

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

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**ЕФЕКТИ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВЛАСТИВОСТІ І  
СТРУКТУРУ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ**  
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП-81

І.С. Мартиненко

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

І.О. Шпетний

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

І.Ю. Проценко

Суми – 2022

## РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні впливу магнітного поля на властивості та морфологію поверхні, а також на структурні характеристики (зокрема шорсткість поверхні) плівкових матеріалів.

Плівкові магнітні системи на основі металів, в яких досліджували явища впливу магнітного поля на структуру та фізичні властивості були отримані в вакуумній установці ВУП-5М. Зразки плівкових сплавів отримували методом одночасного випаровуванням з двох електронно променевих гармат. Вимірювання магнітоопору здійснюється за стандартною 4-точковою схемою у зразках з паралельною геометрією протікання струму при перпендикулярній, поперечній та повздовжній орієнтаціях індукції магнітного поля відносно площини підкладки. Зміна геометрії реалізовувалась шляхом повороту зразка у просторі між осердями електромагніту.

Встановлено, що повторна дія магнітного поля з більш високою напруженістю поля (до  $H = 0,1$  Тл) викликає набагато слабші зміни таких структурних характеристик. Спостережувані ефекти можуть бути пов'язані з зменшення кількості дефектів і переходу системи в більш стабільний стан, який має властивості, відмінні від початкового стану.

Робота викладена на 35 сторінок, у тому числі включає 16 рисунків, використано 16 літературних джерел.

Ключові слова : МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ПЛІВКОВІ СИСТЕМИ, МОРФОЛОГІЯ ПЛІВОК, ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ЕФЕКТИ, ВИКЛИКАНІ ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ</b> .....	5
1.1. Магніторезистивні ефекти в плівкових матеріалах.....	5
1.2. Ефект Холла .....	9
1.3. Вплив магнітного поля на структурні характеристики та морфологію поверхні плівкових зразків.....	12
1.4. Застосування наноструктур, що характеризуються магніторезистив- ними ефектами у спінтроніці та електроніці.....	13
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	20
2.1. Методика отримання плівкових зразків методом конденсації у вакуумі .....	20
2.2. Застосування скануючої зондової мікроскопії для дослідження впливу магнітного поля на морфологію поверхні.....	22
2.3. Методика дослідження магніторезистивних властивостей.....	24
<b>РОЗДІЛ 3. ЗАЛЕЖНІСТЬ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ПЛІВКОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ Co І Ag ВІД ВЕЛИЧИНИ ПРИКЛАДЕНО- ГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ</b> .....	27
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	33
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	34

## ВСТУП

Середина ХХ сторіччя була охарактеризована розвитком нового напрямку з розробки фізичних основ створення пристроїв, основаних на використанні спінового стану їх елементів як ідентифікаторів інформації та елементів сенсорів. Цей напрям отримав назву «спінтроніка». На сьогодні до спінтроніки відносять декілька напрямів дослідження, пов'язаних із спін-залежними ефектами.

Основою чутливих елементів спінтроніки є магнітні наноматеріали, зокрема плівкові структури малих товщин (менше 100 нм). У таких структурах при проходженні постійного електричного струму через нанoeлектронні елементи виникає високоградієнтне електричне поле, а при проходженні спінового струму - високоградієнтне магнітне поле, обумовлене дуже малими розмірами цих елементів [1, 2]. Такі поля можуть приводити до помітних змін як розмірів, так і структури самих базових елементів електронних приладів. Також магнітні поля можуть змінювати розподіл доменної структури магнітних матеріалів і тим самим впливати на характеристики електричної та спінової провідності елементів нанoeлектроніки і спінтроніки [3]. Вивченню ефектів впливу магнітного поля на властивості та структуру матеріалів присвячено ряд робіт [4-6].

Ефекти впливу магнітного поля і магнітного післядії, які змінюють структуру і властивості наноматеріалів, необхідно враховувати при проектуванні та створенні пристроїв нанoeлектроніки, що функціонують в умовах впливу магнітних полів. Навіть невеликі зміни у наноструктурі тонких плівок можуть привести до відмов у роботі приладів.

Проведення комплексних досліджень магнітних і магніторезистивних властивостей, структурно-фазового стану і ефектів впливу магнітного поля та ефектів магнітної післядії на структурні характеристики плівкових систем є актуальним.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні впливу магнітного поля на властивості та морфологію поверхні, а також на структурні характеристики (зокрема шорсткість поверхні) плівкових матеріалів.

# РОЗДІЛ 1

## ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ЕФЕКТИ, ВИКЛИКАНІ ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

### 1.1. Магніторезистивні ефекти в плівкових матеріалах

У ХХ столітті було відомо, що електрони, які створюють струм в електричному колі, мають свій магнітний момент, але в практично в рішеннях це не використовувалося. З приходом нового тисячоліття з'явилася нова галузь науки – спінтроніка або по іншому – магнітоелектроніка. У її основу закладено поняття «спіна електрона». Відповідно до цієї концепції, згідно з принципом квантування проекції спіна на обрану вісь електрони поділяють на два типи носіїв струму: електрони зі спіном-вгору та електрони зі спіном-вниз. В наш час спінтроніка вивчає магнітні та магнітооптичні взаємодії у металевих та напівпровідникових наногетероструктурах, а також динаміку та когерентні властивості спінів у конденсованих середовищах, а також квантові магнітні явища у структурах нанометрового розміру. Одним з напрямків спінтроніки є розробка пристроїв, принцип роботи яких заснований на магнітотранспортних властивостях плівкових матеріалів. Одним з типів ефектів, який викликаний впливом магнітного поля на магнітні зразки є магніторезистивні ефекти.

Магніторезистивний ефект (МРЕ) – це відносна зміна електричного опору металевих провідників при включенні зовнішнього магнітного поля [7].

Для визначення магнітоопору (МО) використовуються два різних методи. Згідно з першим, МО – це відношення зміни електричного опору до опору в стані насичення  $\Delta R/R_{\text{нас}}$ .

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_{\text{нас}}} = \frac{R(H) - R_{\text{нас}}}{R_{\text{нас}}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

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

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

Інший метод також часто використовується в літературі. Вон полягає в нормуванні опору до його значення при нульовому зовнішньому магнітному полі ( $R_0$ ):

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R_0}{R_0} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Ці два метода пов'язані одне з одним відношенням:

$$\Delta R / R_{\text{нас}} = \frac{(\Delta R / R_0)}{(\Delta R / R_0) - 1} \quad (1.3)$$

Більшість експериментаторів переважно використовують метод (1.1) для визначення МО, знаючи, що опір при нульовому полі, як правило, залежить від попередньої «історії» зразка. На відміну від цього, опір, що визначається за співвідношенням (1.1) не залежить від попередньої історії зразка.

Розглядаючи МРЕ, потрібно коротко згадати про оригінальний аналог цього явища. Добре відомий магніторезистивний ефект у немагнітних твердих тілах і кристалах з магнітним порядком [7]. Для немагнітних металів МРЕ незначний; наприклад, для міді він становить величину  $10^{-4}$ . Виключенням з цього є вісмут, у якого він дорівнює 2. У напівпровідниках МРЕ явно вище, ніж у типових металах ( $10^{-2} \div 10^{-1}$ ). Для магнетиків зазвичай спостерігають МРЕ, при якому опір виростає із збільшенням магнітного поля. Для типових магнітних матеріалів МРЕ дуже малий. Наприклад, у заліза при кімнатній температурі він становить  $2 \cdot 10^{-3}$ , для нікелю  $2 \cdot 10^{-2}$ , а для пермалою  $(3 \div 4) \cdot 10^{-2}$ . Причина класичного МРЕ – є викривлення траєкторій електронів і дірок у магнітному полі та відповідно, їхнє більше розсіювання.

У феромагнітних матеріалах розрізняють два типи магнітоопору, величина яких більше 1% при кімнатній температурі. Це анізотропний (АМО) і гігантський (ГМО) магнітоопір. Мотт [7] припустив, що за виникнення електричного струму в 3d-перехідних металах в основному відповідальні зовнішні 4s-електрони провідності. Ці електрони можуть розсіюватися на недосконалостях ґратки у вільному стані, що існують в 3d – зонах (sd-розсіювання). Цим процесом обумовлений великий питомий опір перехідних металів порівняно, наприклад, з

міддю - теж перехідним металом, але в якого вже зайняті всі 3d-зони.

*Явище гігантського магнітного опору.* Одним з найцікавіших властивостей деяких магнітних матеріалів з погляду фундаментальної фізики й практичного користування є гігантський магнітоопір (ГМО) [7].

Гігантський магнітний опір вперше спостерігався двома незалежними групами вчених Бейбіча і Бінаша [7], які досліджували властивості тонких багатошарових плівок Fe/Cr, отриманих методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) на підкладках арсеніду галію (GaAs). Обидві групи вимірювали ГМО-ефект, коли орієнтація моментів у сусідніх магнітних шарах змінювалася під дією зовнішнього магнітного поля від антипаралельної до паралельної. Виявилось, що цей тип МО не залежить від взаємної орієнтації поля й струму, і не міг бути пояснений механізмом спіно-орбітальної взаємодії, запропонованим Смітом. Бінаш спостерігав МО в 1,5% при кімнатній температурі в тришарових системах, що складаються із двох шарів заліза, товщиною 120 Å, розділених шаром хрому в 10 Å. Бейбіч виявив, що в багатошаровій плівці, що складається з 60 шарів заліза (товщиною 30 Å) і хрому товщиною (9 Å), опір у зовнішнім полі зменшується приблизно на 100 % при 4,2 К і на 30 % при кімнатній температурі. Така велика зміна опору послужило назві нового явища - гігантського магнітоопору.

Бейбіч з'ясував, що при магнітному полі до 20 кЕ шари заліза впорядковуються виключно антипаралельно. На підставі цих результатів і було запропоновано модель двох струмів Мотта. Фізичний механізм гігантського магнітоопору зводиться до відомого в магнітних металах спіно-залежного розсіювання електронів провідності на немагнітних домішках, що може відбуватися або на межах магнітних і немагнітних шарів, як це має місце в багатошарових структурах, або в обсязі магнітного кластера в плівках неоднорідних сплавів. У більшості феромагнітних металів зонна структура має s- і d- зони, що перекриваються при енергії, рівній енергії Фермі [7]. Якщо s- зона набагато ширше d-зони, то ефективна маса електронів у s- зоні набагато менше ефективної маси електронів у d-зоні, внаслідок чого s- електрони вносять

основний внесок у електропровідність. У результаті обмінної взаємодії у ферромагнітних металах 3d-зона для електронів із протилежно направленими спінами розчіплюється [7]. Через це щільність станів для електронів з однією орієнтацією спінів буде відрізнятися від щільності станів для електронів із протилежною орієнтацією спінів.

Шорсткості інтерфейсів та зовнішніх меж, конфігурація розміщення розсіюючих центрів, наявність меж зерен, домішок тощо лише визначає амплітуду ефекту.

Дослідження причин зазначеного явища і його механізмів й спричинило появу нових матеріалів із широкими потенційними можливостями практичного застосування: структури з магнітним тунельним переходом, спінові вентиля, спінові нанотранзистори й ін.

*Анізотропний магнітоопір.* В 1857 англійський учений Вільям Томсон звернув увагу на те, що опір зразка в зовнішнім магнітному полі, залежить від взаємного розташування вектора намагніченості в зразку й напрямку струму [8]. Воно збільшується, коли струм тече паралельно вектору намагніченості, і зменшується при ортогональній взаємній орієнтації струму й намагніченості. Це явище одержало назву анізотропного магнітоопору (АМО).

Модель двох струмів Мотта не могла пояснити це явище. Надалі була розвинена теорія Сміта (1951), він додав до розгляду спин-орбітальну взаємодію між електронами та кристалічними ґратками. Це взаємодія, на відміну від ізотропного sd-розсіювання, має анізотропний характер й, відповідно, спричиняється залежність питомого опору від взаємної орієнтації струму й намагніченості. Для звичайного ферромагнітного металу з намагніченістю  $M$ , спрямованої під кутом  $\theta$  до струму  $I$  анізотропний МО визначається співвідношенням:

$$R(\theta) = R_{\perp} + (R_{\parallel} - R_{\perp}) \cdot \cos^2 \theta, \quad (1.4)$$

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



Повний огляд по АМО в об'ємних зразках і тонких плівках Fe, Co, Ni і їх сплавів поданий у роботі Мак Гуїра [8]. У цій роботі обговорюється теоретична основа МО і застосування АМО у детекторах магнітних полів.

Найбільше часто використовуваний сплав у магніторезистивних датчиках магнітних полів - пермалой ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) ~ має нульову магнітострикцію й слабку магнітокристалічну анізотропію. У полі 10 кЕ пермалой має 4 % АМО. Хант [9] перший розробив пристрій, що використовує електроосаджені плівки пермалоя.

Важливою характеристикою магнітних датчиків є чутливість, обумовлена як виражене у відсотках відношення зміни опору до напруженості магнітного поля, що викликає ця зміна. Вона повинна бути досить високою.

## 1.2. Ефект Холла

Ефект Холла - це фізичне явище, що полягає в наступному. Розглянемо пластинку (рис.1.1) із провідного матеріалу, уздовж якого проходить струм  $I$ . Якщо перпендикулярно до площини пластинки й напрямку струму діє магнітне поле напруженістю  $H$ , то в пластині виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна й струму, й напруженості магнітного поля:

$$E = K \times I \times H, \quad (1.5)$$

де  $K = k_x/d$  - коефіцієнт, що залежить від матеріалу й товщини пластини  $d$ ;

$k_x$  - постійна Холла.

Напрямок цієї ЕРС, що називається ЕРС Холла, є перпендикулярним до струму і поля, тобто її можна заміряти між бічними поздовжніми гранями пластини (рис. 1.1) за допомогою електровимірювального приладу. Причина появи ЕРС Холла в тому, що на заряди, що рухаються, у магнітному полі діє сила Лоренца. Струм у пластині - це і є впорядкований рух зарядів (у металі - електронів). Під дією магнітного поля вони зміщуються перпендикулярно до напрямку свого руху й поблизу однієї поздовжньої грані виникає надлишок

зарядів, а поблизу іншої – недостача кількості зарядів. У звичайних провідникових матеріалах ЕРС Холла дуже і дуже мала, що пояснюється малою рухливістю носіїв струму через їх велику концентрацію.

Другими словами, в присутності магнітного поля у провіднику створюється поперечна напруга, яка є наслідком сили Лоренца на електронний струм. У феромагнітних матеріалах ця поперечна напруга не просто пропорційна магнітному полю, як це спостерігається у немагнітних провідниках, але характеризується додатковим внеском, пов'язаним з намагніченістю. Цей ефект ще відомий як аномальний ефект Холла.

Аномальний ефект Холла тісно пов'язаний зі спін-орбітальною взаємодією, яка спричиняє поперечний рух носіїв заряду у проміжках між актами розсіювання. Цей механізм називають внутрішнім спіновим ефектом Холла. Хоча ефект Холла відомий уже більше ста років, практичне застосування його почалося лише при розвитку технології одержання напівпровідників. Саме тому в чистих напівпровідниках забезпечується велика рухливість носіїв струму, тому постійна Холла для чистих напівпровідників у багато разів більше, ніж для металів.

Сучасні двигуни автомобілів оснащуються датчиками для автоматичного керування системою живлення й запалювання. До таких датчиків, що дозволяють точно визначати моменти подачі в циліндри двигуна чергової правильної порції палива й іскри, відносять датчики фаз і датчики положення колінчатого вала, що використовують у своїй роботі ефект Холла. Використання датчиків Холла для автоматичного вимірювання буде раціональним лише у тому випадку, якщо вони мають досить високу чутливість і мало піддані впливу температури. Чутливість датчика залежить від вихідної ЕРС, тобто від постійної Холла, що визначається рухливістю носіїв струму. У провідникових тілах носіями струму є електрони.

При звичайних температурах електрони перебувають у хаотичному тепловому русі і мають різними швидкості. З іншої сторони, якщо уздовж тіла створити електричне поле  $E$ , і приклавши напругу  $U$ , то всі електрони будуть пересуватися в напрямку поля з деякою середньою швидкістю  $V$  (при цьому окремі електрони можуть мати як більшу, так і меншу швидкості).

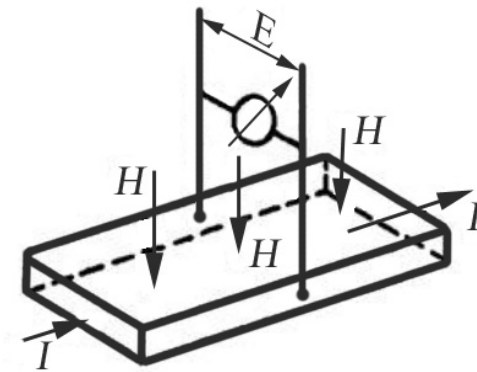


Рис.1.1. Принцип ефекту Холла. Адаптовано з роботи [1]

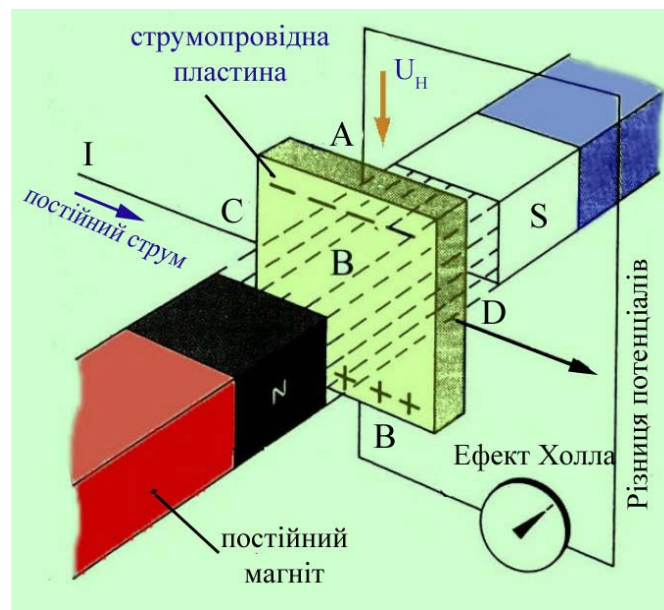


Рис.1.2. Принцип реалізації ефекту Холла. Адаптовано з роботи [1]

### **1.3. Вплив магнітного поля на структурні характеристики та морфологію поверхні плівкових зразків**

Однак, у даних роботах були досліджені ефекти або у масивних матеріалах, або у товстих плівках. У роботі [5] представлено результати дослідження впливу постійних і змінних магнітних полів на такі механічні характеристики різних магнітних і немагнітних металів та сплавів, як межі плинності та міцності, релаксацію напружень та інші. Особливу увагу було приділено вивченню прояву позитивного та негативного магнітопластичного ефекту в умовах механічного навантаження від величини напруженості магнітного поля. Також у даній роботі розглянуто фізичні механізми ефектів, що пояснюються впливом магнітного поля на динаміку дислокацій і трансформацію спінів – залежної дефектної структури.

У роботі [4] відмічається, що шорсткість поверхні впливає на магнітотранспортні властивості багат шарових плівок, зокрема на значення ГМО.

При мініатюризації компонентів сенсорних приладів постійно відбувається зменшення розмірів чутливих елементів. Зменшення товщини плівок чутливих елементів є одним зі способів мініатюризації компонентів приладів спінтроники. Дослідження показали, що при зменшенні товщини зразків гранульованих магнітних плівкових сплавів виникають особливості в магнітних і магніторезистивних властивостях, пов'язані зі структурно-фазовим станом зразків [10]. Тому, проведення комплексних досліджень магнітних і магніторезистивних властивостей, структурно-фазового стану і ефектів впливу магнітного поля та ефектів магнітної післядії на структурні характеристики таких плівок є актуальним.

В третьому розділі приведено результати дослідження впливу магнітного поля на структурні характеристики поверхні зразків гранульованого плівкового сплаву на основі Co та Ag, що характеризується ефектом ГМО.

#### **1.4. Застосування наноструктур, що характеризуються магніторезистивними ефектами у спінтроніці та електроніці**

Структури на основі плівкових матеріалів, в яких спостерігається явище гігантського магнітного опору, знайшли широке застосування у спінтроніці, а також у мікро та наноелектроніці.

Одним з основних задач спінтроніки є інтеграція магнітних систем у напівпровідникову мікроелектроніку. Просте керування спінами електронів у напівпровідниках уже зараз дозволяє створювати два новітніх класи гібридних матеріалів: магнітні напівпровідники (гібридна структура феромагнетик / напівпровідник) і спін-електронні нанотранзистори.

Широкі перспективи для використання наногетероструктур обумовлені тим, що електронні спіни напівпровідника можна використати як детектор, що реагує на зміни магнітного стану у феромагнетикі. Так, при інжекції через контакт феромагнетика й напівпровідника електрони напівпровідника створюють нерівноважний спін, який містить інформацію про спін електронів у феромагнетикі. Для визначення спінової орієнтації електронів у напівпровіднику можна використати як оптичні, так й електричні методи детектування.

Розглянемо основні напрямки розвитку спінтроніки.

Високошвидкісне перемикавання магнітного стану. Однією з головних характеристик спін-електронних пристроїв є його висока пропускну здатність, яка визначається часом відгуку на електричні й магнітні впливи. Досить добре вивчені питання, які пов'язані зі швидкістю дифузії, збереженням заряду, паразитною ємністю у звичайній електроніці і їхніх спінових аналогах у спінтроніці. Однак час перемикавання магнітного моменту наномагнетиків (окремих магнітних доменів) вивчено на низькому рівні, хоча деякі аналогії можуть бути взяті зі швидкодіючих записуючих пристроїв. Високошвидкісне перемикавання намагніченості в цей час інтенсивно досліджується, і, як уже відомо, час зміни магнітного стану сильно залежить від форми пристрою й зв'язку режиму перемикавання із хвильовим спектром спінів. Час читання запису в MRAM

становить декілька наносекунд, однак у майбутньому бажано побачити більш високі швидкості перемикання магнітного стану. Вищезгадані ідеї можуть бути об'єднані для створення нового типу тунельного запам'ятовувального елемента пам'яті MRAM, що складається з ферромагнітної плівки, спінового магнітного ізолятора й металу перехідної групи. Тоді і час запису визначався б магнітними властивостями ізолятора та металів.

Спін-електронні сенсори позиціювання й руху. Сенсори на основі ефекту ГМО, використовувані для визначення величини й напрямку магнітного поля, знайшли широке застосування в наступних областях: зберігання й зчитування інформації, програмувальні вентильні матриці, авіаційна електроніка, електронне машинне керування й автомобільні активні системи безпеки. В останні роки основними тенденціями розвитку світового автопрому є поліпшення керування двигуном внутрішнього згорання (з метою зменшення автомобільних викидів), системами гальмування, пристроями безпеки й т.д. Оскільки ці технології стрімко розвиваються, на перше місце встає вдосконалення спінових магнітних сенсорів: підвищення чутливості, стабільності, надійності й придушення шумів.

Перший підхід до реалізації датчиків на основі ГМО ефекту полягав у використанні їх для визначення напруженості величини магнітного поля. Для визначення величини напруженості поля також використовують датчики на основі ефекту Холла.

Головні переваги ГМО-датчиків - це висока чутливість навіть до невеликої зміни магнітного поля, невеликі габарити, енергоефективність, простота об'єднання з електронними приладами. До того ж, завдяки інтенсивному електричному сигналу, формованому ГМО – структурою, знижується й чутливість до перешкод. Ці властивості й привели до того, що елементи на основі гігантського магніторезистивного ефекту в першу чергу знайшли застосування в зчитуючих голівках жорстких дисків. Це дозволило приблизно за декілька десятків років збільшити щільність запису жорстких дисків з 4,1 до 100 Гбайт/кв.дюйм. При цьому дотепер виготовлювачі голівок зчитування жорстких дисків віддають перевагу структурі спінового затвору. Але голівки зчитування –

одне із багатьох застосувань гігантського магніторезистивного ефекту. ГМО - датчики знаходять застосування при зчитуванні струму, детектуванні лінійного, обертального переміщення або зсуві об'єктів, регулюванні моменту подачі палива, визначення положення важеля керування двигуном й ін.

На базі тонкоплівкових структур з гігантським магнітоопором, отриманих на кремнієвих підкладках, виконуються різні елементи датчиків - резистори, резисторні пари або напівмости, мости Уїтстона. Для збільшення питомого опору й мінімізації споживаної потужності ГМО - резистори, як правило, виконуються у вигляді серпантину. У типовому датчику чотири ГМО - резистора формують міст Уїтстона, вихідна напруга якого пропорційна зовнішньому магнітному полю. Температурний коефіцієнт всіх резисторів, виготовлених з того самого матеріалу, однаковий. Два резистори моста являють собою активні елементи датчика, один із двох резисторів, що залишилися, приєднується до джерела живлення, а другий - до загального потенціалу. Поверх цих "пасивних" резисторів, що виконують функції опорних елементів, наносяться невеликі екрани з пермолою товщиною 100 нм, що захищають їх від впливу прикладеного магнітного поля. Поверхневий опір всіх чотирьох резисторів однаковий. Зміна опору активних ГМО - резисторів такого моста на 10% викликає зміну його вихідної напруги на 5%. Для збільшення чутливості датчика в ряді випадків використовуються додаткові структури з пермолою, що виконують функцію концентраторів магнітного потоку. Активні резистори розміщують в зазор між такими концентраторами.

ГМО-MEMS – датчик прискорення. Як видно, ГМО-структури виготовляють методами нанотехнологій. Тому часто зустрічаються роботи з об'єднання їх з мікро- і нанокомпонентами. І тут інтерес представляє ГМО-MEMS – датчик прискорення. Розглянутий ГМО-MEMS – датчик прискорення містить мембрану з нітриду кремнію товщиною 0,5 мкм, формовану об'ємною обробкою кремнієвої підкладки, магнітно-тверду тонку плівку, осаджену поверх мембрани, і ГМО - елемент, виготовлений шляхом вакуумного осадження плівок на другу кремнієву підкладку. При зборці ГМО-MEMS – датчика обидва кристали з'єднуються

методом анодного зварювання. Датчик визначає прискорення, реєструючи зміну магнітного поля, яка викликана зсувом мембрани з магнітно-твердою плівкою.

Типова структура ГМО – елемента  $\text{Si-SiO}_2\text{-Ta-Cu-Co-NiFe-Ta}$ . Шар кобальту між провідним шаром міді та пермолою запобігає змішуванню міді й пермолою, спостережуване при температурі датчика менш ніж  $200^\circ\text{C}$ . Про цьому товщина шарів ГМО-структури складає 30-40 нм. В якості матеріалу магніто-твердої плівки використовують  $\text{CoCrTaPt}$ ,  $\text{FePt}$  або  $\text{CoPt}$ .

У кутовому датчику (рис.1.3) разом із ГМО - елементом використовуюти дископодібний постійний магніт, поле якого паралельно його площині. Магніт кріпиться на обертовому валу та розташовується поблизу датчика (рис.1.3). При обертанні магніту опір ГМО - елемента являється функцією косинуса або синуса кута між обертовим постійним магнітом і нерухомим датчиком.

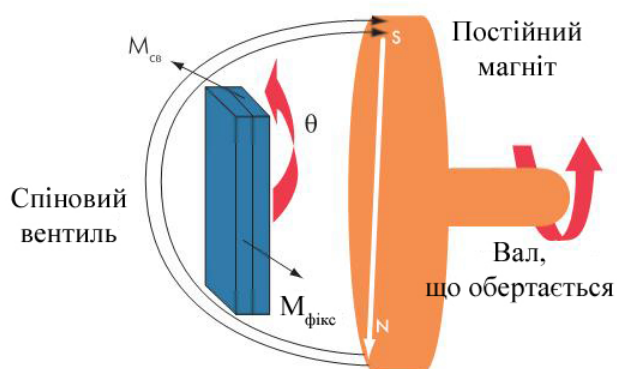


Рис.1.3. Конструкція кутового датчика з постійним магнітом. Адаптовано з роботи [2]

Кутовий датчик ГМО чутливий лише до напрямку поля, а не до його величини. Висока чутливість і малий розмір сенсорного елемента, здатність діяти в системах з постійною швидкістю забезпечують широкий робочий діапазон в системах вимірювання як положення, так і швидкості, що особливо важливо для розробки автомобільних систем з малими магнітами й більшими градієнтами полів. ГМО-датчики виробляють високі рівні первинних сигналів, стійкі до високочастотної вібрації. За рахунок перерахованих вище переваг можуть бути значно зменшені системні витрати у виробництві датчиків для автоелектроніки.



Цікавим приладом на основі спітроніки є спіновий польовий транзистор. Принципову схему приладу показано на рис. 1.4, а. Це трьохелектродний пристрій, аналогічний транзистору з металевою базою. Як і в звичайному польовому транзисторі, вузький канал поміщено між виток і стоком. Над каналом розміщено ще один електрод – заслін. Витік і стік – тут є ферромагнетики, намагнічені в одному напрямку (горизонтальні стрілки), а канал – це напівпровідник з 2D електронним газом.

Струм, який входить у канал із джерела є спін-поляризований. Якщо напруги на заслоні немає, то струм вільно проходить у стік (стан низького опору). Якщо на заслін подається напруга, тоді спін електронів струму прецесує (показано похилими стрілками в каналі). Підбираючи розмір напруги на заслоні, можна регулювати зміну орієнтації спінів електронів під час проходження по каналу. Якщо в кінці каналу спіни електронів мають орієнтацію, показану на рис. 1.4, а, то електрони відбиваються від краю стоку. У цьому стані транзистор має високий опір. Таким чином, опір спінового польового транзистора може керуватися електричним полем заслона.

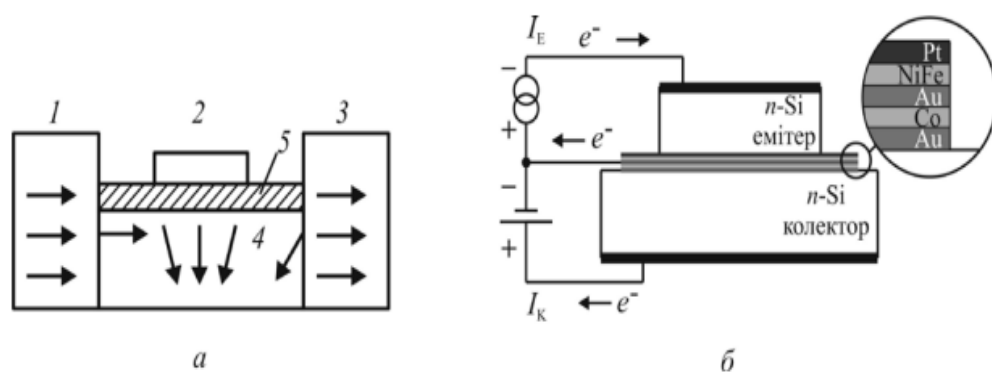


Рис. 1.4 Спін-вентильний транзистор: а – схематичне зображення; б – одна з можливих реалізацій з Si–Pt емітером, Si–Au колектором і NiFe–Au–Co спін-вентильною базою; 1 – витік, 2 – заслін, 3 – стік, 4 – канал, 5 – підзаслонний діелектрик.

Варіант реалізації спін-вентильного транзистора показано нарис. 1.4, б. Основна область транзистора включає в себе металевий, багат шаровий спіновий вентиль між двома областями кремнію n-типу провідності, які діють як емітер і колектор. У такій структурі гарячий електрон проходить через спін-вентильну базу, для того щоб потрапити з емітера в колектор. Базу зроблено як обмінну м'яку спін-вентильну систему, у якій є два феромагнітні матеріали: NiFe і Co. Вони мають різні коерцитивні сили й розділені прошарком з немагнітного матеріалу (Au).

Шари NiFe і Co за рахунок різниці коерцитивних сил, дають змогу утворювати чітко виражену паралельну й антипаралельну орієнтацію намагніченості в широкому спектрі температур. Їх можна локально перемикаєти відповідним магнітним полем. На ділянці поділу між металевою базою і напівпровідниками формуються бар'єри Шотткі. Для того щоб створити бажаний якісний бар'єр з випрямним ефектом, і на емітерному, і колекторному боці розміщують тонкі прошарки Pt і Au. Крім того, вони відокремлюють магнітні шари від контакту з кремнієм. Оскільки контакт Si–Pt утворює високий бар'єр Шотткі, його використовують як емітер. Колекторний діод Шотткі формується так, що він має більш низьку висоту бар'єра порівняно з емітерним діодом. Для виготовлення такого спін-вентильного транзистора використовують спеціально розроблену методику, що включає осадження металу на дві кремнієві пластини і їх наступне з'єднання в умовах ультрависокого вакууму.

Транзистор працює таким чином. Між емітером і базою встановлюється такий струм, за якого електрони інжектуються в базу перпендикулярно до шарів спін-заслона. Інжектвані електрони мають пройти через Si–Pt бар'єр Шотткі, і тому вони входять у базу як нерівноважні гарячі електрони. Енергія гарячих електронів визначається за висотою емітерного бар'єра Шотткі, що становить 0,5–1 eV і залежно від комбінації метал–напівпровідник. Як тільки гарячі електрони перетнуть базу, то вони піддаються впливу як непружного так і пружного розсіювання, що змінює і їх енергію, а також розподіл їх моментів.

Електрони здатні ввійти у колектор тоді,коли вони набули достатньої кількості енергії для подолання енергетичного бар'єра колектора. Висота цього бар'єра повинна бути меншою,а ніж емітерного. Однаково важливо те, щоб момент появи гарячого електрона був узгоджений з доступними станами в колекторі. Частина зібраних у колекторі електронів, струм колектора значно залежать від розсіювання в базі, яке є спін-залежним. Це регулюється перемиканням бази з узгодженого за намагніченістю низькоомного стану в антиузгоджений високоомний стан. Повне розсіювання керується зовнішнім магнітним полем, що змінює вирівнювання двох феромагнітних шарів спін-вентиля.

Такий спін-вентильний транзистор перспективний для пристроїв магнітноїпам'яті та датчиків магнітного поля.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

#### 2.1. Методика отримання плівкових зразків методом конденсації у вакуумі

Плівкові магнітні системи на основі металів, в яких досліджували явища впливу магнітного поля на структуру та фізичні властивості були отримані в вакуумній установці ВУП-5М (рис. 2.1). Зразки плівкових сплавів металу отримували методом одночасного випаровуванням з двох електронно - променевих гармат.

Вакуумний універсальний пост ВУП-5М призначений для отримання нанооб'єктів та плівок з різних матеріалів методами термічного, магнетронного та електронно-променевого розпилення, а також для підготовки об'єктів, досліджуваних за допомогою електронного мікроскопу або інших аналітичних приладів.

Плівки отримуються випаровуванням у вакуумі (тиск залишкових газів  $P \approx 7 \times 10^{-3} \div 4 \times 10^{-4}$  Па).

Плівкові зразки отримували методом електронно-променевого випаровування металів на підкладки у вакуумі, які розміщені на предметному столику (рис. 2.2). На столику розміщували підкладки із ситалу. На ситалові підкладки здійснювали осадження металевих плівок, в яких потім досліджували явища впливу на структуру поверхні магнітного поля а в деяких випадках і досліджувалися магніторезистивні властивості. Свіжосконденсовані зразки витримували у вакуумі впродовж 20 хвилин при температурі підкладки для їх стабілізації.

Для вимірювання товщини зразків використовують метод кварцевого резонатору. До переваг відноситься можливість поточного контролю в процесі осадження за товщиною плівки, висока точність вимірювання, особливо при малих товщинах плівок.

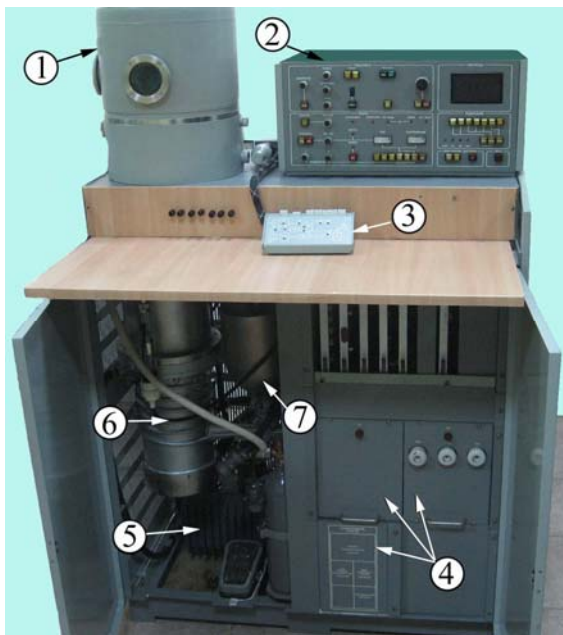


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд вакуумного універсального поста ВУП – 5М

Адаптовано з роботи [14]:

- 1 – робочий об'єм;
- 2 - блок керування та контролю;
- 3 - пульт дистанційного керування;
- 4 – блоки живлення;
- 5 – форвакуумний насос;
- 6 – високовакуумний насос;
- 7 – форвакуумний балон

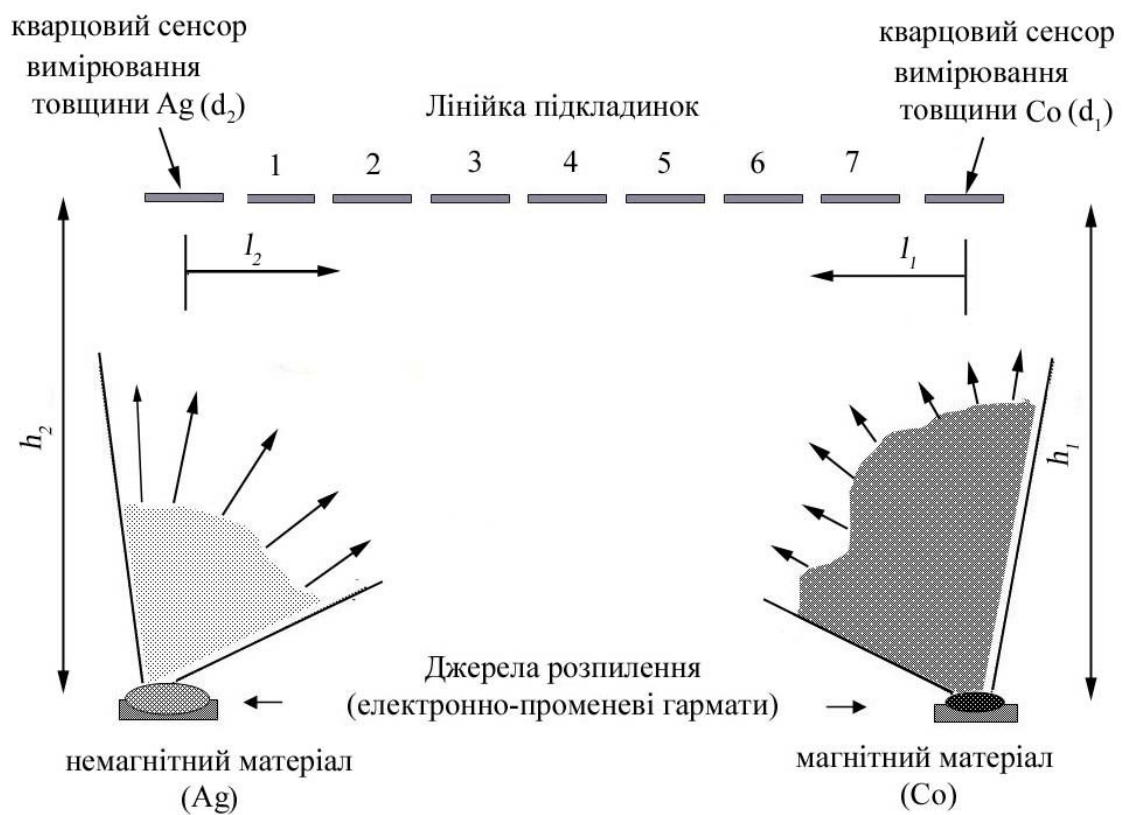


Рис. 2.2. Схема отримання плівкових сплавів методом одночасної конденсації з двох випарників. Адаптовано з роботи [15]

В якості кварцового датчика застосовують кварцові резонатори з частотою 10 МГц. Стабілізований блок живлення забезпечує роботу активуючого генератора. Частотомір фіксує зміну частоти коливань, що дозволяє контролювати товщину плівки з точністю до 10%.

## **2.2. Застосування скануючої зондової мікроскопії для дослідження впливу магнітного поля на морфологію поверхні**

Скануючий зондовий мікроскоп Solver Pro (рис. 2.3) може бути застосований для дослідження морфології поверхні плівок та вивчення впливу магнітних полів на структурні їх характеристики.

Представлена модель мікроскопу використовується для проведення досліджень морфології поверхні, структурних характеристик та магнітних властивостей матеріалів у зовнішніх магнітних полях величиною до  $H_{\text{макс}}=0,01$  Тл, спрямованих уздовж площини зразка. При застосуванні даного приладу було проведено дослідження, які описані у роботі [4] – це результати досліджень впливу магнітних полів на структуру та топологію поверхні та вивчення ефектів магнітної післядії у плівках на основі Co і Ag. Для цього проводили сканування поверхні плівок у режимі атомно-силової мікроскопії (АСМ) без електромагнітного поля, у полі  $H \leq 0,01$  Тл (з кроком 0,001 Тл), а також після вимкнення магнітного поля та витримки зразка впродовж певного часу (після релаксації структурних характеристик поверхні).

Завдяки застосуванню віброзахисної платформи та плавному вмиканню джерела магнітного поля вдалося запобігти зсуву досліджуваної ділянки. Також під час вимірювань встановили контрольні точки на поверхні зразка, щоб забезпечити сканування тієї ж області. Керування приладом Solver Pro та обробка результатів дослідження структури поверхні плівкових зразків методом СЗМ здійснювалася з використанням програми Nova (рис.2.4). Прилад Solver Pro має ще ряд режимів роботи, в тому числі режим магніто-силової (МСМ) мікроскопії.



Рис. 2.3. Загальний вигляд приладу Solver Pro. Адаптовано з роботи [4]:

- 1 – блок живлення електромагніту; 2 – термостат;
- 3 – система відеоспостереження; 4 – віброзахисна платформа;
- 5 – блок підведення і сканування; 6 – платформа;
- 7 - генератор магнітного поля; 8 - СЗМ контролер та вимірювальна голівка;
- 9 – блок живлення

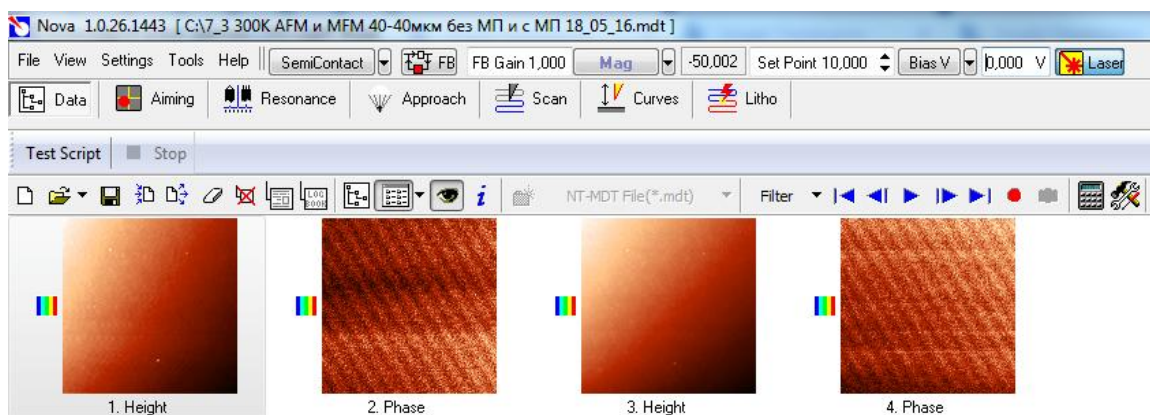


Рис. 2.4. Зовнішній вигляд програми Nova. Адаптовано з роботи [4]

### 2.3. Методика дослідження магніторезистивних властивостей

Вимірювання магнітоопору здійснюється за стандартною 4х-точковою схемою у зразках з паралельною геометрією протікання струму при перпендикулярній, поперечній та поздовжній орієнтаціях індукції магнітного поля відносно площини підкладки (рис.2.5).

Зміна положення геометрій реалізовувалась шляхом повороту зразка у просторі між осердями електромагніту. Розглянемо детальніше методику вимірювання магнітоопору півки. Для встановлення необхідної геометрії було використано модуль, який входить до складу автоматизованого комплексу вимірювання зміни магнітоопору.

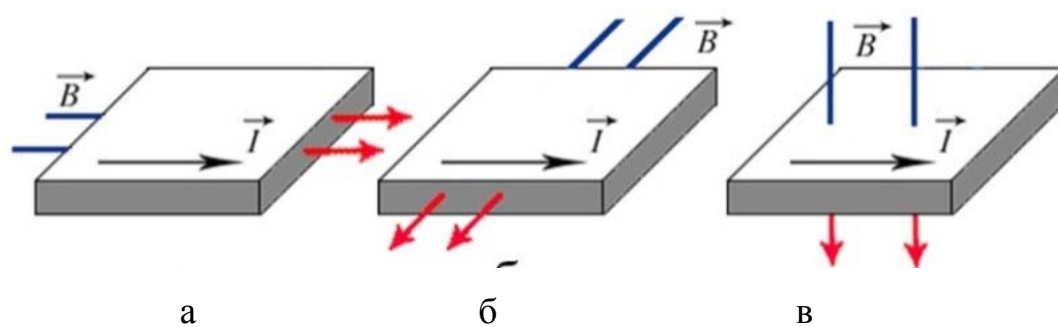


Рис. 2.5. Схеми поздовжньої (а), поперечної (б) та перпендикулярної (в) геометрій вимірювання магнітоопору. Адаптовано з роботи [16]

Комплекс складається з електромагніту, уніполярного блока живлення електромагніту Philips PM 2811, мультиметра для вимірювання опору Keithley 2000 Digital, 12-ти бітного АЦП-ЦАП NI USB 6008, системи реле для зміни полярності магнітного поля та модуля повороту зразка. Структурна схема модуля повороту зразка та його управління приведена на рис. 2.6.

Модуль поміщається між осердям електромагніту (рис. 2.6 а (1)) і складається з консолі (4), на якій закріплено тримач контактів і столик для розміщення зразка (6) та механізму для обертання зразка в магнітному полі (5).





Рис. 2.6. Зображення розробленого модулю для вимірювання МО (а) та вигляд консолі механізму повороту зразка (б): 1 – осердя електромагніту; 2 – модуль збору даних NI USB 6008; 3 – системи реле; 4 – консоль механізму повороту зразка; 5 – поворотний механізм; 6 – столик для закріплення зразка та контакти. Адаптовано з роботи [16]

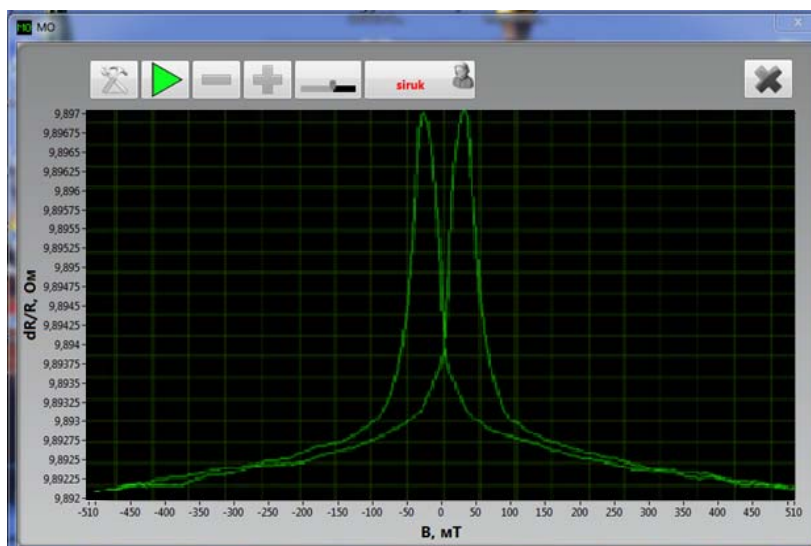


Рис. 2.7. Зовнішній вигляд інтерфейсу програмного забезпечення. Адаптовано з роботи [16]

Контакти виготовлені із золота та мають округлу форму, що зводить до мінімуму опір омичного контакту зі зразком та робить неможливим його пошкодження під час установки у тримач. Розглянутий комплекс управляється за допомогою програмного забезпечення, розробленого у середовищі графічного програмування LabVIEW 2010 SP1. Результат вимірювання відображається на графіку залежності опору від індукції магнітного поля рис. 2.7.

### РОЗДІЛ 3

## ЗАЛЕЖНІСТЬ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ ПЛІВКОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ Co I Ag ВІД ВЕЛИЧИНИ ПРИКЛАДЕНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

У даному підрозділі проаналізовані результати досліджень впливу магнітного поля на морфологію поверхні магнітних плівкових систем на основі кобальту та срібла. Ефекти впливу магнітного поля і магнітної післядії, які суттєво змінюють структуру і властивості наноматеріалів, необхідно враховувати при проектуванні пристроїв наноелектроніки, що функціонують в умовах впливу магнітних полів. Навіть незначні зміни у наноструктурі тонких плівок можуть привести до відмов у роботі приладів.

Проаналізуємо результати дослідження впливу магнітного поля на структурні характеристики поверхні зразків гранульованого плівкового сплаву на основі Co та Ag, що характеризується ефектом ГМО. Зразки плівкових сплавів у широкому інтервалі складу - з концентраціями кобальту  $20 \leq c_{Co} \leq 80$  ат. % товщиною  $d = 35$  нм були отримані методом одночасної конденсації у вакуумі з двох випарників, описаним у попередньому розділі.

Після отримання зразків було проведено дослідження магніторезистивних властивостей у двох геометріях вимірювання (поперечній та поздовжній) при кімнатній температурі у полі до 1,5 Тл. Потім було відібрано зразок з найбільшим значенням гігантського магнітоопору і для нього були проведені дослідження впливу магнітного поля на морфологію його поверхні. Такі зразок представляє найбільший інтерес з точки зору його застосування як чутливого елемента датчика вимірювання величини магнітного поля. Було встановлено, що зразок з концентрацією кобальту  $c_{Co} = 39$  ат.% має найбільшу амплітуду ГМО (рис. 3.1). Проаналізуємо детальніше результати дослідження магнітоопору даного зразка. На рис.3.2 приведено польові залежності магнітоопору зразка плівкового сплаву з концентрацією кобальту  $c_{Co} = 39$  ат.%. Польові залежності були отримані у поперечній та поздовжній геометріях вимірювання при 300К.

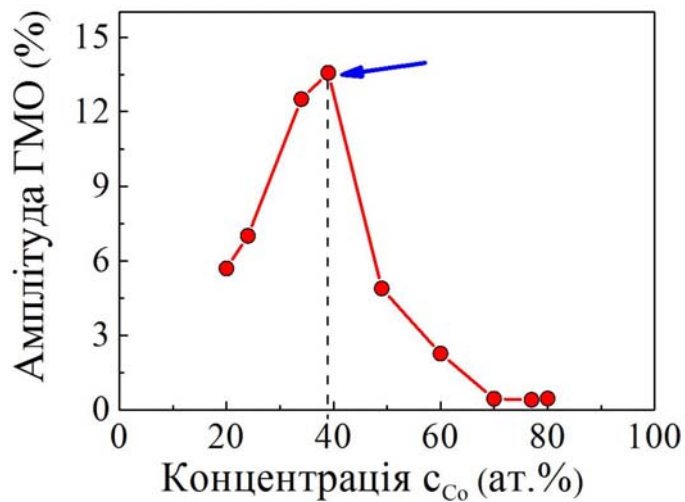


Рис. 3.1. Залежність величини ГМО для зразків плівкового сплаву на основі Co і Ag від концентрації Co ( $c_{Co}$ , ат.%). Вимірювання були виконані у поздовжній геометрії у полі  $H_{\text{макс}} = 1,5$  Тл при  $T_{\text{вимір}} = 300$ К. Адаптовано з [4]

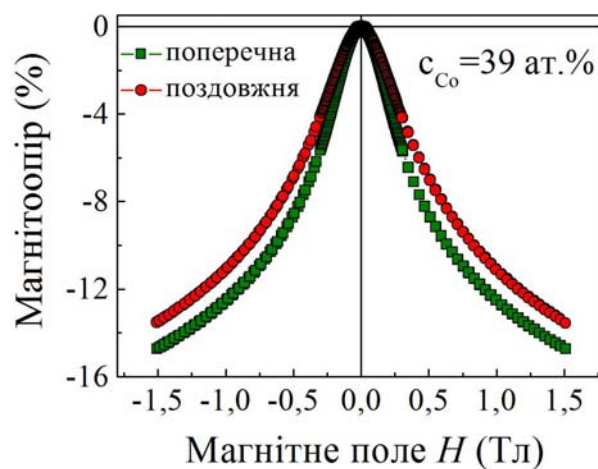


Рис.3.2. Польові залежності магнітоопору, виміряні у поперечній (●) і поздовжній (●) геометріях при  $T_{\text{вимір}} = 300$  К для зразка плівкового сплаву на основі кобальту та срібла при концентрації кобальту  $c_{Co} = 39$  ат.%

Величина ГМО при цьому досягала 14,7% в поперечній і 13,6% в поздовжньої геометрії вимірювання. Як видно з польових залежностей, зображених на рис.3.2 криві мають ізотропний характер та не насичуються у зовнішньому полі 1,5 Тл. Така поведінка є характерною для плівкових магнітних зразків, що складаються переважно з суперпарамагнітних гранул, розміщених у немагнітній матриці.

На другому етапі для визначеного зразка, що характеризувався гранульованою структурою та найбільшою величиною ГМО, було досліджено ефекти впливу магнітного поля на її морфологію поверхні та структурні характеристики. Для цього на поверхні плівки було вибрано учасок та проведено вивчення морфології без дії поля, при дії поля та після впливу поля через деякий час.

На рис.3.3 представлено двовимірне АСМ-зображення морфології поверхні даного зразка до впливу магнітного поля. Тональна гама відображає висоту точок зображення у нанометрах. Завдяки використанню віброзахисної платформи атомно силового мікроскопу, в процесі експерименту вдалося уникнути зсуву досліджуваної ділянки. Також під час вимірювань вибирали контрольні точки на поверхні зразка, щоб забезпечити сканування тієї ж області.

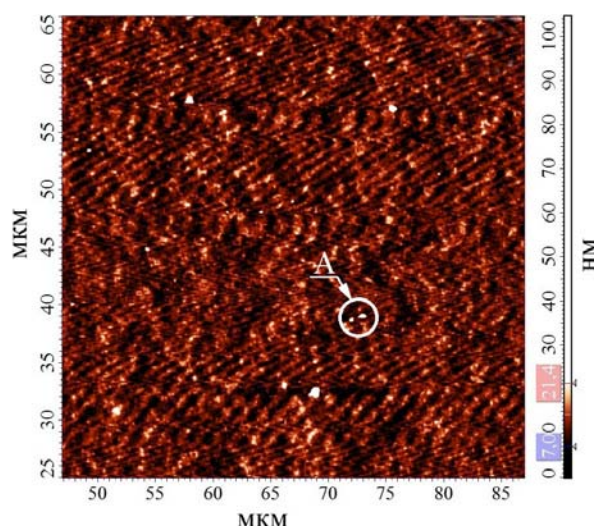


Рис.3.3. АСМ-зображення морфології поверхні зразка тонкоплівкового сплаву на основі Со і Аg з концентрацією Со  $c_{Co} = 39$  ат.% до дії магнітного поля  $H = 0$  кЕ

На рисунку 3.3 виділена область А, для якої вивчалися ефекти впливу магнітного поля на структурні характеристики. Результати змін морфології поверхні тонкоплівкового сплаву з концентрацією  $C_0 c_{C_0} = 39$  ат.%, спричинених застосуванням магнітного поля, наведені на рис. 3.4 у вигляді двовимірних та тривимірних зображень. Також були отримані зображення морфології поверхні після припинення впливу магнітного поля та 18 годин релаксації.

Дослідження дозволили оцінити основні закономірності впливу магнітного поля на середньоарифметичну шорсткість  $R_a$  зразка.

Результати зазначених вимірювань структурних параметрів були отримані за допомогою програмного забезпечення Nova.

Середня арифметична шорсткість  $R_a$  поверхні визначалась як середнє значення модуля виміряних відхилень висоти точок на поверхні зразка від їх середнього значення. Ця характеристика поверхні обчислювалася за співвідношенням:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j| \quad (3.1)$$

де  $N$  - кількість точок на профілі АСМ зображення поверхні зразка;

$r_j = z_j - \bar{z}$  - значення відхилень висоти  $j$  - ї точки на цьому профілі від його середнього значення.

Аналіз отриманих результатів показав, що морфологія поверхні залежить від величини напруженості магнітного поля. Крім того, перше застосування магнітного поля мало найсуттєвіший вплив на зміну морфології поверхні. Після першого застосування магнітного поля з величиною  $H = 0,01$  Тл, шорсткість  $R_a$  зменшилась на 19% (рис.3.5). Збільшення магнітного поля до  $H = 0,1$  Тл і подальша релаксація не суттєво змінили структурні характеристики поверхні порівняно зі значеннями, отриманими після першого застосування зовнішнього магнітного поля. Отже, можна припустити, що після першого застосування магнітного поля структура перейшла в новий стабільний стан.

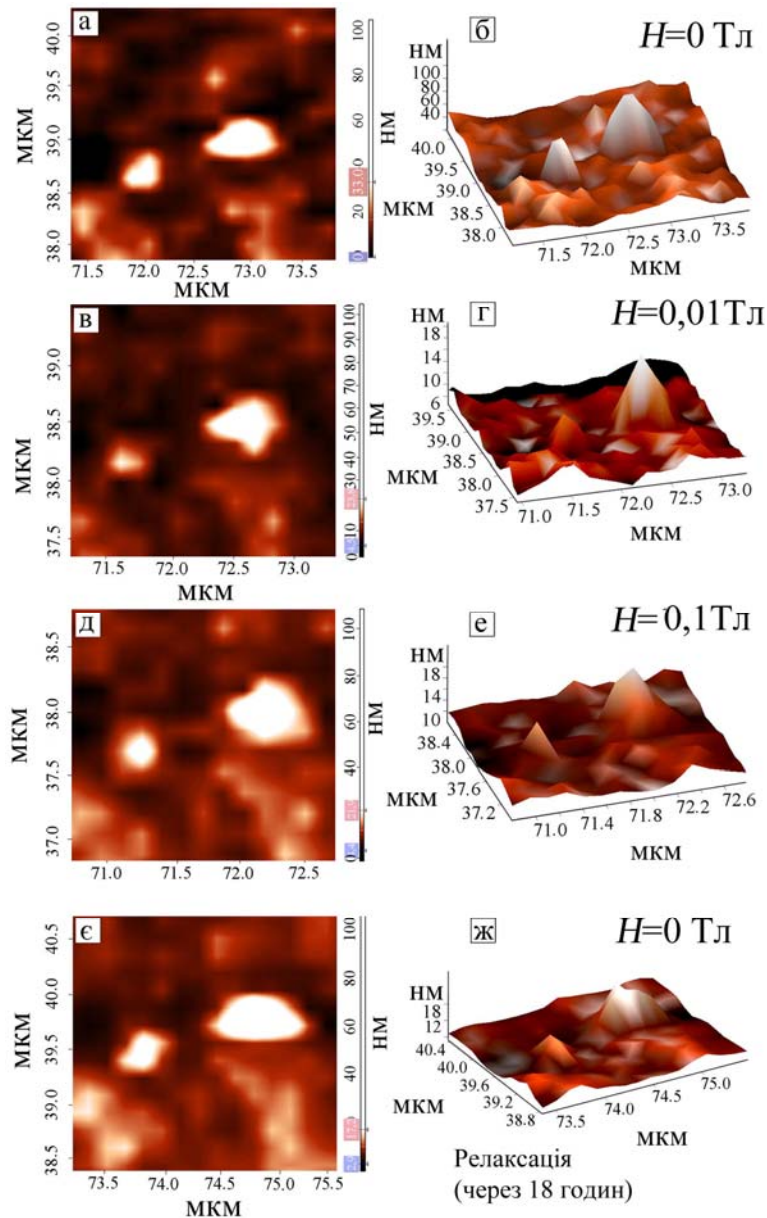


Рис. 3.4. Двовимірні (а, в, д, е) та тривимірні (б, г, е, ж) зображення морфології поверхні гранульованого тонкоплівкового сплаву на основі Со і Аг з концентрацією Со  $c_{\text{Co}}=39$  ат.% до дії магнітного поля ( $H = 0$  Тл (а, б), у магнітному полі  $H = 0,01$  Тл (в, г),  $H = 0,1$  Тл (д, е), а також при релаксації (через 18 годин) за відсутності магнітного поля при  $H = 0$  Тл (е, ж). Зображення відповідають ділянці А, виділеній на рис. 3.3

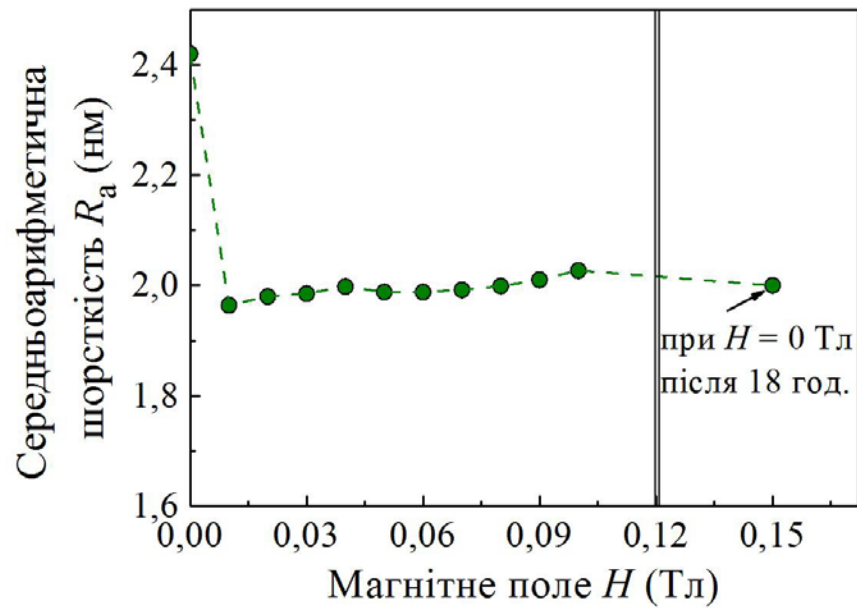


Рис. 3.5. Залежність середньоарифметичної  $R_a$  шорсткості зразків тонкоплівкового сплаву на основі Co і Ag при  $c_{Co}=39$  ат.% від величини прикладеного магнітного поля

Зміну структурних характеристик під впливом магнітного поля можна пояснити таким механізмом. У початковому стані, перед впливом магнітного поля, плівка перебуває в стані, який характеризується підвищеною структурною дефектністю. Будь-який вплив, включаючи переманічування, може призвести до часткового зменшення кількості дефектів і переходу системи в більш стабільний стан, який має властивості, відмінні від початкового стану.



## ВИСНОВКИ

1. В ході роботи було проведено літературний огляд за темою роботи. Розглянуто фізичний зміст та ознаки таких явищ магнітних наноструктур як магнітна анізотропія та гігантський магнітний опір, ефект Холла.
2. Розглянуто приклади застосування магнітних плівкових систем у ГМО – датчиках та інших приладах спінтроніки: в якості запам'ятовувального елемента пам'яті MRAM, спін-електронного сенсора позиціювання й руху, ГМО-MEMS – датчика прискорення та кутового датчика.
3. Розглянуто методику отримання зразків одночасним випаровуванням з двох незалежних випарників у вакуумі. Осноєно методики дослідження магнітоопору та дослідження впливу магнітного поля на морфологію поверхні плівкового зразка.
4. Проведено вивчення та аналіз результатів впливу зовнішнього магнітного поля на морфологію поверхні та структурні характеристики гранульованих тонкоплівкових сплавів на основі Co і Ag. Визначено, що навіть при відносно невисокій напруженості  $H = 0,01$  Тл перше застосування магнітного поля має найбільш значний вплив на зміну морфології поверхні, а саме – зменшення параметрів середньоарифметичної шорсткості поверхні.
5. Встановлено, що повторна дія магнітного поля з більш високою напруженістю поля (до  $H = 0,1$  Тл) викликає набагато слабші зміни таких структурних характеристик. Спостережувані ефекти можуть бути пов'язані з зменшення кількості дефектів і переходу системи в більш стабільний стан, який має властивості, відмінні від початкового стану.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. K. Sato, E. Saitoh. Spintronics for Next Generation Innovative Devices. – Wiley, 2015. – 255p.
2. I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel., Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications. Sensors. – 2016. - V. 16. – P. 904-928.
3. J. Tang. – American Scientific Publishers. Magnetotransport in Nanogranular Materials. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. 2004, Vol. 4. – pp. 29-41.
4. I.O. Shpetnyi, V.Ya.Pak, Yu.O. Shkurdoda ., Influence of the magnetic field on the structural characteristics of granular  $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$  thin film alloys. Thin Solid Films. – 2021. – V. 724. – P. 138613-1 – 138613-8.
5. Васильєв М. А. Особливості пластичної деформації металів та сплавів у магнітному полі. Успіхи фіз. мет. - 2007. - Т. 8. - С. 65 - 105.
6. Gorobets O.Yu. Nanoscale Surface Deformation of the Granular  $\text{Co}_{25}\text{Ag}_{75}$  Films., O.Yu. Gorobets, Yu.I. Yakymenko, A.F. Kravets., Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2015. – V. 37, № 11. – P. 1477 – 1486.
7. О.І. Товстолиткін, М.О. Боровий, В.В. Курилюк, В.В. Куницький., Фізичні основи спінтроніки: [навчальний посібник]. - Вінниця: Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
8. T.R. Mcguire, R.I. Potter., Mcguire T.R. Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys. - IEEE Transactions on magnetics. – 1975. – V. 11, № 4. – P. 1018 – 1038.
9. A. Johnson, H. Siegle, H. Hahn., Magnetic Anisotropies in Nanostructured Matter. - P. Weinberger. – Warsaw: CRC Press, 2009. – 299 p.
10. I.O. Shpetnyi, S.I. Vorobiov, D.M. Kondrakhova., Correlation between the structural state and magnetoresistive properties of granular  $\text{Co}_x\text{Ag}_{100-x}$  alloy thin films., Vacuum. – 2020. – V. 176. – P. 109329-1 – 109329-6.
11. L. Jogschies, D. Klaas, R. Kruppe., Recent Developments of Magnetoresistive Sensors for Industrial Applications., Sensors. – 2015. – V. 15. – P. 28665-28689.

12. R Weiss, R. Mattheis, G. Reiss., Advanced giant magnetoresistance technology for measurement applications., *Meas. Sci. Technol.* – 2013. – V. 24. – P. 082001-01 – 082001-17.
13. S. Arana, N. Arana, F.J. Gracia, E. Castano., High sensitivity linear position sensor developed using granular Ag-Co giant magnetoresistances., *Sens. Actuator A-Phys.* – 2005. – V. 123–124. – P. 116- 121.
14. Проценко І.Ю., Чорноус А.М., Проценко С.І. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів [навч. посібник]. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 264 с.
15. I.O. Shpetnyi, D.M. Kondrakhova, S.I. Vorobiov, B. Scheibe, V.I. Grebinaha, D.O. Derecha, Yu.I. Gorobets, I.Yu. Protsenko., The structural-phase state and magnetoresistive properties of thin film alloys obtained by co-evaporated Cu and Co., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2019. – V. 474. – P. 624 – 631.
16. М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, Д.М. Костюк., Магніторезистивні властивості спін-вентильних структур на основі Со та Си або Аи., *Ж. нано- та електрон. фіз.* – 2011. – Т. 3, № 4. - С. 106 - 113.