

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

Кафедра, електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ
БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР**

Магістрант гр. ЕПмдн-81к

Т.О. Шакур

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

І.М. Пазуха

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

І.Ю. Проценко

Суми – 2019

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивчення принципів формування багатошарових магнітних структур та визначення галузей їх практичного застосування.

Для формування багатошарових плівкових структур був використаний метод пошарової електронно-променевої конденсації у вакуумі (прилад ВУП-5М). Для дослідження магніторезистивних властивостей був використаний метод високоточної резистометрії.

У результаті проведеного аналізу літературних даних встановлено, що можна виділити три основні типи багатошарових магнітних структур, які використовуються при формуванні чутливих елементів спінтроники, магнітоелектроніки та сенсорної техніки: багатошарові плівкові системи загального типу, багатошарові плівкові системи періодичного типу (мультишари) та комбіновані багатошарові плівкові системи. Основними галузями застосування багатошарових магнітних наноструктур є сенсори магнітного поля різного призначення та магніторезистивна оперативна пам'ять.

Робота викладена на 33 сторінках, зокрема містить 18 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 26 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БАГАТОШАРОВІ МАГНІТНІ
НАНОСТРУКТУРИ, СПІН-ВЕНТИЛІ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ
ВЛАСТИВОСТІ, СЕНСОР МАГНІТНОГО ПОЛЯ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНА
ОПЕРАТИВНА ПАМ'ЯТЬ.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР	6
1.1. Типи багатошарових магнітних наноструктур	6
1.2. Особливості формування магнітних наноструктур спін-вентильного типу	8
РОЗДІЛ 2. ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР	11
2.1. Датчики магнітного поля різного призначення	11
2.2. Магніторезистивні плівкові елементи для запису інформації на основі багатошарових магнітних наноструктур.....	17
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	23
3.1 Методика отримання зразків та дослідження магніторезистивних властивостей	23
3.2 Результати досліджень магніторезистивних властивостей	27
ВИСНОВКИ	30
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	31

ВСТУП

Сучасний етап розвитку сучасного приладобудування та нових галузей електроніки характеризується активним пошуком принципово нових підходів до створення енергонезалежних систем зберігання інформації, що відповідає основному пріоритетному напрямку розвитку науки України «Нові речовини та матеріали». Це пов'язано з тим, що традиційні технології формування елементної бази мікро- та наноелектроніки практично вичерпали свій потенціал.

Одним із шляхів модифікації та вдосконалення елементної бази сучасних напрямків електроніки, сенсорної техніки може бути використання багат шарові магнітні структури різних типів у якості функціональні елементи нового покоління. Пріоритетним напрямком у цьому випадку виступає використання багат шарових магнітних структур, у яких реалізується спін-залежне розсіювання носіїв електричного струму. Такі структури є альтернативою для відомих напівпровідникової елементної бази мікро- і наноелектроніки, сенсорної техніки та дозволяють значно розширити можливості їх практичного використання. У першу чергу це пов'язано з розширенням їх функціональних можливостей, стабільності їх робочих параметрів і характеристик під дією факторів зовнішнього середовища (температура, вологість, механічні напруження тощо) підвищення їх енергоефективності та зменшення ресурсозатратності. У зв'язку з цим ведуться інтенсивні дослідження їх фізичних властивостей (електрофізичних, магніторезистивних, магнітних, магнітооптичних тощо), з урахуванням потреб економіки та створення енергонезалежних систем зберігання інформації

У зв'язку з цим метою даної роботи було вивчення принципів формування багат шарових магнітних структур та визначення галузей їх практичного застосування.

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР

1.1. Типи багатошарових магнітних наноструктур

На сучасному етапі розвитку елементної бази функціональної електроніки можна виділити такі основні типи багатошарових магнітних структур, які використовуються при формуванні чутливих елементів спінтроніки, магнітоелектроніки та сенсорної техніки:

- 1) багатошарові плівкові системи загального типу;
- 2) багатошарові плівкові системи періодичного типу (мультишари);
- 3) комбіновані багатошарові плівкові системи.

Принцип формування перших двох типів багатошарових магнітних структур заснований на чергуванні магнітних і немагнітних шарів. У випадку комбінованих багатошарових плівкових систем їх структура складається із нанорозмірних магнітних шарів у вигляді гранульованих нанокompatитів із магнітних наногранул, впроваджених у немагнітну матрицю, немагнітних прошарків та проміжних шарів твердого розчину [1]. При формуванні магнітних шарів використовуються такі матеріали як, наприклад, Co, Fe, Ni, а при формуванні немагнітних шарів – такі матеріали як, наприклад, Cu, Ag, Au, Cr.

Багатошарові плівкові системи загального типу представляють собою систему, що складаються з магнітних (М) і немагнітних (НМ) шарів, що чергуються. Товщина d як магнітних (d_M), так і немагнітних (d_{HM}) шарів є різною для кожного з шарів. У випадку багатошарових плівкових систем періодичного типу (т. зв. мультишарів) товщина d як магнітних, так і немагнітних (d_{HM}) шарів є фіксованою, тобто $d_M = \text{const}$, $d_{HM} = \text{const}$. Базовою основою мультишарів є «бішар», що представляє собою двошарову плівкову систему типу М/НМ, яка чергується n кількість раз. Схематичне зображення багатошарових плівкових структур різних типів представлена на рисунку 1.1.

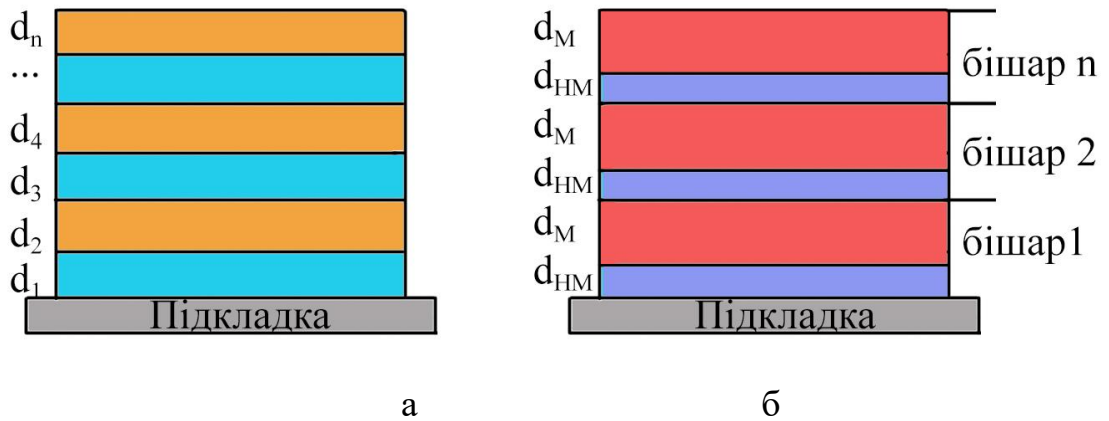


Рисунок 1.1 – Схематична структура багатошарових магнітних наноструктур загального (а) та періодичного (б) типів. М – магнітний шар, НМ – немагнітний шар, бішар – двошарова структура типу М/НМ, d_M і d_{HM} – відповідно товщини магнітного і немагнітного шарів

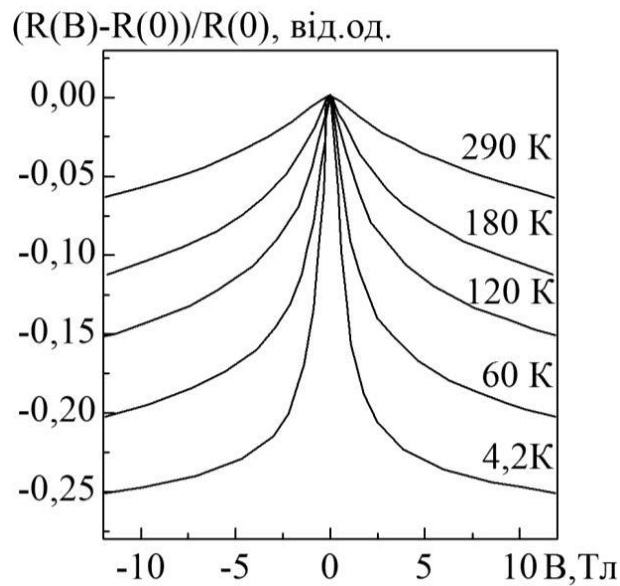


Рисунок 1.2 – Польові залежність магнітоопору у поздовжній та поперечній геометріях вимірювання для мультишарів $[Ag(2,6)/Fe(0,2)]_{75}$, виміряних за різних температур. Адаптовано із роботи [2]

У тому випадку, коли два магнітні шари, розділені шаром немагнітного матеріалу мають антипаралельні вектори намагнічування, то у системі з'являються умови для виникнення спін-залежного розсіювання електронів, процесу який спричиняє появу ефекту гігантського магнітоопору (ГМО). Ефект ГМО полягає у значній зміні електричного опору металевих плівок, які складаються з феромагнітних і провідних немагнітних шарів, при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів [3]. На рисунку 1.2 наведено приклад польової залежності магнітоопору для багатошарової магнітної наноструктури, в якій реалізується явище гігантського магнітоопору.

1.2 Особливості формування магнітних наноструктур спін-вентильного типу

До багатошарових магнітних наноструктур відносяться також і спін-вентильні структури.

Спін-вентильні магнітні наноструктури – багатошарові магнітні наноструктури загального типу, які складаються з двох феромагнітних шарів, що розрізняються утримуючими силами, при цьому антиферомагнітна взаємодія між ними або відсутня взагалі, або незначна. Для послаблення обмінного зв'язку між двома феромагнітними шарами розміщується тонкий (15-50 Å) шар немагнітного провідного шару (це, як правило, благородний метал). У загальному виді спін-вентильні структури можна представити наступним чином: захисний шар/АФШ/ФМ2/НМ/ФМ1/підшар/підкладка, де ФМ1 і ФМ2 – феромагнітні шари (феромагнітні метали Co, Ni або сплав $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$); НМ – немагнітного металевий проміжний шар (Cu, Ag, Au або інший метал з високою провідністю), який розділяє шари феромагнетиків; АФШ – фіксує антиферомагнітний шар, (наприклад, FeMn). Фіксує антиферомагнітний шар створює обмінну анізотропію у феромагнітному шарі ФМ2, у наслідок чого чому вектор намагніченості у ньому може бути

переорієнтований лише в достатньо великих полях (більших за 16 – 24 кА/м), у той час як феромагнітний шар ФМ1 перемагнічується у слабких полях (менших за 1,6 кА/м) [4].

Уперше спін-вентельна структура була виготовлена групою Б. Дені [5] в 1991 р. і представляла собою багатошарову систему $\text{Py}/\text{Cu}/\text{Py}/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$, сформовану на трьох різних типах підкладок: з монокристалу кремнію SiO_2/Si (100) та скляну. Поєднання вільного та закріплено магнітних шарів пермалою дозволило отримати при кімнатній температурі величину гігантського магнітоопору (ГМО) близько 5%. Саме винахід даного типу систем дав початок розвитку нового напрямку функціональної електроніки – спінтроніки [7]. Поєднання різних фізичних ідей для оптимізації робочих характеристик класичної спін-вентельної структури, розробленої Б. Дейні,

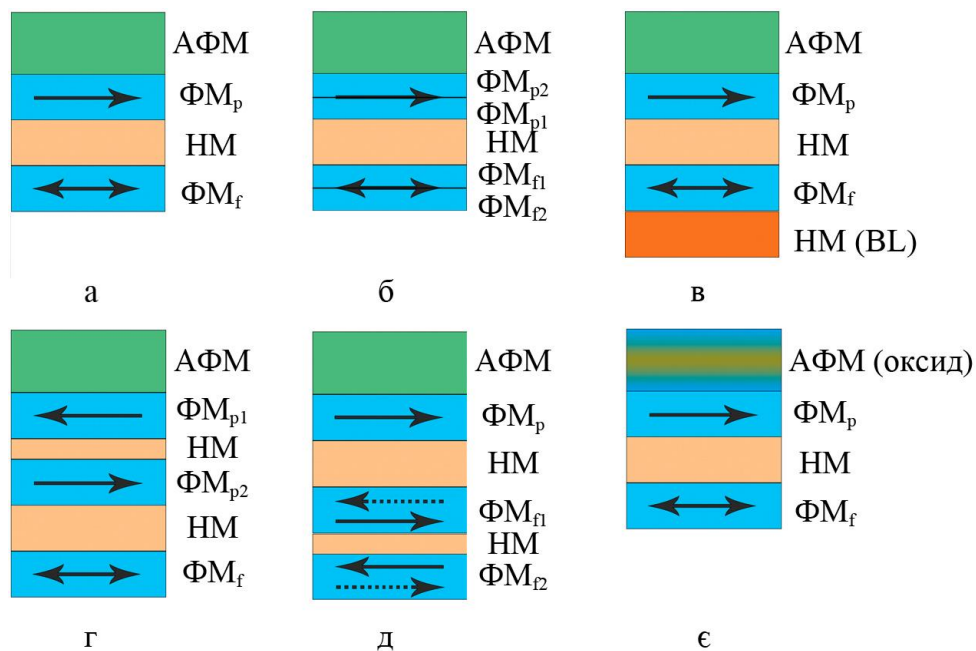


Рисунок 1.3 – Структура класичної спін-вентильної структури (а) та її модифікації: з композитним ФМ шаром (б), спін-фільтр (в), із синтетичним шаром закріпленим (г) або вільним шаром (д), оксидним антиферомагнетиком (е). ФМ_p – феромагнітний закріплений шар; ФМ_f – феромагнітний вільний шар, АФМ – антиферомагнітний шар, НМ – немагнітний шар, BL – «back layer», НО – нанооксидний шар [6]

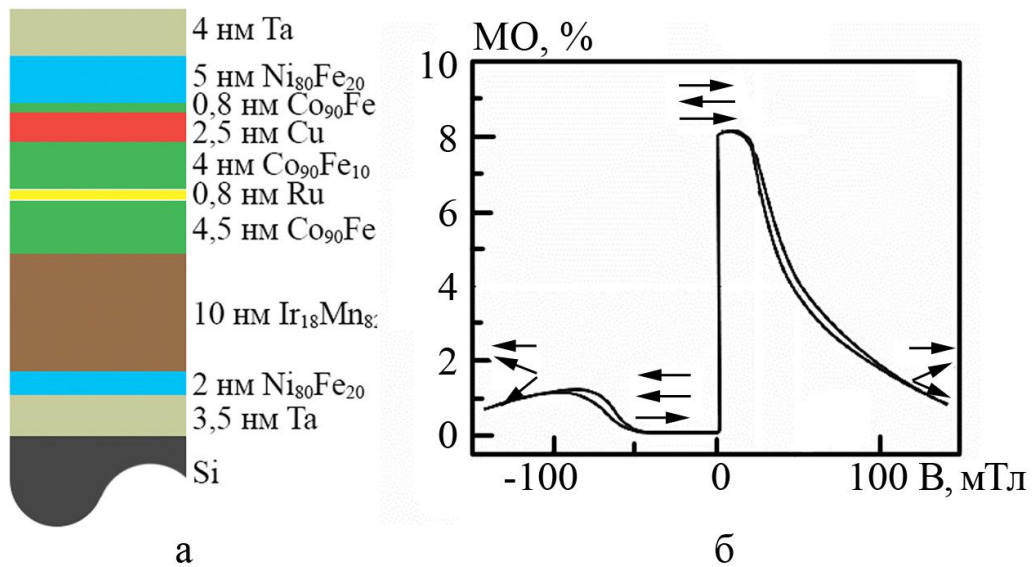


Рисунок 1.4 – Структура спін-вентилію з використанням синтетичного антиферромагнітного шару (а) та його польова залежність магнітоопору, виміряна за кімнатної температури (б). Адаптовано із роботи [6]

шляхом введення додаткових шарів, призвело до появи великої кількості модифікованих варіацій. На рисунку 1.3 представлена узагальнена класифікація спін-вентильних структур різних типів.

До основних робочих характеристик чутливих елементів, сформованих на основі спін-вентильних структур, належить польова залежність електричного опору пристрою [8]. На рисунку 1.4 представлено приклад реальної структура спін-вентилію, а також його робоча характеристика.

РОЗДІЛ 2. ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР

Варіюючи матеріал, товщину і послідовність шарів у багатошарових магнітних наноструктурах, можна оптимізувати їх магнітні та магніторезистивні властивості таких наноструктур, та таким чином розширити область їх практичного застосування [9-11]. Основними галузями застосування багатошарових магнітних наноструктур є сенсори магнітного поля різного призначення (у зчитуючих голівках для жорстких дисків [12], біосенсорах [13], системах збереження даних, в якості приладів контролю швидкості обертання (для систем ABS) чи високого струму у лініях електропередач, у приладах управління позиціонуванням в робототехнічних системах [14]) та магніторезистивна оперативна пам'ять (MRAM) або оперативна пам'ять на основі гігантського магнітоопору GMRAM [15].

2.1 Датчики магнітного поля різного призначення

Застосування багатошарових магнітних наноструктур для виготовлення чутливих елементів датчиків магнітного поля стало потужним поштовхом для подальшого розвитку і мініатюризації мікроелектронних сенсорів вцілому. На сьогоднішній день датчики на основі багатошарових магнітних наноструктур широкого використовуються в різних галузях завдяки високій чутливості та стабільності, а також завдяки тому, що їх робочі характеристики вільні від гістерезису. Немаловажливою перевагою є значне зменшенням габаритів датчики.

На рисунку 2.1 представлено приклад застосування багатошарових магнітних наноструктур при формуванні чутливого елемента датчика для вимірювання поздовжньої деформації. У даному випадку як чутливий елемент використана псевдоспін-вентильна структура. Особливість даного типу спін-вентилів полягає у тому, що різниця у коерцитивності магнітних

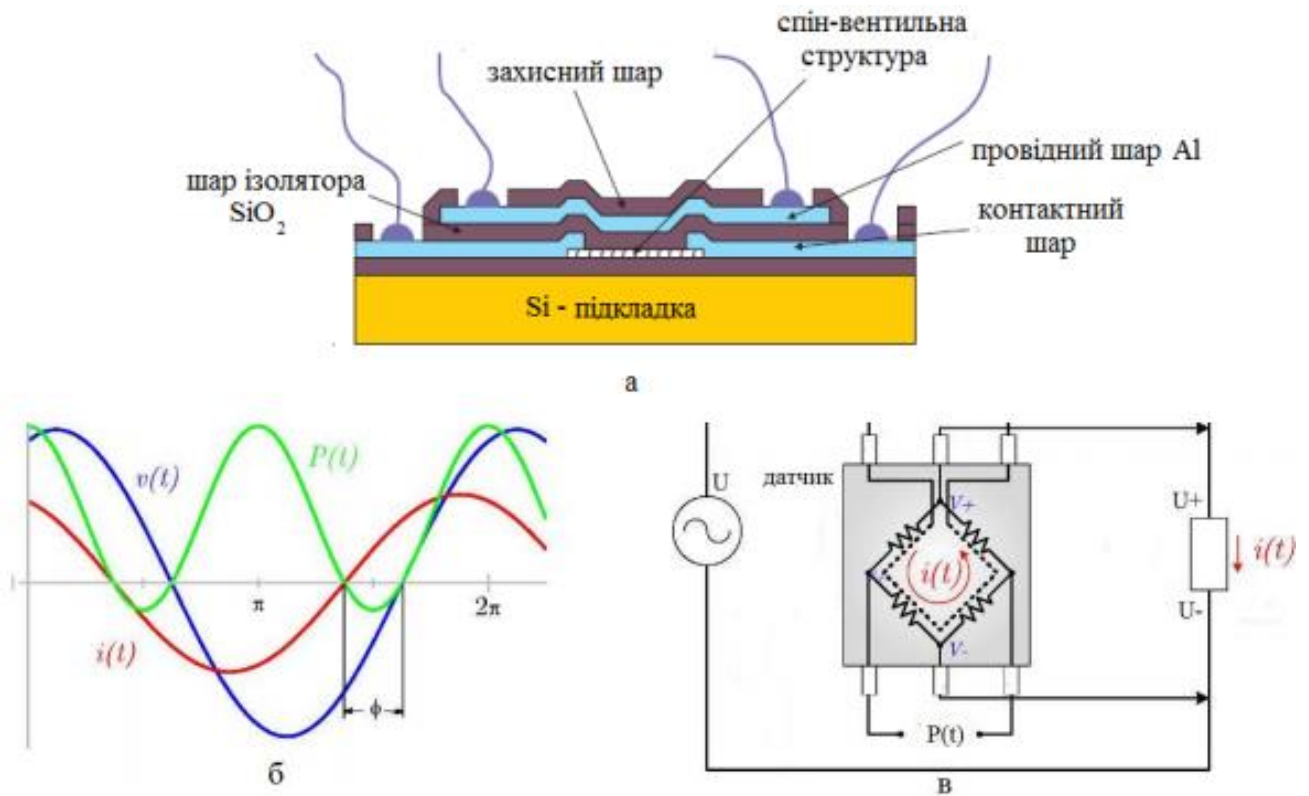


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення структури чутливого елемента датчика, сформованого на основі псевдоспін-вентильної структури, що використовується для вимірювання потужності (а), його робоча характеристика, що представляє собою залежність потужності від часу (б) та можливі конфігурації схеми моста Уїтстона (в). Адаптовано із роботи[16]

шарів досягається шляхом підбору матеріалів з різною величиною коерцитивності, або за рахунок підбору товщини. У даному випадку обидва магнітні шари виготовляються із феромагнітного матеріалу Co, а різницю у коерцитивності обумовлює різна товщина магнітних шарів. На рисунку 2.1 наведена конструкція малопотужного вібраційного плівкового датчика з використанням трьох мостових схем для вимірювання варіацій магнітного поля в X, Y і Z-осях. Перевагою цього датчика є дуже низьке енергоспоживання. На позиції б, рисунку 2.1 представлені робочі характеристики цього датчиків. Для реалізації детектора вібрації датчик сформований на основі моста Уітсона. Даний датчик може бути застосований в електричних лічильниках, електронних диференційних вимірювачах та інтегральних мікросхемах для контролю струму і потужностей. У конструкції датчиків запропонований неінвазивний метод температурної компенсації, що полягає у додаванні до схеми датчика різних схемних елементів, з'єднаних послідовно або паралельно мосту в цілях зниження температурного дрейфу носіїв електричного заряду в ньому [1]. У якості температурного компенсатора застосовується терморезистор, а у якості активних елементів – діоди і транзистори. Додавання одного з вищевказаних елементів призводить до зміни напруги живлення моста за рахунок зміни температури, яку забезпечує компенсаційна схема. Дана компенсаційна схема забезпечує зменшення температурного коефіцієнту чутливості моста Уітсона утричі.

Широке практичне застосування датчики магнітного поля, чутливим елементом яких виступають багат шарові магнітні наноструктури, знайшли у автомобільній промисловості та біомедицині. Такі датчики є високоефективними при безконтактному вимірюванні неелектричних величин (положення, швидкості, струму). Для датчиків положення (кутових або лінійних), швидкості або контролю струму, найбільш доцільним є застосування конфігурації моста Уітстона, в який включено чотири магнітні структури (багат шарові структури періодичного типу або спін-клапанні структури). Така схема приводить до нульового виходу за відсутності

сигнального поля, а також до мінімізації температурної залежності. Були запропоновані дві системи: одна з ГМО елементами (два з яких екрановані, а два інші у керуючих потоках), друга складається з 4 спін-клапанів з окремими рівнями металізації зміщення, що індукує протилежні напрямки намагнічення кожного закріпленого шару в різних плечах мосту [14].

Датчики магнітного поля, у якому як чутливий елемент використані спін-клапанні структури ідеально підходять для вимірювання кутового положення. На рисунку 2.2 наведена типова залежність опору чутливого елемента на основі спін-вентиля від кута (Φ) між векторами намагніченості закріпленого та вільного феромагнітних шарів [17].

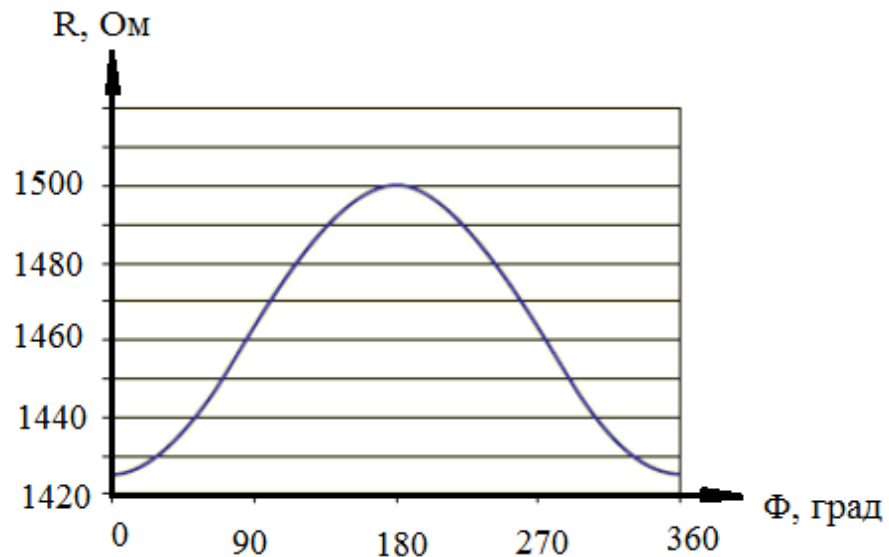


Рисунок 2.2 – Залежність опору системи від кута (Φ) між векторами намагніченості закріпленого та вільного феромагнітних шарів. Адаптовано із роботи [17]

Відомі дві фірми, які займаються розробкою та випуском магніторезистивних датчиків на основі спін-вентилів – Nonvolatile Electronics (NVE) в США та Siemens в Німеччині [18]. У датчику фірми NVE в якості магніторезистивної спін-вентильної структури використовується полоска $\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{65}\text{Co}_{20}$ (4 нм)/ $\text{Fe}_5\text{Co}_{95}$ (1,5 нм)/AgCu(1,5 нм)/ $\text{Fe}_5\text{Co}_{95}$ (1,5 нм)/ $\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{65}\text{Co}_{20}$ (4 нм). Дана структура володіє ГМО-ефектом до 40% при полях 1600Е (128 кА/м) та

до 6% – при 20Е (1,6 кА/м). Застосування плівок ферромагнітного сплаву $\text{Fe}_5\text{Co}_{95}$ призводить до різкого зменшення деградації магніторезисторів на основі спін-вентилів при нагріванні і протіканні сенсорного струму.

На рисунку 2.3 показана блок-схема підключення та роботи гібридного ГМО датчика для керування магнітним екраном на основі спін-вентильної структури [19]. Загальновідомий принцип роботи датчика феррозонду (магнітного екрану) заснований на зсуві петлі магнітного гістерезису чутливого елементу інтегрованого датчика потоку. Чутливий елемент сформований в данному випадку на основі спін-вентильної структури $[\text{Si}/\text{SiO}_2]/\text{Ta}(30)/\text{NiFe}(30)/\text{Co}(10)/\text{Cu}(25)/\text{CoFe}(20)/\text{IrMn}(70)/\text{Ta}(100)$ періодично насичується у двох напрямках за рахунок пропускання струму збудження, який проходить через котушку збудження. Струм збудження генерується за допомогою генератора або зовнішнього джерела коливань. У даній роботі запропоновано структуру гібридного ГМО сенсору, що поєднує в собі ГМО спін-клапан і датчики феррозонду (магнітного екрану).

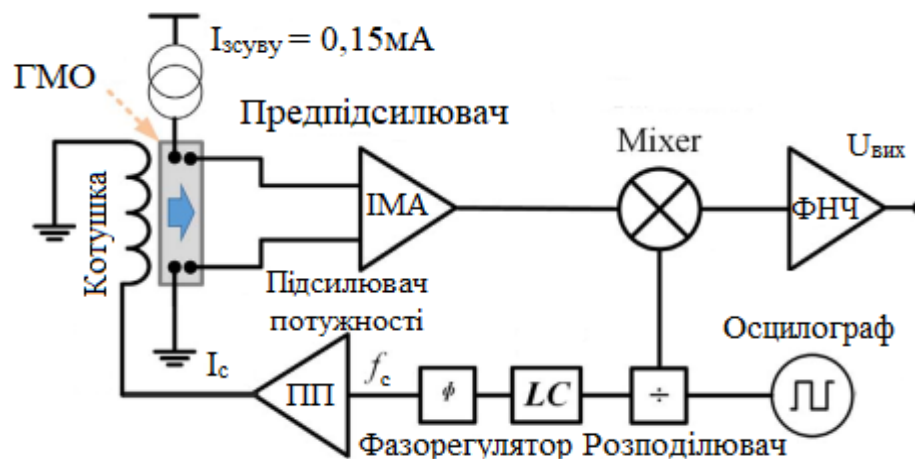


Рисунок 2.3 – Блок-схема підключення та роботи гібридного ГМО датчика для керування магнітним екраном на основі спін-вентильної структури $[\text{Si}/\text{SiO}_2]/\text{Ta}(30)/\text{NiFe}(30)/\text{Co}(10)/\text{Cu}(25)/\text{CoFe}(20)/\text{IrMn}(70)/\text{Ta}(100)$ (товщина в дужках вказана в \AA), де ФНЧ-фільтр низьких частот, ІМА-інтегрована мережева архітектура. Адаптовано із роботи[19]

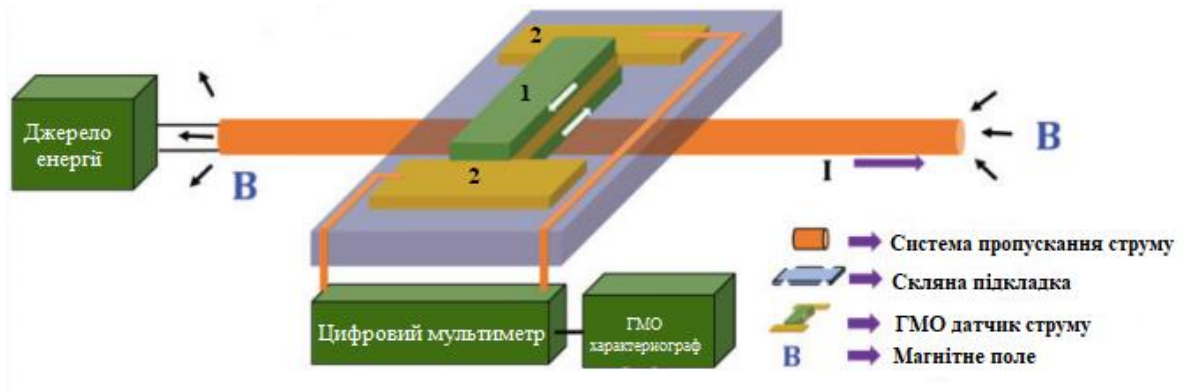


Рисунок 2.4 – Схема розміщення та принцип роботи датчика струму на основі тришарової плівкової системи NiFe/Cu/NiFe (1), розміщеного між двома контактними майданчиками (2). Стрілками вказано напрямок прикладання зовнішнього магнітного поля. Адаптовано із роботи [20]

У роботі [20] був запропонований чутливий елемент датчику струму на основі спін-клапану NiFe(300)/Cu(100)/NiFe(300). Даний датчик широко використовується для вимірювання струму і характеризується високою стабільністю робочих характеристик при безконтактному вимірюванні. Намагніченість шару чутливого елемента зафіксована шляхом прикладання зовнішнього поля величиною $8 \cdot 10^{-3}$ Тл, у процесі осадження. На рисунку 2.4 зображена схема розміщення та принцип роботи датчика струму на основі тришарової плівкової системи NiFe/Cu/NiFe, розміщеного між двома контактними майданчиками.

Чутливість датчику визначалася за кутом лінійної ділянки робочої характеристики. Згідно співвідношення $S = \Delta R / (\Delta H)$ величина чутливості становить 7,6 Ом/Тл [20].

Окремий клас сенсорів, чутливі елементи яких формуються на основі багатошарових плівкових структур, є сенсори принцип роботи яких базується на явищі анізотропного магнітоопору (АМР). Дані сенсори використовуються в автомобільному будівництві та умовах жорсткої експлуатації, для якої характерні перепади температур та високі механічні вібрації. Висока чутливість також дозволяє використовувати АМР-датчики

для детектування слабких полів в навігаційних схемах, в який ефект Холла не застосовується та в якості датчиків кутів повороту.

На рисунку 2.5 наведено спрощені схеми конструкцій датчиків, принцип роботи яких базується на явищі анізотропного магнітоопору. На напівпровідникову підкладку за методикою тонкоплівкового осадження наноситься шар чутливого матеріалу у вигляді стрічки, так, щоб її геометричні розміри задовольняли вимогам $d < b \ll l$, де d – товщина, b – ширина та l – довжина стрічки. При дотриманні цієї умови вектор намагніченості \vec{M} буде мати напрям вздовж плівки, який співпадає з напрямком струму при дії зовнішнього магнітного поля.

На рисунку 2.6 наведено принцип вимірювання кутів. Основні сфери застосування датчиків повороту – автоелектроніка та робототехніка. Також широко використовуються датчики детектування слабких полів на основі АМО.

Основна сфера їх застосування – вимірювання магнітного поля Землі. Для побудови двоосного компаса необхідно використовувати два сенсорних АМР-елемента, які розміщено під кутом 90 один до одного.

Як магнітні матеріали в одношарових АМР-структурах використовується пермалой, а в багатшарових структурах – пермалой та сплави FeNiCo, що мають підвищені значення поля анізотропії. Товщина шарів становить десятки нанометрів. Коерцитивна сила АМР-структур звичайно становить 80 – 160 А/м, а поле магнітної наведеної анізотропії – до кількох сотень А/м для пермалою і до 1,6 кА/м для сплавів з кобальтом. Типова величина коефіцієнта АМР ефекту сягає 1,5–2,0 % для пермалоевих структур і близько 2,0–2,5 % – для FeNiCo – структур.

Важливим фактором є термочасова стабільність магнітних параметрів плівок. Для її підвищення використовується відпалювання у магнітному полі, при якому АМР-структури витримують нагрівання до 573 К.

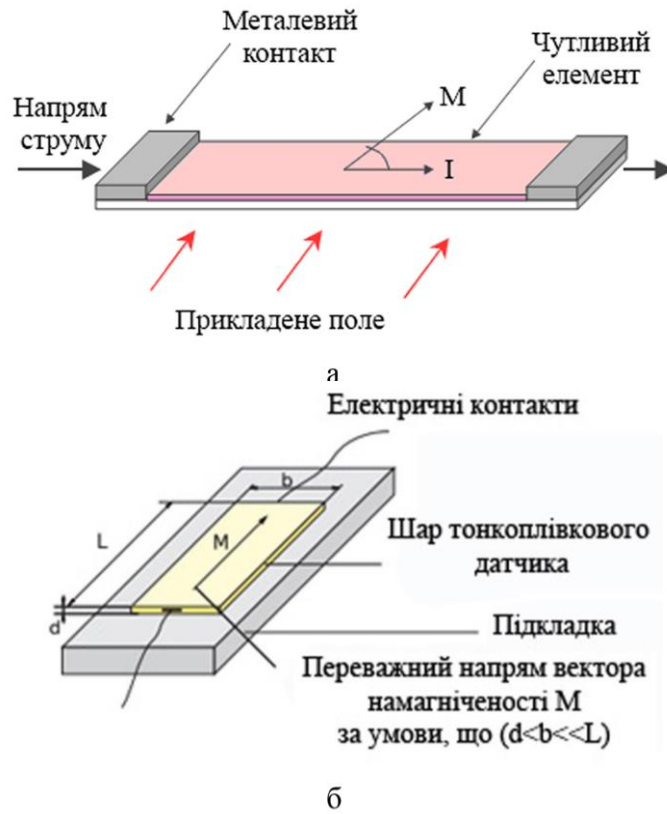


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення тонкоплівкового АМР датчика: а – адаптовано із роботи [21], б – із роботи [22]

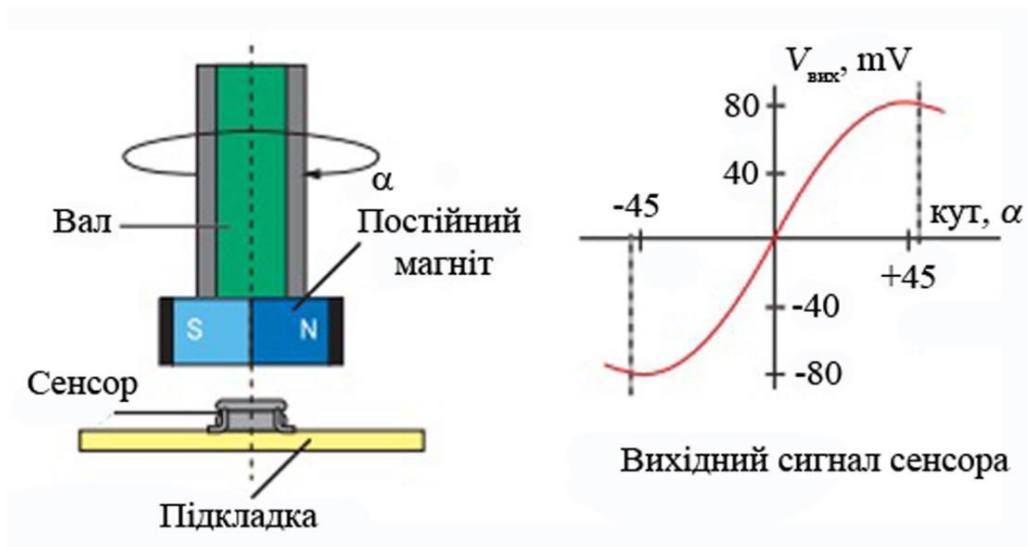


Рисунок 2.6 – Принцип роботи датчика кута повороту. Адаптовано із роботи [22]

2.2 Магніторезистивні плівкові елементи для запису інформації на основі багат шарових магнітних наноструктур

Як було сказано вище багат шарові магнітні наноструктури використовуються для виготовлення магніторезистивної оперативної пам'яті (MRAM) або оперативної пам'яті на основі гігантського магніторезистивного ефекту (GMRAM). Розглянемо принцип роботи магніторезистивної оперативної пам'яті на основі спін-клапанних структур.

Магніторезистивна пам'ять – це один з перспективних типів оперативної пам'яті, поки ще не отримав широкого розповсюдження, але володіє рядом переваг в порівнянні з іншими типами оперативної пам'яті [23]. Особливістю є те, що інформація зберігається за допомогою магнітних моментів, а не електричних зарядів. Кожна комірка магніторезистивної пам'яті (рис. 2.7) зберігає 1 біт даних в магнітному елементі, що складається з двох ферромагнетиків, між якими розташовується тонкий шар діелектрика (чи провідного немагнітного матеріалу). Один з шарів завжди намагнічений в певному напрямку, а намагніченість другого (сенсорного) шару змінюється під дією зовнішнього поля. Зазвичай однакова орієнтація намагніченостей в шарах елемента інтерпретується як «0», в той час як протилежні напрямки намагніченості шарів – як «1» [23]. При вимірюванні електричного опору комірки відбувається зчитування інформації.

Пам'ять організована по принципу сітки, в вузлах якої знаходяться окремі «комірки» пам'яті. Інформацію можна записувати в комірки багатьма способами. В найпростішому випадку, кожна комірка лежить між двох ліній запису, розміщених під прямим кутом одна до одної, одна над коміркою, а інша під нею (рис. 2.8) [23]. Відбувається розробка інших методів запису інформації на MRAM для зменшення розміру магніторезистивної пам'яті та енергоспоживання.

Переваги MRAM: енергонезалежність (здатність зберігати записану інформацію при відсутності зовнішнього живлення), вільний доступ,

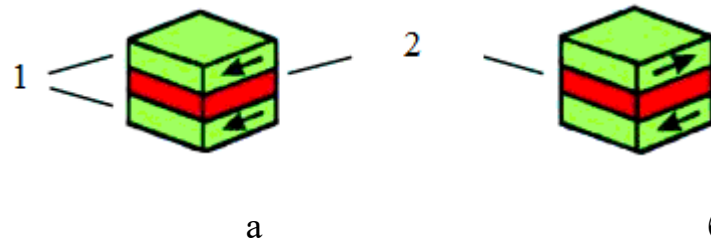


Рисунок 2.7 – Комірка магніто резистивної пам'яті у низько резистивному "0" (а) та високорезистивному стані "1" (б) [24]: 1 – феромагнітні шари; 2 – діелектричний шар

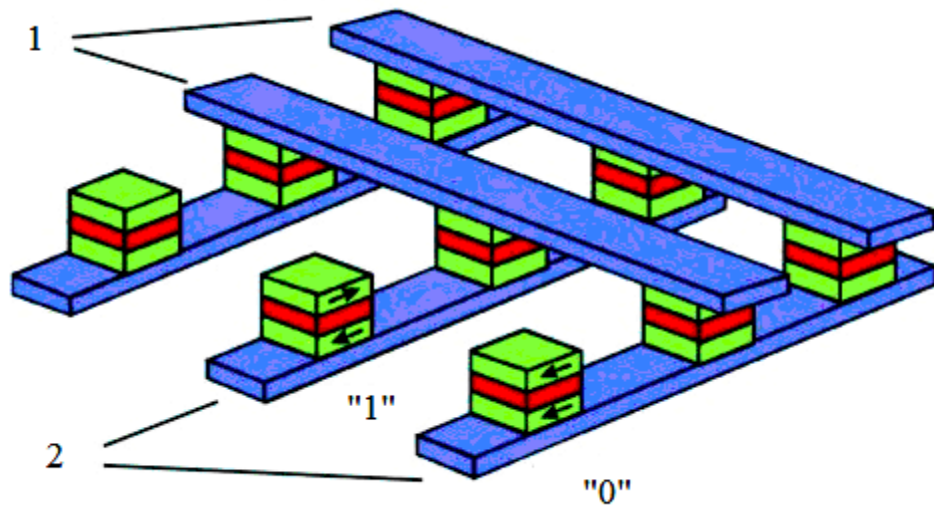


Рисунок 2.8 – Магніторезистивна пам'ять [24]: 1 – лінія стовпця; 2 – лінія рядка

При реалізації магніторезистивної оперативної пам'яті спін-вентильну структуру розміщують у зчитуючій головці, яка сканує жорсткий диск. Намагніченість першого феромагнітного шару вентиля фіксована, а намагніченість другого феромагнітного шару змінюється при зміні магнітного поля жорсткого диска. Стрибок опору при переході до паралельної намагніченості двох шарів дозволяє з високою точністю розрізняти два стани намагніченості системи, яким приписують логічні "0" і "1" [6]. На рисунку 2.9 система зчитування інформації з ГМО-сенсором. Застосування ефекту ГМО для зчитування інформації призвело до підвищення поверхневої щільності запису більш ніж у два рази. Це відкрило шлях для створення зовнішньої пам'яті великої ємності (до 1 Тбайта), а також для виробництва невеликих за розміром жорстких дисків (діаметром до 21,6 мм) для мобільних пристроїв (надлегких ноутбуків) [24]. Для покращення лінійної роздільної здатності, датчик, що складається з одного спін-вентилля, повинен бути розміщений між двома магнітними екранами.

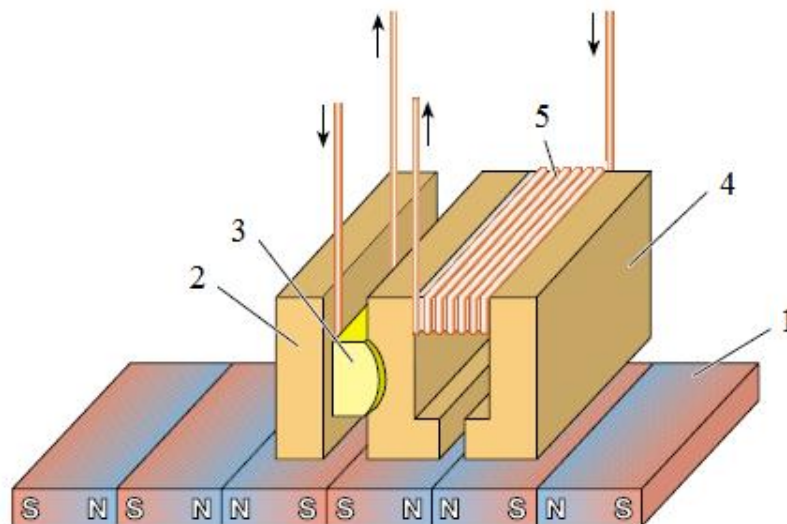


Рисунок. 2.9 – Пристрій для зчитування і запису інформації [6]: 1 – магнітна доріжка; 2, 4 – магнітні екрани; 2 – зчитуючий ГМО-сенсор; 3 – магніто резистивний датчик; 5 – записуючий індуктивний елемент

Ще одним різновидом магніторезистивної пам'яті є GMRAM – гігантський магніторезистивний оперативний запам'ятовуючий пристрій, інтегрована пам'ять типу магнетик-на-напівпровіднику. Псевдоспін-клапанні структури задовольняють вимогам цього типу запам'ятовуючого пристрою [24].

GMRAM володіє на порядок вищими показниками рівня вихідного сигналу, щільності запису та швидкодії, порівняно з іншими типами магніторезистивної пам'яті [9]. Авторами [20] була запропонована наступна струм-у-площині структура псевдо спін-клапана для GMRAM: Ta(5)/NiFe(6,5)/CoFe(1,5)/Cu(3,7)/CoFe(1,5)/NiFe(4,5)/Ta(20). В інтегрованих елементах оперативної пам'яті магнітні елементи повинні забезпечувати задовільні і чітко визначені рівні зчитування і запису у певному діапазоні температур. З цією метою застосовують сплав пермалоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ і $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Методика отримання зразків та дослідження магніторезистивних властивостей

У процесі виконання роботи була сформована багатошарова магнітна структура періодичного типу. Як матеріал шарів були вибрані феромагнітний сплав пермалой $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (Py), який згідно даних літературного аналізу досить часто використовується при формуванні різних типів магнітних наноструктур. Як матеріал проміжних шарів був вибраний немагнітний метал Ag, який характеризується низькою хімічною активністю та гарними провідниковими властивостями.

Одержання структури відбувалося у вакуумній камері приладу ВУП-5М за тиску газів залишкової атмосфери 10^{-4} Па. Пошарове нанесення було реалізоване при використанні методу електронно-променевого осадження з двох незалежних джерел (гармат), розташування яких представлено на рисунку 3.1. Конденсація здійснювалася за кімнатної температури підкладки $T_{\text{п}} = 300$ К з однаковою для пермалой та срібла швидкістю 3-5 нм/с. Як матеріал підкладки було обрано ситалові пластини, які відповідають технічним умовам для нанесення чутливих елементів сенсорів. Розмір підкладок становив 1×1 см.

Для багатошарових магнітних структур періодичного типу важливим є прицезійне вимірювання товщини кожного з шарів, що забезпечується шляхом використання методу кварцового резонатора за співвідношенням:

$$d = \frac{N_q \cdot \rho_q}{\rho_f \cdot f_q^2} \cdot (f_q - f), \quad (3.1)$$

де ρ_q, ρ_f – питома густина кварцової пластини та матеріалу плівки відповідно, у кг/м^3 ; f_q, f – резонансна частота кварцової пластини до та після конденсації відповідно, у Гц; $N_q = 1,668 \cdot 10^3$ Гц·м – частотна константа, яка залежить від кристалографічної орієнтації площини зрізу кварцової пластини.

За методикою описаною вище була сформована багат шарова магнітна структура періодичного типу $[\text{Py}(6)/\text{Ag}(12)]_3/\text{П}$, де П – підкладка, Py – феромагнітний сплав $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, а товщина вказана у дужках у нанометрах).

Для того, щоб визначити можливі галузі застосування сформованої багат шарової магнітної структури, були проведені дослідження її магніторезистивні властивості. Для цього був використаний, розроблений на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики програмно-апаратний комплекс, який дозволяє в автоматичному режимі знімати залежність опору від прикладеного магнітного поля $R(B)$ по чотирьох точковій схемі (з двох точок знімається показники струму, а з двох – напруги і за законом Ома визначається опір. Схематично столик для вимірювання польових залежностей опору наведений на рисунку 3.3. Діапазон вимірюваних полів становив $B = 0 - \pm 500$ мТ [23]. Пропускання струму здійснювалося у площині зразка. Вимірювання проводилися у трьох геометріях: поздовжній (як вектор струму, так і вектор намагніченості магнітного поля, лежать у площині зразка паралельно один одному), поперечній (як вектор струму, так і вектор намагніченості магнітного поля, лежать у площині зразка, але перпендикулярно один одному) та перпендикулярній (вектор струму лежать у площині зразка, а вектор намагніченості магнітного поля - перпендикулярно і площині зразка і напрямку протікання струму). Схематично всі ці геометрії зображені на рисунку

Базуючись на експериментальних даних польової залежності опору, проводилися розрахунки величини магнітоопору (МО) за формулою:

$$\text{МО} = [(R(B) - R(B_0)) / R(B_0)] \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

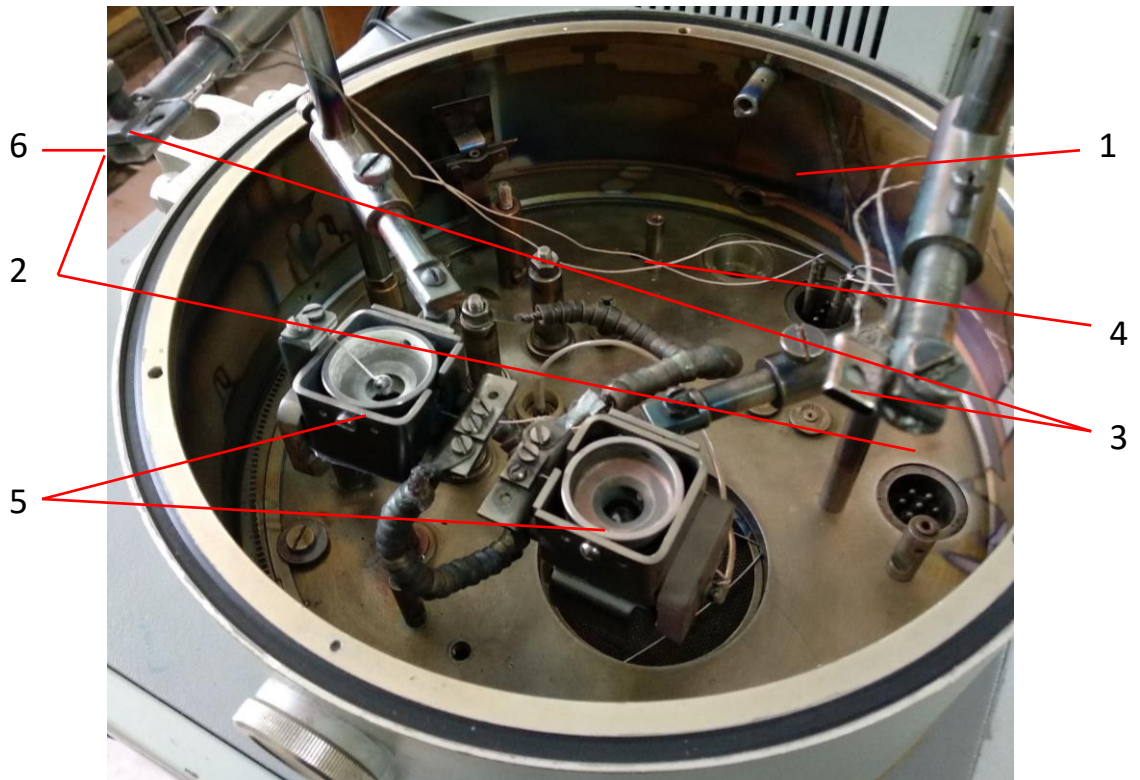


Рисунок 3.1 – Фотознімок робочої камери приладу ВУП-5М: 1 – робоча камера; 2 – підкладкотримач; 3 – кварцовий резонатор для контролю товщини; 4 – термопара для контролю температури підкладки; 5 – електронно-променеві гармати для пошарової конденсації в одному технологічному циклі; 6 – підкладка з ситалу

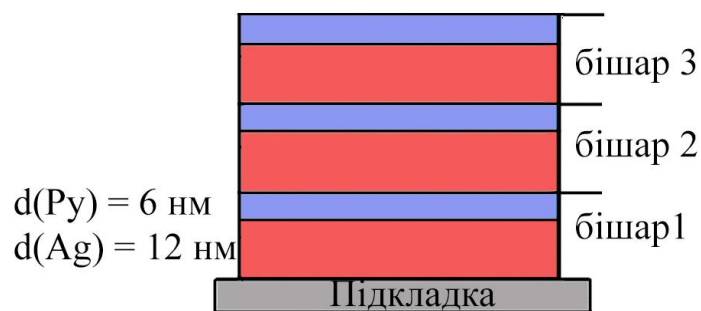


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення сформованої багатошарової магнітної структури періодичного типу $[\text{Py}(6)/\text{Ag}(12)]_3/\text{П}$ (П – підкладка, в дужках товщина вказана у нанометрах)

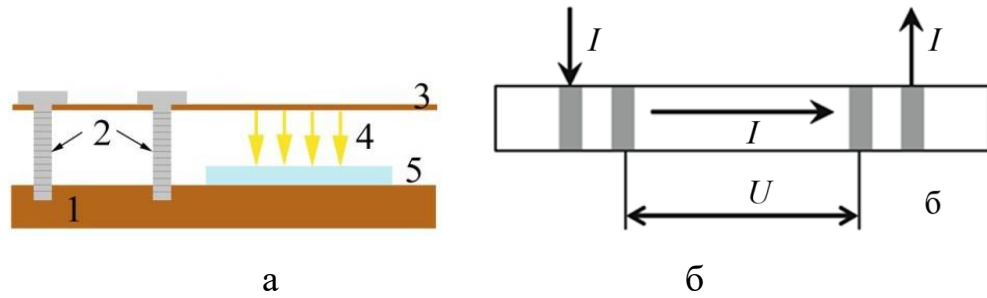


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення столика для вимірювання польових залежностей магнітоопору (а) та чотирьох точкова схема ввімкнення (б): 1 – мідна пластина для забезпечення тепловідведення; 2 – притискні гвинти; 3 – гнучка текстолітова пластина; 4 – контакти; 5 – досліджуваний зразок. Адаптовано із роботи [21]

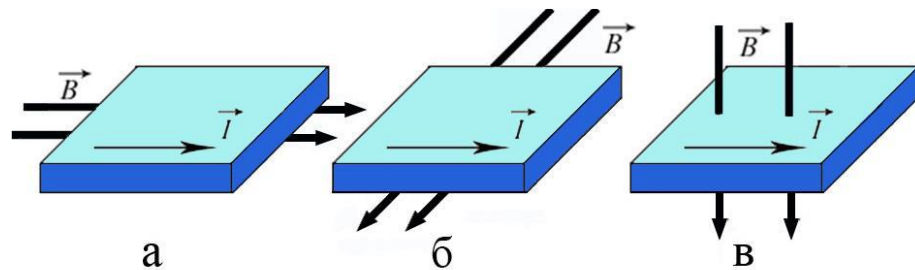


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення геометрій вимірювання магнітоопору: поздовжньої (а), поперечної (б) та перпендикулярної [21]

де $R(B_0)$ – електричний опір за відсутності магнітного поля; $R(B)$ – поточне значення опору плівки в магнітному полі.

Оскільки при використанні багатошарових магнітних наноструктур періодичного типу важливим є їх температурна стабільність, то сформована структура проходила термообробку за температур $T_B = 400$ та 500 К протягом 30 хв. Температура контролювалася за використання термопар. Після кожного з циклів термообробки проводилося вимірювання польових залежностей опору та розрахунок величин МО.

3.2 Результати досліджень магніторезистивних властивостей

На рисунку 3.5 представлені залежності величина МО від прикладеного зовнішнього магнітного поля B , виміряні поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометрії, для сформованої багатошарової магнітної наноструктури періодичного типу $[\text{Pb}(\text{b})/\text{Ag}(12)]_3/\text{P}$ після осадження та витримки за температури 400 та 500 К. У таблиці 3.1 зведені результати розрахунків величини МО за формулою (3.1).

Проаналізуємо отримані залежності. Як видно з рисунка 3.5 для системи після осадження польові залежності мають характер близький до

Таблиця 3.1 – Величина МО для багатошарової магнітної структури періодичного типу $[\text{Pb}(\text{b})/\text{Ag}(12)]_3/\text{P}$ конденсації та витримки за температур 400 та 500 К

Зразок	МО, %								
	Поздовжня геометрія			Перпендикулярна геометрія			Поперечна геометрія		
	300	400	500 К	300	400	500 К	300	400	500 К
$[\text{Pb}(\text{b})/\text{Ag}(12)]_3/\text{P}$	0,28	0,34	0,33	0,24	0,24	0,15	0,20	0,20	0,16

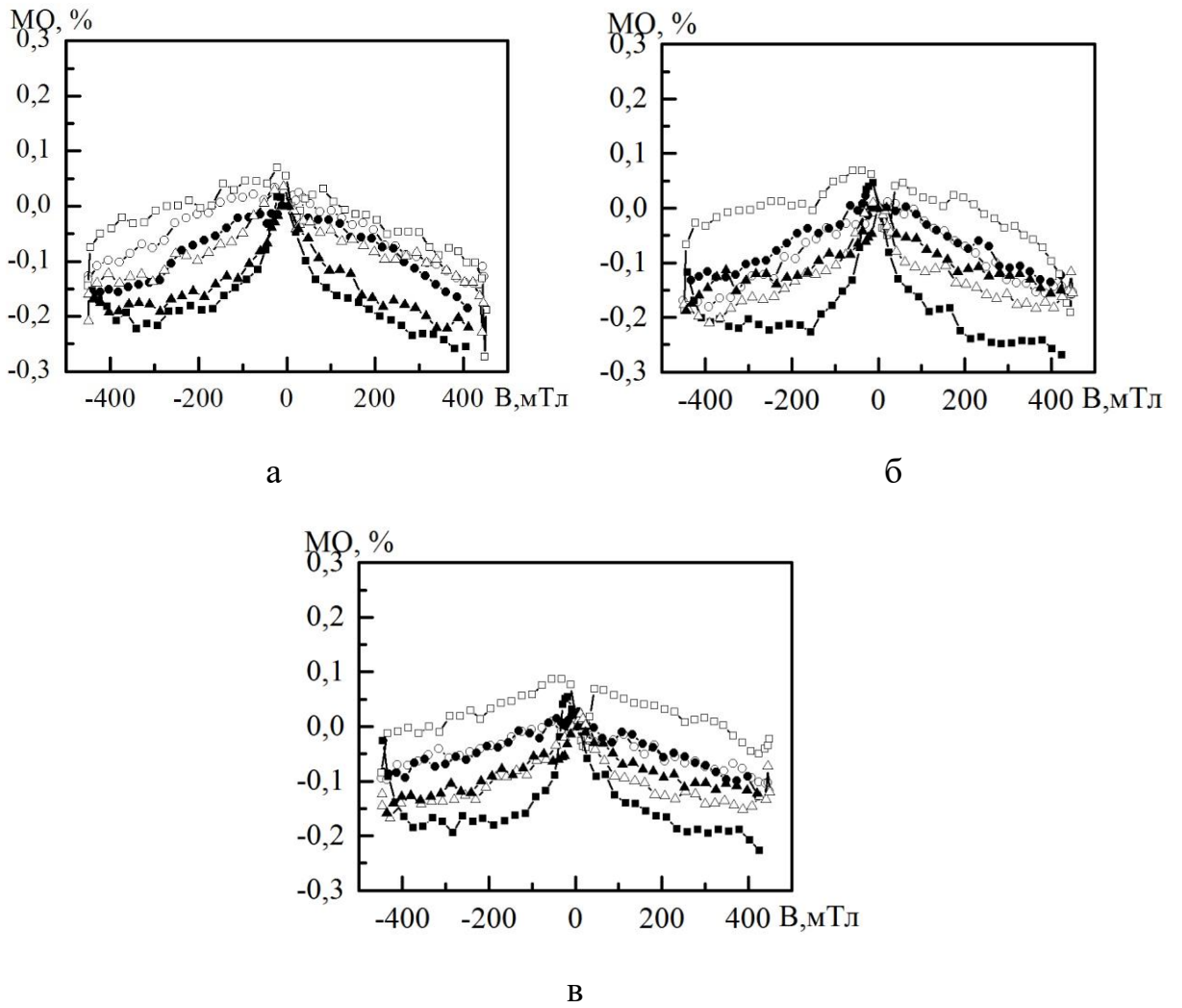


Рисунок 3.5 – Залежність магнітоопору (МО) від прикладеного зовнішнього магнітного поля B для багатошарової магнітної структури періодичного типу $[\text{Ru}(6)/\text{Ag}(12)]_3/\text{П}$ після конденсації (а) та витримки за температур 400 (б) та 500 К для трьох геометрій вимірювання: поздовжньої (●), поперечної (▲) та перпендикулярної (■)

ізотропного, тобто при має місце зменшення величини МО при збільшенні величини прикладеного магнітного поля. При цьому форма залежностей $MO(B)$ фактично ідентична у поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометріях. Величина становить 0,28; 0,24 та 0,20 % відповідно у поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометріях.

Процеси термообробки зразків за температури 400 К протягом 30 хв. не призводить до суттєвих зміни характеру залежностей $MO(B)$ для всіх геометрій вимірювання (рисунок 3.5,б). Величина становить 0,34; 0,24 та 0,20 % відповідно у поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометріях. При збільшенні температури обробки системи до 500 К відбувається незначне падіння амплітуди магніторезистивного ефекту. Величина становить 0,33; 0,15 та 0,16 % відповідно у поздовжній, поперечній та перпендикулярній геометріях.

Аналіз даних, приведених у таблиці 3.1 свідчить про таке:

- 1) величина магнітоопору фактично не залежить від геометрії вимірювання;
- 2) термообробка системи за температури 400 К не змінює величини МО, оскільки ця температура недостатня для активізації процесів заліковування дефектів;
- 3) термообробка системи за температури 500 К призводить до падіння амплітуди магнітоопору, що ймовірно пов'язано з дифузійними процесами, що відбуваються на межі поділу шарів, та призводять до збільшення шорсткості інтерфейсу магнітний/немагнітний шар.

ВИСНОВКИ

1. Одним із шляхів модифікації та вдосконалення елементної бази сучасних напрямків електроніки, сенсорної техніки може бути використання багат шарові магнітні структури різних типів у якості функціональні елементи нового покоління.

2. На сучасному етапі розвитку елементної бази функціональної електроніки можна виділити три основні типи багат шарових магнітних структур, які використовується при формуванні чутливих елементів спінтроники, магнітоелектроніки та сенсорної техніки: багат шарові плівкові системи загального типу; багат шарові плівкові системи періодичного типу (мультишари); комбіновані багат шарові плівкові системи.

3. Основними галузями застосування багат шарових магнітних наноструктур є сенсори магнітного поля різного призначення та магніторезистивна оперативна пам'ять або оперативна пам'ять на основі гігантського магнітоопору GMRAM. Перевагами даного виду пам'яті є швидке зчитування та запис (цикл зчитування-запису 5-70 нс), стійкість (число циклів запису $>10^{15}$).

4. Аналіз отриманих залежностей $MO(B)$ для багат шарової магнітної структури періодичного типу $[Ru(6)/Ag(12)]_3/Pt$ при вимірювання у магнітному полі $B = 0 - \pm 500$ мТ показав, що амплітуда магніторезистивного ефекту не залежить від геометрії вимірювання і становить 0,24 %. Залежності $MO(B)$ мають ізотропний.

5. Процес термообробки за температури 400 К У не змінює величини MO , оскільки ця температура недостатня для активізації процесів заліковування дефектів. У той же час зростання температури обробки до 500 К призводить до зменшення амплітуди магніторезистивного ефекту в середньому у 1,5 рази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Однодворець Л.В. Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки : дисертація... д-р фіз.-мат. наук. – Суми : СумДУ, 2014. – 347 с. – СумДУ.
2. Csontos M. Magnetic and transport properties of Fe-Ag granular multilayers / M. Csontos, J. Balogh, D. Kaptás et. al.// Phys. Rev. B. – 2006. – V.73. – P.184412 – 184421.
3. Куницький Ю. А. Основи спінтроники: матеріали, прилади та пристрої : навчальний посібник / Ю. А. Куницький, В. В. Курилюк, Л. В. Однодворець, І. Ю. Проценко. – Суми : Вид-во СумДУ, 2013. – 127 с.
4. Товстолиткін О. І. Фізичні основи спінтроники : навчальний посібник / О. І. Товстолиткін, М. О.Боровий, В. В. Курилюк, Ю. А. Куницький. – В. : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2014. – 500 с.
5. Dieny B., Speriosu V.S., Gurney B.A., Parkin S.S.P., Wilhoit D.R., Roche K.P., Metin S., Peterson D.T. and Nadim S. Spin-valve effect in soft ferromagnetic sandwiches // J. Mag. Magn. Mater. – 1991. – V. 93 – P. 101-104.
6. Псевдоспін-вентильні структури: принципи формування, магніті та магніторезистивні властивості [Текст]: монографія / І. М. Пазуха, С. І. Проценко, І. В. Чешко, Ю. О. Шкурдода ; за заг. ред. С.І. Проценка та І.М. Пазухи. – Електронне вид. каф. Електроніки, заг. та прикладної фізики. – Суми : СумДУ, 2019. – 157 с.
7. Bakonyi I., Peter L. Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems // Progr. Mater. Sc. – 2010. - № 55. – P.107–245.
8. <http://www.intuit.ru/studies/courses/12180/1173/lecture/24913%3Fpage%3D5> – Основи спінтроники, дата доступу: 17.09.2019 р.
9. Avram M. The optimised spin-valve magnetotransistor / M. Avram, A. M. Avram, R. Vasilco, M. Volmer, A. Popescu, F. Ghiu // Mater. Sci. Eng. B. – 2008. – V. 152. – P. 72.

10. Uhrmann T. Magnetostrictive GMR sensor on flexible polyimide substrates / T. Uhrmann, L. Bar, T. Dimopoulos, N. Wiese, M. Rühlig, A. Lechner // J. Magn. Mater. – 2006. – V. 307. – P. 209.
11. Chen L. Effect of sputtering parameters and sample size on giant magnetoimpedance effect in NiFe and NiFe/Cu/NiFe films / L. Chen, Y. Zhou, Ch. Lei // Mater. Science and Engineer. B. – 2010. – V. 172, № 2. – P. 101–107.
12. Tong Hua-Ching F. The dual spin valve head for high density recording // F. Hua-Ching Tong, Liu, K. Stoev, Y. Chen, X. Shi, C. Qian // J. Magn. Mater. – 2002. – V. 239. – P. 106.
13. Kirschvink J. L. Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism / J. L. Kirschvink, Douglas S. Jones, Bruce J. MacFadden. – New York : Springer Science and Business Media, 2013. – V. 5. – 704 p.
14. Freitas P. P. Spin valve sensors / P. P. Freitas, F. Silva, N. J. Oliveira, L. V. Melo, L. Costa, N. Almeida // Sens. Actuat. – 2000. – V. 2, No 8. – P. 2–8.
15. Wang J.-Q. Fabrication of pseudo-spin-valves and 100 nm sized periodic elements for magnetic memory application / J.-Q. Wang, L.M. Malkinski, Y. Hao, C.A. Ross, J. A. Wiemann, C. J. O'Connor, Charles J. O'Connor // Mater. Sci. Engineer. B. – 2000. – V. 76. – P. 1–5.
16. Reig C. Magnetic field sensors based on giant magnetoresistance (GMR) technology: applications in electrical current sensing / C. Reig, M.-D. Cubells-Beltran, D. Munoz. – 2009. – V.9. – P.7919 – 7942.
17. Katti R. R. Pseudo-spin-valve device performance for giant magnetoresistive random access memory applications / R. R. Katti, A. Arrott, J. Drewes, W. Larson, H. Liu, Y. Lu, T. Vogt, T. Zhu // IEEE Transactions on magnetics. – 2001. – V.37, No 4. – P. 1967–1969.
18. Касаткин С.И. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе / С. И. Касаткин, Н. П. Васильева, А. М. Муравьев. – Москва : Электронинформ, 2005. – 168 с.

19. Van Su Luong. Exchange biased spin valve-based gating flux sensor/ Van Su Luong, Anh Tuan Nguyen, Anh Tue Nguyen / Measurement. – 2018. – V. 115. – P. 173–177.
20. Kondalkar V.V. Current Sensor based on Nanocrystalline NiFe/Cu/NiFe Thin Film / V.V. Kondalkar, Xiang Li, a Sangsik Yang et al. // Procedia Engineering. – 2016. – V. 168. – P.675 – 679.
21. Dimitrova P., Andreev S., Popova L. Thin film integrated AMR sensor for linear position measurements // Sensors and Actuators A. – 2008. – V. 147. – P. 387 – 390.
22. Борисов А. Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей / А. Борисов // Компоненты и технологии . – 2006. – № 7. – С. 65 – 70.
23. http://all-ht.ru/inf/pc/mem_mram.html – Магниторезистивна оперативна пам'ять, дата доступу: 20.10.2019 р.
24. <http://pouyakondori.blogspot.com/2008/08/mram-fastest-ram-till-now.html> – MRAM, fastest RAM till now, дата доступу: 21.10.2019 р.
25. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники / А. Ферт // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 12. – С. 1336-1348.
26. Katti R.R. Current-in-plane pseudo-spin-valve device performance for giant agnetoresistive random access memory applications // Journal of Applied Physics. – 2002. – V.91, №10. – P. 7245-7250.