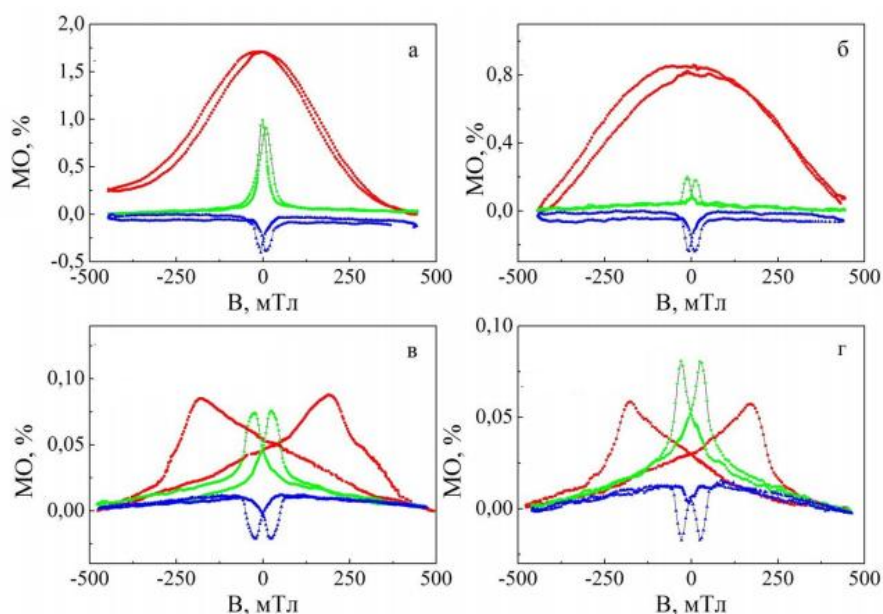


Рисунок 3.2 – Залежність величини магнітоопору від прикладеного зовнішнього магнітного поля: перпендикулярній (●), поперечній (●) та поздовжній (●) для плівкових систем: а, б – Ni(5)/Dy(20)/Ni(20)/П; в, г – Fe(5)/Dy(10)/Fe(20)/П у свіжосконденсованому стані (а, в) та після термообробки до 700 К (б, г) [18]

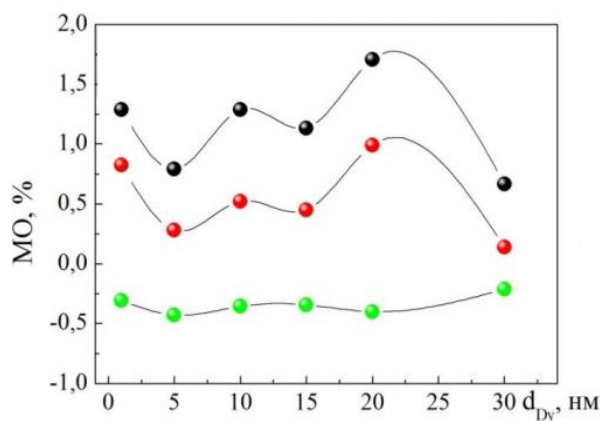


Рисунок 3.3 – Залежність величини магнітоопору від товщини прошарку Dy для плівкової систем Ni (5) /Dy(x) / Ni (10) / П, де x – ефективна товщина прошарку з Dy [18]

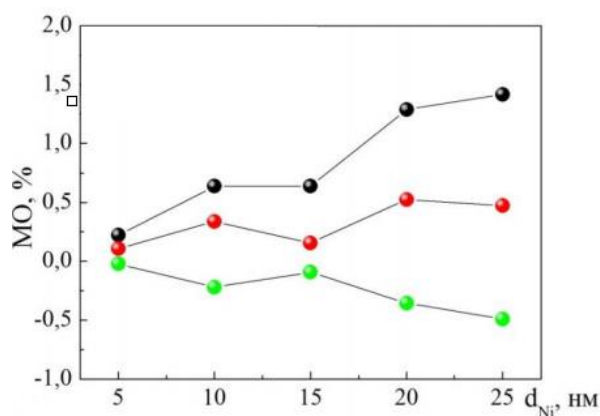


Рисунок 3.4 – Залежність величини магнітоопору від товщини нижнього шару з Ni для плівкової систем Ni (5) /Dy(10) / Ni (x) / П, де x – ефективна товщина шару з Ni [18]

Таблиця 3.2 – Залежність величини магнітоопору та коерцитивної сили від товщини прошарку з Dy для системи Fe (5) / Dy (x) / Fe(20) / П [18]

X (d_{Dy}), нм	МО, %		
	геометрія вимірювання		
	перпенд.	попер.	позд.
5	0,061	0,044	-0,031
10	0,069	0,065	-
15	0,049	0,041	-0,008
20	0,053	0,058	-0,009
25	0,056	0,056	-0,004
30	0,045	0,039	-0,003

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел проведено такі класифікації наноматеріалів: за геометричним принципом будови, за видом просторової кристалічної решітки, за атомною структурою і хімічним складом.
2. Розглянуто фізичні принципи, на яких реалізуються ефекти анізотропного та гігантського магнітоопору у багатошарових плівках, що використовуються як чутливі елементи сенсорної електроніки.
3. Проаналізовано приклади застосування структур з ефектами гігантського та анізотропного магнітоопору у промисловості. Розглянуто виробничий процес для створення магніторезистивних датчиків на гнучкій підкладці, що є перспективним з точки зору практичного застосування у спінтроніці та автомобілебудуванні.
4. Освоєно методику отримання плівкових магнітних структур методом електронно-променевого та термічного випаровування у вакуумі.
5. Освоєно методику дослідження магніторезистивних властивостей плівкових зразків на автоматичному вимірювальному комплексі з максимальним зовнішнім магнітним полем 0,45 Тл.
6. Вивчені та проаналізовані магніторезистивні властивості в одношарових та тришарових плівкових системах на основі Fe, Ni і Dy у свіжосконденсованому стані та після проведення термообробки. Встановлено, що у тришарових плівках спостерігається найбільше значення магнітоопору при вимірюванні перпендикулярної геометрії яке становить 1,8 % для плівок Ni(5) / Dy(20) / Ni(20) / П та 0,3 % для плівок Fe(5) / Dy(15) / Fe(20) / П.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткач О.П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні. – Суми: Сумський державний університет, 2014. – 125 с.
2. Павлиго Т.М. Системи класифікації наноматеріалів // Журн. Наукові нотатки. – 2013. – Т. 41, № 1. – С.191–198.
3. Завражна О. М, Пасько О. О, Салтикова А. І. Основи нанотехнології. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренк, 2016. – 180 с.
4. Кондрахова Д. М. Взаємний зв'язок властивостей та 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.
5. Hall, D.A.; Gaster, R.S.; Lin, T.; Osterfeld, S.J.; Han, S.; Murmann, B.; Wang, S.X. GMR biosensor arrays: A system perspective. Biosens. Bioelectron. 2010, 25, 2051–2057.
6. 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. 28665-28689; doi:10.3390/s151128665
7. Dise, J.; Schmidt, R.; Wu, J.; Stearrett, R.; Haughey, K.; Xiao, J.; Nowak, E.; CenterSpintronics and Biodetection Team. Magnetic Domain Analysis of GMR Spin Valves with CoFe Electrodes via Magnetic Force Microscopy. Am. Phys. Soc. 2013, 1, 14003.
8. Reig, C.; Cubells-Beltran, M.-D.; Muñoz, D.R. Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing. Sensors 2009, 9, 7919–7942.
9. Reig, C.; Cubells-Beltran, M.-D.; Muñoz, D.R. Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing. Sensors 2009, 9, 7919–7942.

10. Klaas, D.; Taptimthong, P.; Jogschies, L.; Rissing, L. Component Integrated Sensors: Deposition of Thin Insulation Layers on Functional Surfaces. *Procedia Technol.* 2014, 15, 114–121.
11. Klaas, D.; Rittinger, J.; Taptimthong, P.; Duesing, J.; Wurz, M.C.; Rissing, L. Verwendung von Schattenmasken zur Direktstrukturierung individuell adaptierbarer Sensorik auf technischen Oberflächen. In *Proceedings of the MikroSystemTechnik Kongress 2015, Karlsruhe, Germany, 26–28 October 2015*.
12. Wienecke, A.; Rissing, L. Relationship Between Thermal Stability and Layer-Stack/Structure of NiMn-Based GMR Systems. *IEEE Trans. Magn.* 2015, 51, 1–4.
13. Bever, T.; Pruegl, K.; Raberg, W.; Strasser, A.; Zimmer, J. Sensors and Measuring Systems 2014. In *Proceedings of the Sensoren und Messsysteme 2014, Nuremberg, Germany, 3–4 June 2014*; pp. 1–4.
14. Kruppe, R.; Rissing, L. Influence of Deposition Parameters on Mechanical Stress and Magnetic Properties in Thick, Electroplated Co-Fe Flux Guides. *ECS Trans.* 2015, 64, 33–38.
15. Жавжарова Є.Л, Коротун А.В, Смирнова Н.А. Технологічні основи електроніки. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 50 с.
16. Програмно-апаратний комплекс для дослідження магніторезистивних властивостей у змінному геометрії поля / Костюк Д.М., Демиденко М.Г., Проценко С.І. // Збірник праць «Десятої міжнародної науково-практичної конференції «Освітні, наукові та інженерні додатки в середовищі LabVIEW і технології National Instruments 2011 ». – М: Університет дружби народів, 2011. – С. 498 – 500.17.
17. Магніторезистивні властивості спін-вентильних структур на основі Co та Cu або Au / М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, Д.М. Костюк [та ін.] // Ж. нано- та електрон. фіз. – 2011.– Т.3, № 4. – С. 106 – 113.
18. Шпетний І.О, Черноус А.М, Воробйов С.І, Шутилєва О.В, Литвиненко Я.М. Структурно-фазовий стан та магніторезистивні властивості плівкових систем. – Суми: СумДУ, 2016. – 51 с.

19. Magnetoresistive effects in perpendicularly magnetized Tb-Co alloy based thin films and spin valves / M. Gottwald, M. Hehn, F. Montaigne [et al.] // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 111. – P. 083904-1 – 083904-4