

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

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**МАГНІТНІ НАНОСИСТЕМИ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ:
ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ**

Студент гр. ЕП-61

О.В. Ромась

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

І.М. Пазуха

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

І.Ю. Проценко

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає у визначенні основних принципів формування багат шарових магнітних структур спін-вентильного типу та аналізі основних галузей їх практичного застосування; а також у проведенні розрахунків величини термічного коефіцієнту опору для псевдо спін-вентильних структур, використовуючи для цього експериментальні дані температурної залежності опору, а також відомі теоретичні моделі.

Вихідною магнітною наносистемою була обрана система псевдо спін-вентильного типу, що складається з двох феромагнітних шарів, розділених проміжним шаром немагнітного матеріалу – Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П, де Py – феромагнітний сплав Ni_xFe_{1-x} при $x = 80$ ат.%, П – підкладка з ситалу. Дана система була одержана методом пошарової електронно-променевої конденсації у вакуумі (прилад ВУП-5М).

У результаті проведених розрахунків величини ТКО для псевдо спін-вентильних систем Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П, було встановлено, що зміна товщини немагнітного прошарку d_{Ag} з 5 нм до 15 нм спричиняє поступово зростання величини β . з $2,00 \cdot 10^{-3}$ до $2,33 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. При цьому макроскопічна модель незадовільно описує електрофізичні властивості (відхилення експериментальних даних від розрахункових становить близько 50 %), що пов'язано з тим, що в системі не зберігається індивідуальність окремих шарів під час відпалювання.

Робота викладена на 33 сторінках, зокрема містить 19 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 35 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТНІ НАНОСИСТЕМИ, СПІН-ВЕНТИЛІ, СЕНСОР МАГНІТНОГО ПОЛЯ, МАГНІТОРЕЗИСТИВНА ОПЕРАТИВНА ПАМ'ЯТЬ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНИХ НАНОСТРУКТУР СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ	5
1.1. Загальні підходи до формування магнітних наноструктур спін- вентильного типу.....	5
1.2. Багатошарові плівки з подвійною коерцитивністю (псевдо спін- клапани).....	7
1.3. Особливості методики формування псевдоспін-вентильних структур зрізною товщиною магнітних шарів.....	8
1.4. Симетрична псевдоспін-вентильна структура та її властивості.....	10
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНИХ НАНОСИСТЕМ СПІН-ВЕНТЕЛЬНОГО ТИПУ	14
2.1. Сенсори неелектричних величин на основі спін-вентильних структур.....	14
2.2. Застосування спін-вентильних структур в електроніці.....	18
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ПСЕВДО СПІН-ВЕНТЕЛЬНИХ СТРУКТУР	22
3.1. Визначення температурного коефіцієнта опору (ТКО) на основі експериментальних даних.....	22
3.2. Апробація макроскопічної моделі для ТКО тришарових структур...	26
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	30

ВСТУП

Сучасна електронно-обчислювальна техніка ґрунтується на використанні пристроїв зберігання, обробки і перетворення інформації. Для створення таких пристроїв твердотільна електроніка застосовує зарядовий стан певних елементів пристрою, який пов'язаний зі збереженням та передачею інформації. Мінімальним об'ємом елемента являється один атом речовини, а мінімальним зарядом в цьому пристрої являється електрон, який може передаватися чи зберігатися у ньому.

Розвиток електроніки на базі напівпровідникових технологій з часом втрачає свій потенціал, це є поштовхом до пошуків нових шляхів виготовлення функціональних елементів електронних пристроїв. В ході цього, знайшовши можливість використовувати значення проекції спіну як одиниці інформації, були виготовлені прилади в основі яких використовували спіновий стан.

Використовуючи матеріали із спін-залежним розсіюванням електронів, слугують для формування чутливих елементів сучасної електроніки і сенсорної техніки. До таких матеріалів можна віднести спін-вентилі різних типів. Такі багатошарові магнітні структури є альтернативою для відомої всім нам напівпровідникової мікро- і нооелектроніки та сенсорної техніки. Ці пристрої мають багато переваг. У першу чергу це розширення їх функціональних можливостей, стабільності їх робочих параметрів і умовами експлуатації під дією (температури, вологості, механічні навантаження та інше)

Уз в'язку з цим метою даної роботи було визначити основні принципи формування багатошарових магнітних структур спін-вентильного типу та проаналізувати основні галузі їх практичного застосування; провести розрахунки величини термічного коефіцієнту опору для псевдо спін-вентельних структур, використовуючи для цього експериментальні дані температурної залежності опору, а також відомі теоретичні моделі.

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНИХ НАНОСИСТЕМ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

1.1 Загальні підходи до формування магнітних наноструктур спін-вентильного типу

Спін-вентильні магнітні наноструктури – структури, що складаються з двох феромагнітних шарів: вільного та закріпленого за рахунок антиферомагнітного шару, нанесеного на його поверхню, розділених шаром немагнітного матеріалу. Основною вимогою до немагнітного спейсера є те, що його товщина повинна бути такою, щоб забезпечити мінімальну обмінну взаємодію між феромагнітними, або досягти її повної відсутності. Якісно класичну спін-вентильну структуру можна представити у вигляді: AF/FM2/NM/FM1, де FM2 і FM1 – шари феромагнітного матеріалу (Co, Ni, Fe або сплави на їх основі); NM – шар немагнітного, як правило благородного металу, який характеризується низькою ступінню розчинності з феромагнітними матеріалами та високою провідністю (Cu, Au, Ag); AF – шар антиферомагнітного матеріалу, який виконує функцію закріплення напрямку намагніченості одного з феромагнітних шарів (FeMn). Схематичне зображення структури класичного спін-клапану представлено на рисунку 1.1.

Закріплений шар створює так звану обмінну анізотропію у шарі FM2, завдяки чому напрямок вектору намагніченості шару FM2 переорієнтується тільки у відносно великих полях. У той же час шар феромагнітного матеріалу FM1 перемагнічується в слабких полях. Оскільки, що зв'язок між шарами феромагнітних матеріалів слабкий, зміна від антипаралельної до паралельної магнітної конфігурації відбувається у слабких магнітних полях. Результатом є те, що дані системи характеризуються високою чутливістю в області слабких магнітних полів.

Поєднуючи різні фізичні ідеї з 1991 року, коли була вперше сформована класична спін-вентильна структура Б. Дейні [1], для оптимізації їх робочих

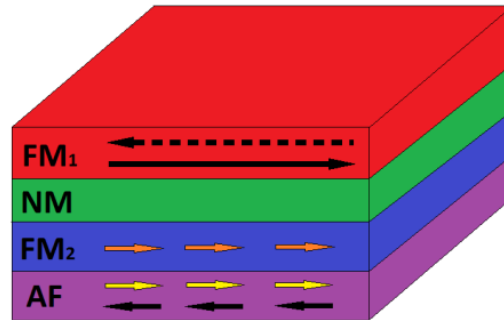


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення шарів класичного спін-клапана AF/FM2/NM/FM1, де FM2 і FM1 – шари феромагнітного матеріалу, NM – шар немагнітного, як правило благородного металу, AFM – шар антиферомагнітного матеріалу, який виконує функцію закріплення напрямку намагніченості одного з феромагнітних шарів. Адаптовано з роботи [2]

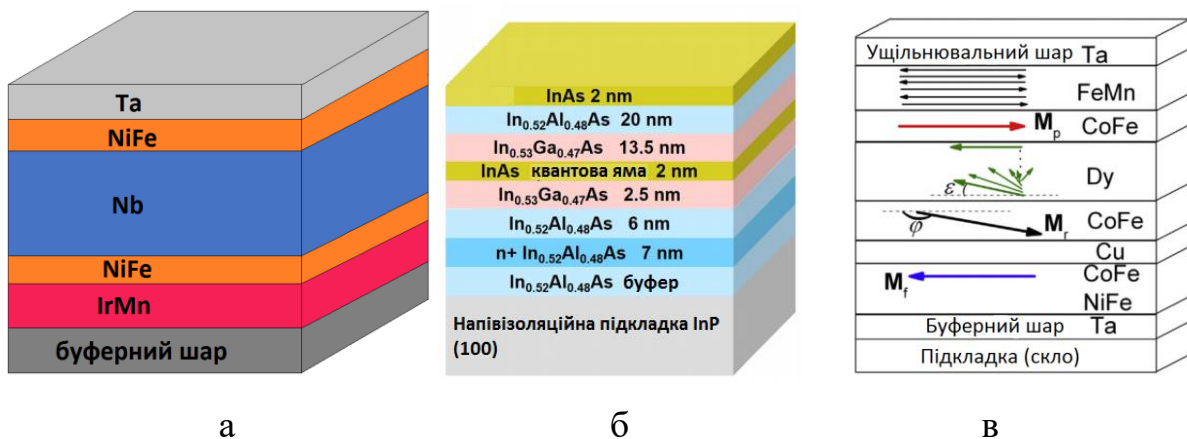


Рисунок 1.2 – Приклади структур модифікованих спін-вентилів: структура з використанням додаткового буферного шару та захисного покриття IrMn/NiFe/Nb/NiFe/Ta (а), нанорозмірна квантова структура спін-вентильного типу на основі гетеропереходів, структура із синтетичним вільним шаром. Адаптовано відповідно з робіт [3-5]

характеристик, були розроблені різні модифіковані варіанти спін-вентильних структур (введення нових шарів, та використання нових матеріалів, у т.ч. напівпровідникових шарів та діелектричних прошарків), приклади яких наведені на рисунку 1.2.

1.2 Багат шарові плівки з подвійною коерцитивністю (псевдо спін-клапани)

Представником таких структур є плівка виготовлена з $Pu/Cu/Co/Cu$, де Pu – це пермалой $Ni_{80}Fe_{20}$. Причина вибору пермалою полягає в тому що його коерцитивна сила менша ніж коерцитивна сила кобальту ($H_c^{Pu} < H_c^{Co}$). Це призводить до того що в певному діапазоні зовнішнього магнітного поля орієнтація сусідніх магнітних шарів буде паралельною (випадок коли $H > H_c^{Co}$), при інших конфігураціях (наприклад у проміжку $H_c^{Pu} < H < H_c^{Co}$), конфігурація шарів буде антипаралельною. Перевагами таких структур є великі показники магнетоопору (десятки відсотків у полях до $100 E$) Виключенням є багат шарові структури $NiFe/Ag$, для яких насичення може досягатися в полях біля $100 E$. Недоліком є те що в слабких магнітних полях, достатніх для перемагнічування шару $Ni_{80}Fe_{20}$, магніторезистивний відгук залежить магнітної передісторії шару Co . До недоліків можна віднести ще й зміну коерцитивної сили пермалоевого шару від впливом магнітостатичної взаємодії з боку кобальтового шару [6].

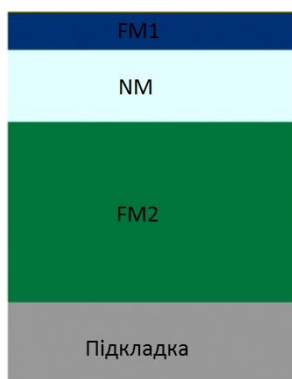


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення шарів псевдо спін-клапана $FM2/NM/FM1$, де $FM2$ і $FM1$ – шари феромагнітних матеріалів, які відрізняються величиною коерцитивної сили, NM – шар немагнітного металу

1.3 Особливості методики формування псевдо спін-вентильних структур з різною товщиною магнітних шарів

Ефективним та простим варіантом виготовлення псевдо спін-вентельної структури є багатошарова структура, яка являє собою чергування шарів типу «магнітний шар 1/немагнітний порошок/магнітний шар 2», схематичне зображення якої наведено на рисунку 1.4. Магнітні шари 1 та 2 виготовляють з таких металів як Co, Fe, Ni або їх сплави, у вигляді тонких плівок. В ролі немагнітного прошарку використовують плівки металу, які мають високу електропровідність, наприклад, Cu, Au, Ag та інші. Особливістю такої псевдо спін-вентильної структури являється те що її магнітні шари 1, 2 виготовлені з одного й того ж матеріалу, на відміну від розглянутих вище структур з магнітними шарами виготовленими з різних матеріалів (див., наприклад, [8-10]). Різниця коерцитивності між шарами забезпечується завдяки розмірному ефекту, тобто намагнічування тонких плівок істотно залежить від товщини та способу виготовлення зразка [7].

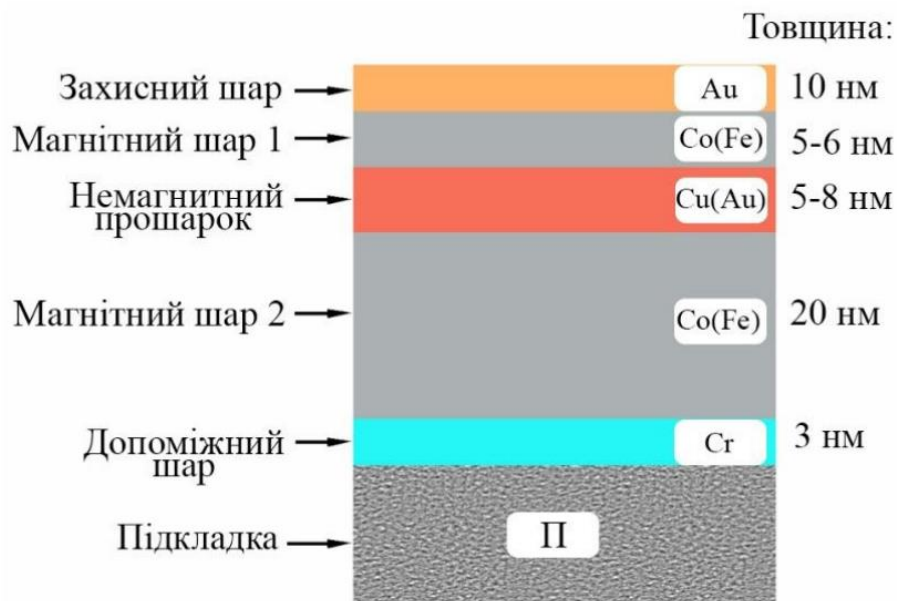


Рисунок 1.4 – Схема формування псевдоспін-вентильної структури на основі магнітних шарів із Co або Fe різної товщини. Адаптовано з роботи [7]

У роботах [11-13] параметри функціональних елементів спін-вентильних структур на основі робочих магнітних шарів Co, які розділені немагнітним прошарком з Cu товщиною 5-6 нм, такі: товщина верхнього магнітоякого шару повинна становити 15-20 % від товщини нижнього магнітожорсткого шару (3-6 та 20 нм відповідно). Завдяки цьому ця структура в магнітному полі виконує функцію спін-вентиля.

Так як верхній шар Co товщій він краще реагує на зміну величини індукції магнітного поля, тому процес перемагнічування цього шару починається в менших полях. Для нижнього шару більшої товщини є характерним більші поля перемагнічування. Тому ефект спін-вентиля проявляється в інтервалі ΔB між початком перемагнічування верхнього і нижнього шарів. В результаті така система при зміні зовнішнього магнітного поля, видає біполярний електричний сигнал високої амплітуди.

Що стосується вибору матеріалів для магнітних шарів і немагнітного порошку, потрібно урахувати ступені розмиття інтерфейсів між ними. У дослідженнях [14, 15] були вивчені магніторезистивні та магнітооптичні властивості структур з тонких плівок Co і Cu та Fe і Ag. У розглянутих системах (рис. 1.2) можливе максимальне значення магнітоопору (див., наприклад [16, 17]) серед варіантів виготовлення псевдо спін-вентильних структур.

Можливе додаткове підсилення різниці характеристик магнітних шарів 1 та 2, завдяки різним методам та умовам отримання. Також застосовують термообробку. У роботах [16, 17] запропоновано отримати тонки плівки Co при різній температурі підкладки ($T_{\text{п}}$). Виготовлення нижнього шару ($d = 20$ нм) одержали при $T_{\text{п}} = 950$ К, а верхній шар ($d = 5-6$ нм) за $T_{\text{п}} = 300$ К. Основою для цього послужили дослідження МОКЕ в одношарових плівках Co, отриманих при різних температурах підкладок що наведені на рисунку 1.5. Це супроводжується тим що коерцетивність плівки виготовленої за високої температури підкладки, приблизно у 5-6 разів більша, ніж у плівках, яка виготовлена при кімнатній температурі підкладки [7].

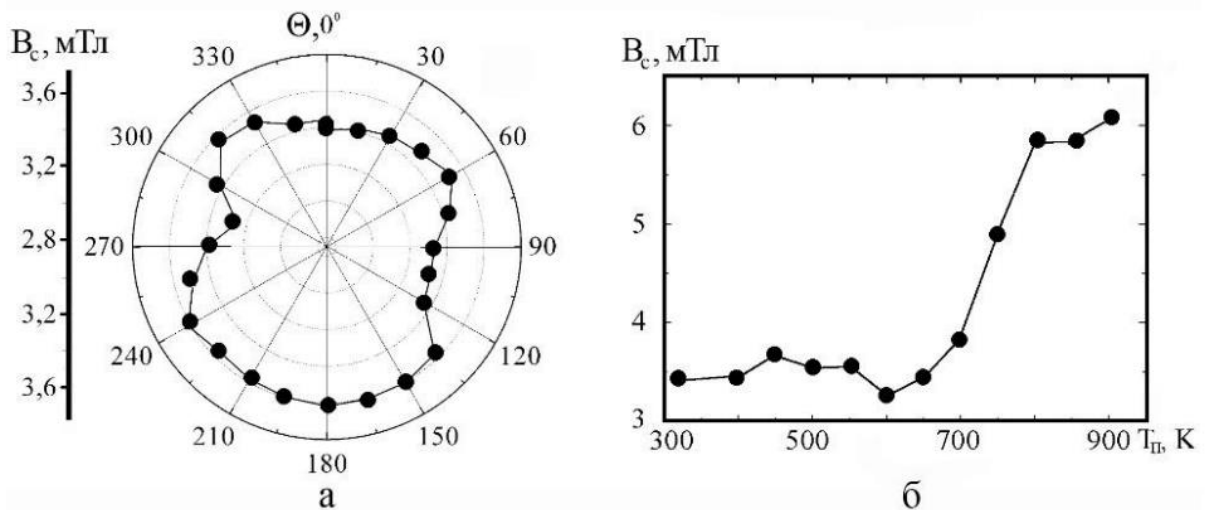


Рисунок 1.5 – Залежність коерцетивності V_c одношарової плівки Co(40)/П від кута повороту зразка Θ за $T_n = 300$ K (а) та температури T_n за $\Theta = 0^\circ$ (б). Із роботи [7]

Такі зразки покриваються верхнім допоміжним (захисним) шаром Au(10) для забезпечення надійного контакту при вимірюваннях опору і зведення на мінімум процесу окиснення робочих шарів Co. Для покращення адгезії зразка на підкладці формується підшар Cr (3). Отримані зразки конденсувалися термічним методом у вакуумі (10^{-4} Па) на попередньо відполіровані ситалові пластини за $T_n = 300$ -950 K, при швидкості конденсації $\omega = 0,1 - 0,2$ нм/с [7].

1.4 Симетрична псевдоспін-вентельна структура та її властивості

При дослідженнях процесів взаємозв'язку з електрофізичними і магніторезистивними властивостями для тришарових плівок зі спін-залежним розсіюванням електронів свідчать про те, що їх можна використовувати як чутливий елемент магнітного поля. На підставі узагальнення результатів комплексних досліджень властивостей та структурно-фазового стану симетричних плівкових систем та псевдо спін-вентильних структур на основі Co, Fe, Fe_xNi_{1-x} , Ag вказують на можливі розробки на їх основі

функціональних елементів з високо стабільними робочими характеристиками які будуть використовуватися в області підвищених температур.

Виходячи з особливостей спін-вентильних структур, яка полягає в тому що, для отримання потрібної конфігурації намагніченості використовується не осцилювальна обмінна взаємодія, а зовнішнє магнітне поле (див.,наприклад [18-21]), автори роботи [7] запропонували сформувати подвійну (симетричну) псевдоспін-вентильну систему, схематичне зображення якої наведено на рисунку 1.6. Особливістю ново розробленої структури є наявність одного магнітом'якого шару, який розміщений між двома магнітожорсткими шарами. Наявність двох не магнітних шарів забезпечує незалежне перемагнічування магнітом'якого шару і, як наслідок цього відбувається зміна магнітної конфігурації структури [7].

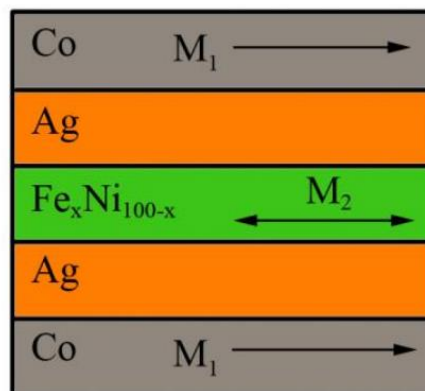


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення подвійної (симетричної) «псевдоспін-вентильної» структури як чутливого елемента. Із роботи [7]

Після обробки результатів досліджень магніторезистивного ефекту в тришарових плівках в умовах впливу температури (інтервал термообробки, температура підкладки, температура вимірювання) та магнітного поля були обрані такі шари: магнітожорсткий шар – Co ($d_{F1} = 20 - 14$ нм), магнітом'який – сплав Fe_xNi_{1-x} ($x \cong 0,5$; $d_{F2} = 20 - 40$ нм) та в ролі немагнітного прошарку – Ag ($d_N = 5 - 10$ нм). При такому виборі матеріалів ця система має дві основні переваги: високу чутливість навіть до незначних

змін зовнішнього магнітного поля, та високу термостабільність. Варто зазначити що польові залежності магнітоопору в магнітних полях при максимальній індукції $B = 20\text{-}100$ мТл псевдо спін-вентильної структури $\text{Co/Cu/Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{Cu/Co}$ ($x \cong 0,5$) (в,г) $d_F = 30$ нм, $d_N = 5$ нм мають ізотропний характер (реалізуються спін-залежним розсіюванням електронів) та аналогічні тришаровим псевдо спін-вентильним структурам (рис 1.7) [7].

Особливу увагу привертає до себе магніторезистивна петля, виміряна в полях, менших за поле перемагнічування магнітожорстких шарів (виміряних в діапазоні полів 0 до 3 мТл). При цьому залежність магнітоопору (МО) від індукції магнітного поля, має практично без гістерезисний характер, в наслідок цього можлива взаємодія магнітожорстких та магнітом'яких шарів через немагнітні прошарки (рис 1.7 г). До того ж величина ізотропного магнітоопору не істотно відрізняється від МО, і у випадку повної петлі магніторезистивного

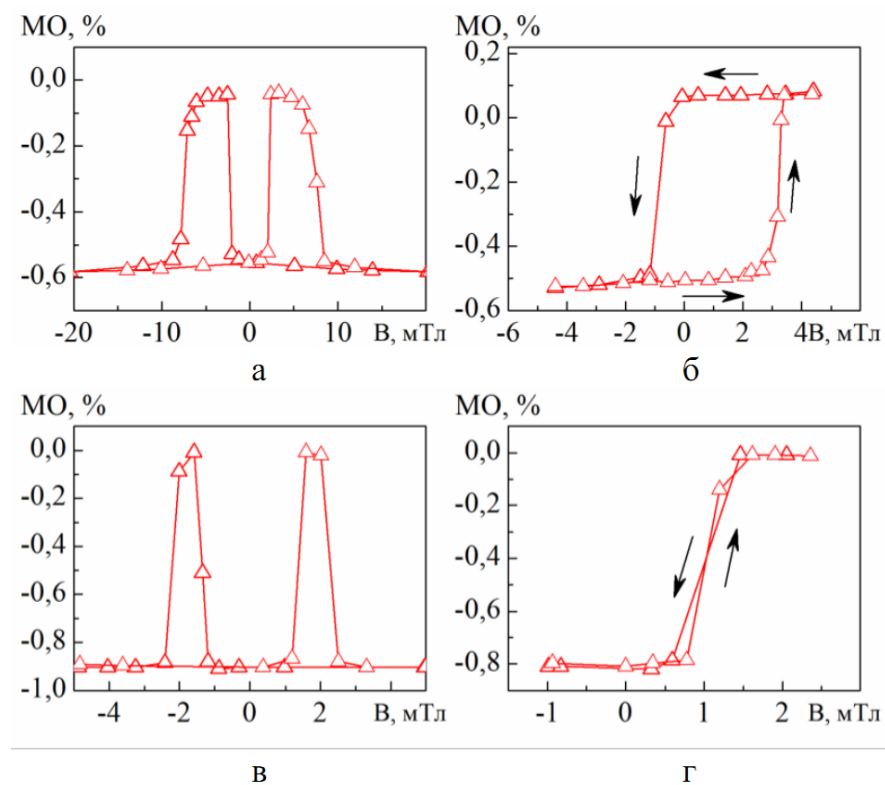


Рисунок 1.7 – Повні (а, в) та частинні (б, г) магніторезистивні петлі для псевдоспін-вентильної структури $\text{Co/Cu/Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{Pi}$ ($x \cong 0,5$) (а, б) та подвійної псевдоспінвентильної структури $\text{Co/Cu/Fe}_x\text{Ni}_{1-x}/\text{Cu/Co}/\text{Pi}$ (в, г). Із роботи [7]

гістерезису становить близько 1-1,5 %/Тл. Це дає змогу забезпечити чутливість до магнітного поля на рівні 80-90 %/Тл.

Другою перевагою цієї структури є збільшення температурної стабільності. Збільшення кількості інтерфейсів призводить до незначного збільшення величини ізотропного МО. Це дасть можливість в подальшому збільшувати товщину немагнітних прошарків до 10 нм, при цьому зберігаючи амплітуду магніторезистивного ефекту близько 1%. Збільшення товщини прошарків дозволить підвищити температуру термомагнітного оброблення до 550 K, зі збереженням індивідуальності всіх шарів, що забезпечить розширення діапазону робочих температур відповідних елементів.

Як з'ясували при повному узагальненні дослідження, запропоновані подвійні (симетричні) псевдо-спін-вентильні структури можуть бути використані при виготовленні чутливих елементів датчиків магнітного поля і середовища для запису інформації [7].

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНИХ НАНОСИСТЕМ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

2.1 Сенсори неелектричних величин на основі спін-вентельних структур

Магнітні наноструктури спін-вентильного типу широко використовуються як чутливі елементи сенсорів неелектричних величин (струму, тиску, положення, повороту, кута обертання тощо). Розглянемо деякі з прикладів їх практичного застосування.

Так, наприклад, сенсори магнітного поля на основі спін-вентильних систем знайшли практичне застосування у автомобільній промисловості та медицині. Такі сенсори стали заміною для сенсорів, принцип роботи яких базується на прояві ефекту Холла, завдяки більш високій чутливості до змін робочих характеристик при зміні величини прикладеного магнітного поля та високій стабільності роботи. На рисунку 2.1 представлено схематичне зображення датчика магнітного поля, сформованого на основі спін-вентилію NiFe(75 нм)/графен/NiFe(75 нм), призначеного для вимірювання кута повороту [22]. Зазначена вище структура відноситься до псевдоспін-вентильних структур, оскільки почергове перемагнічування нижнього і верхнього шарів пермалою відбувається за рахунок їх різної товщини. Схема підключення та приклад експериментальної вольт-амперної характеристики представлені відповідно на рисунках 2.1,б і 2.1,в. Датчик характеризується майже лінійною залежністю величини магніторезистивного ефекту від кута повороту (рисунок 2.1,г). При цьому слід зазначити, що характер кутової залежності магнітоопору залишається майже незмінним при вимірюванні за кімнатної температури, так і низьких температур.

На рисунку 2.2 представлена принципова схема структури датчика магнітного, призначеного для детектування магнітних наночастинок [23]. У якості чутливого елемента даного датчика був використаний спін-вентильна

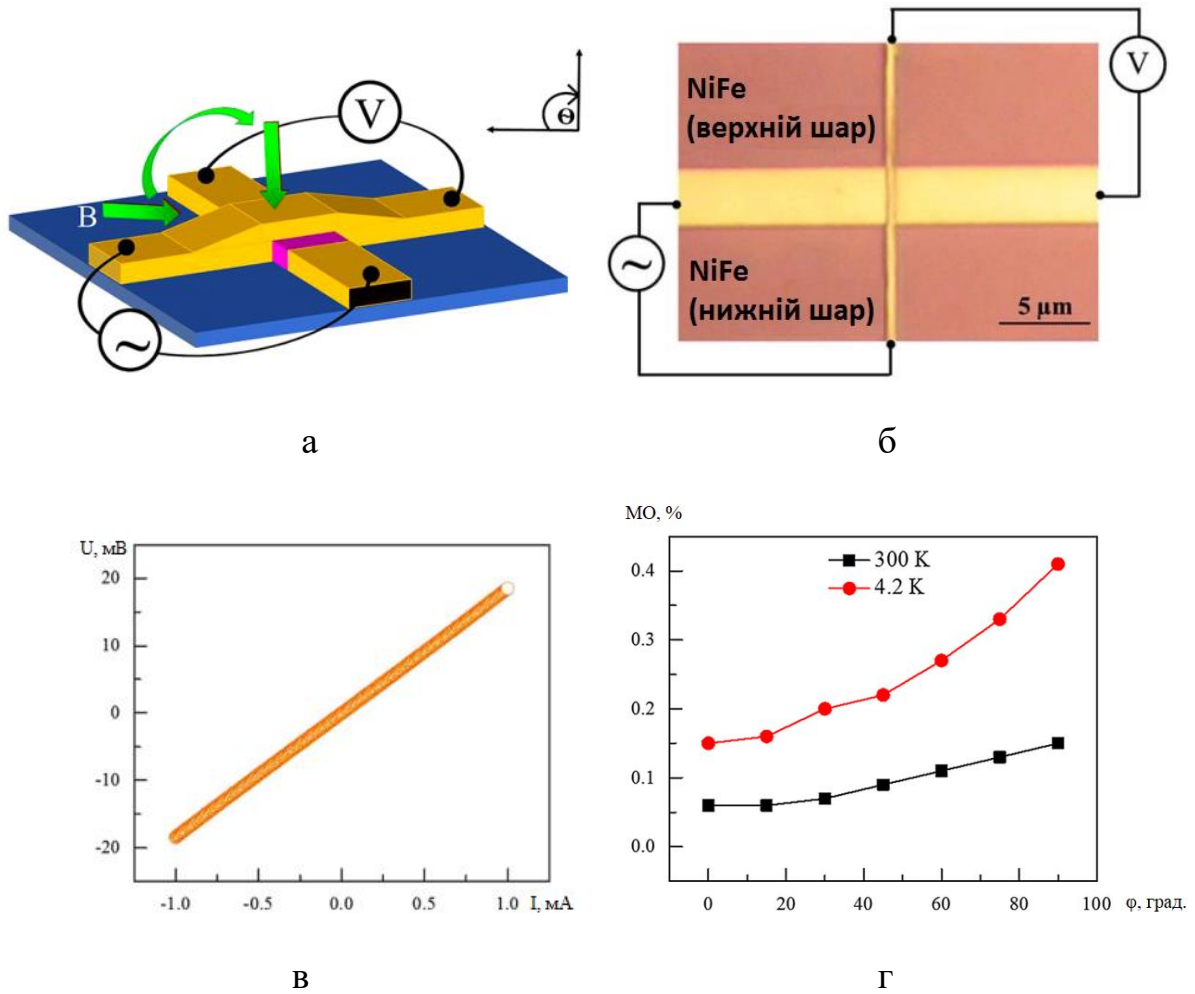


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення датчика, сформованного на основі псевдоспін-вентилію NiFe/графен/NiFe (а), схема підключення (б), приклад експериментальної вольт-амперної характеристики (в) та залежність величини магнітоопору від кута повороту. Адаптовано із роботи [22]

структура $\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{Ru}/\text{Co}(5 \text{ нм})$. Використання у якості феромагнітного матеріалу кобальту, а у якості немагнітного шару рутенію дозволяє покращити стійкість структури до факторів зовнішнього поля, внаслідок практично відсутньої взаємної розчинності між магнітними і немагнітними шарами. Важлива увага при цьому приділяється підбору товщини проміжного шару Ru для забезпечення максимальної чутливості при детектуванні магнітних наночастинок, а саме дозволяє зафіксувати наявність навіть однієї магнітної наночастинки.

Зміна петлі магнітного гістерезису, що є робочою характеристикою для даного датчика, за наявності (червона петля) та відсутності (синя петля) магнітної наночастинки представлена на вставці рисунку 2.2. Як видно з рисунка обрана спін-вентельна система характеризується перпендикулярною петлею гістерезису. При детектуванні магнітної наночастинки відбувається її розширення, але форма при цьому не змінюється. За величиною зміщення петлі

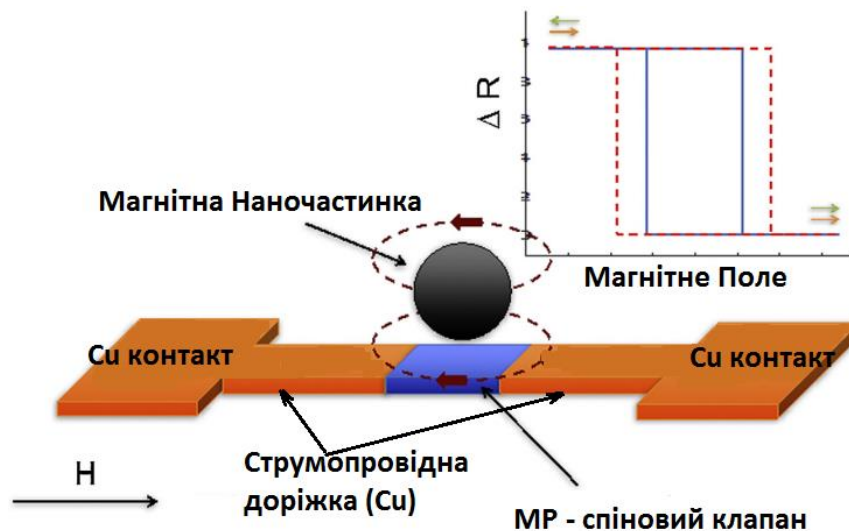


Рисунок 2.2 – Принципова схема структури датчика, призначеного для детектування магнітних наночастинок та приклад зміни польової залежності зміни опору за наявності (червона петля) та відсутності (синя петля) магнітної наночастинки. У якості чутливого елемента використовується спін-вентильна структура $\text{Co}(5 \text{ нм})/\text{Ru}/\text{Co}(5 \text{ нм})$. Адаптовано з роботи [23]

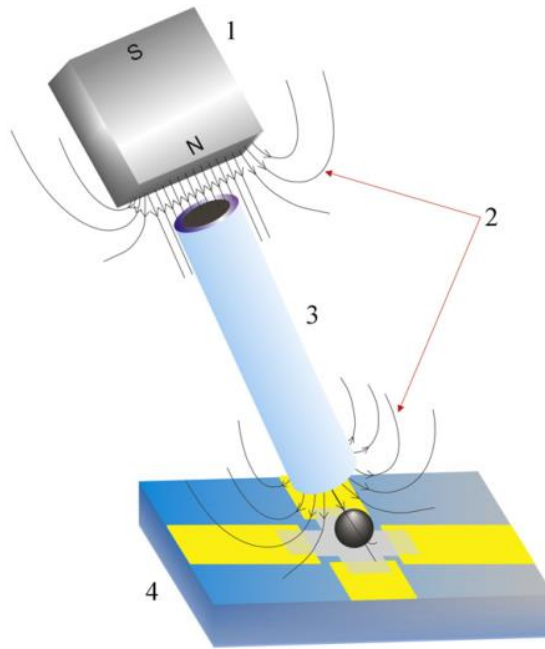


Рисунок 2.3 – Структура процесу детектування окремої магнітної мікрочастинки з використання датчика магнітного поля, сформованого на основі спін-вентильної структури а допомогою датчика Холла на основі спін-вентильної структури Ta(5 нм)/NiFe(16 нм)/Cu(1.2 нм)/NiFe(2 нм)/IrMn(15 нм)/Ta(5 нм): постійний магніт (1), магнітний потік (2), мікропровід (3), датчик Холла (4). Адаптовано із роботи [24]

магнітного гістерезису можна судити про розмір, положення та кількість магнітних наночастинок.

Інший варіант структури сенсора магнітного поля, призначеного для детектування магнітних наночастинок представлений на рисунку 2.3 [24]. У даному випадку у якості чутливого елемента використана структура класичного спін-вентилію Ta(5 нм)/NiFe(16 нм)/Cu(1.2 нм)/NiFe(2 нм)/IrMn(15 нм)/Ta(5 нм). В основі роботи даного сенсора лежить ефект Холла.

Використання обраної структури спін-вентилію дозволяє реалізувати високу чутливість $S = 7.2 \cdot 10^{-2}$ В/Тл при прикладанні зовнішнього магнітного поля величиною $B = \pm 7 \cdot 10^{-4}$ Тл. Саме за рахунок реалізації такої високої чутливості, сенсор і може бути застосований для детектування магнітних

наночастинок. Такий датчик знайшов практичне застосування при детектуванні у середовищах різних типів біологічно активних речовин при їх малій концентрації

2.2 Застосування спін-вентильних структур в електроніці

У пошуках нових магнітоелектронних пристроїв був винайдений транзистор на основі спін-вентиля, структура якого представлена на рисунку рисунок 2.4, а [25]. Аналогом такого транзистора є транзистор з металевою основою, де металева основа замінюється на спін-вентильну структуру NiFe/Au/Co. Додаткові шари Pt та Au, які наносяться відповідно як верхній та нижній шари у структурі транзистора, забезпечують виникнення ефекту Шоткі (на рисунку 2,4 б схематично показано енергетична зонна діаграма для сформованого транзистора). Емітер має висоту бар'єру майже 0,85 еВ, а висота колекторного бар'єру 0,75 еВ. Попереднє зміщення емітера дозволяє ввести електрони в шар спін-вентиля. Електрони під час проходження крізь робочі шари структури зазнають пружного і не пружного розсіювання. У результаті електрони які мають більшу енергію ніж бар'єр колектора проходять через нього, утворюючи струм колектора. Ще один фактор який визначає здатність електрона до переходу через колекторний бар'єр є його імпульс. Електрони які надходять до колекторного бар'єру з кутом дуже близьким до нормальних показників, мають змогу пройти через нього [26]. Тому струм колектора сильно залежить від розсіювання у базовому шарі. Спін-залежне розсіювання також впливає на струм колектора [27].

Схематична енергетична зонна діаграма транзистора, функціональним елементом якого є симетрична спін-вентильна структура Ta(5)/FeMn(8)/NiFe(5)/Co(1)/CuAgAu(3)/Co(1)/NiFe(5)/Co(1)/CuAgAu(3)/Co(1) NiFe(5)/FeMn(8)/Ta(5)/Si та його структура наведені на рисунку 2.5 [28].

На рисунку 2.5 наведена блок-схема підключення та роботи гібридного

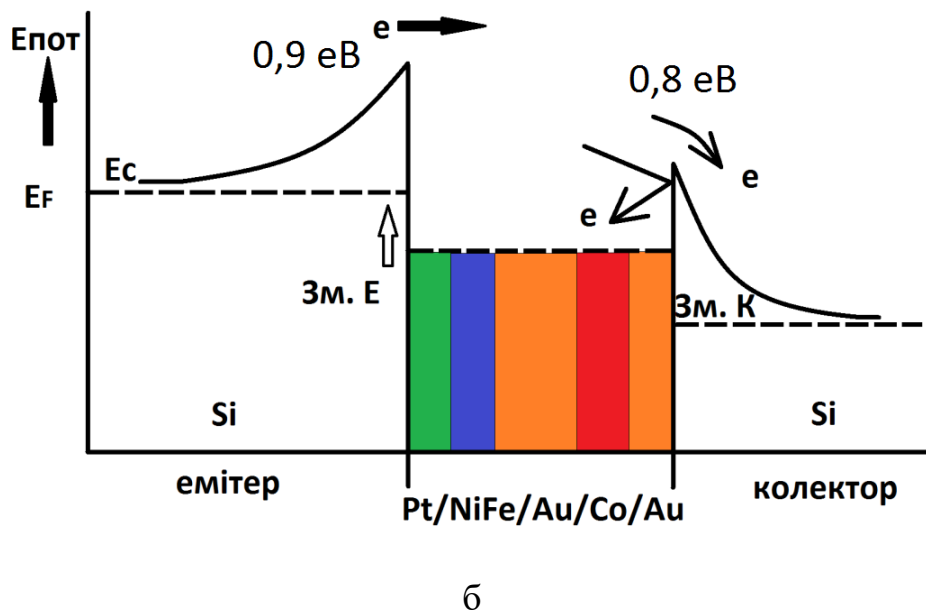
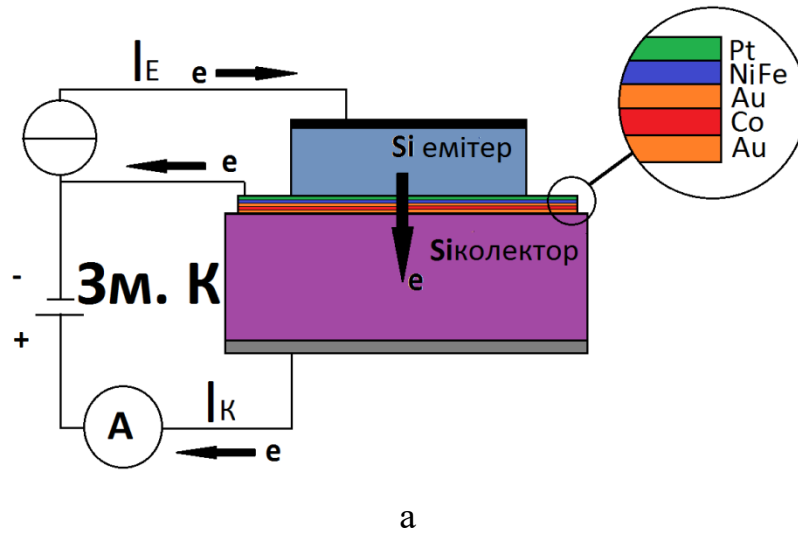
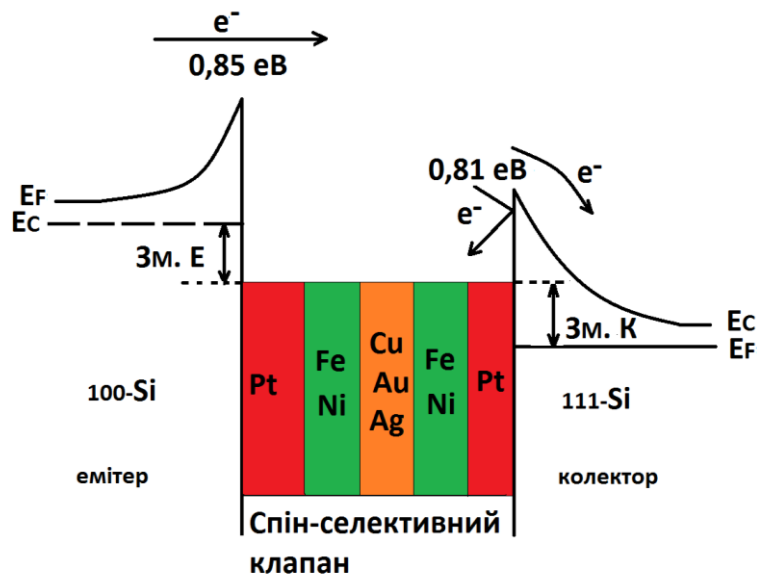
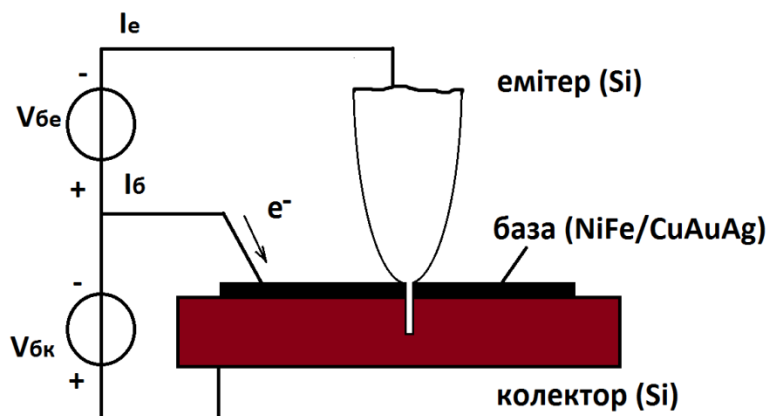


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення структури транзистора (у перерізі), сформованого на основі спун-вентильної структури Pt/NiFe/Au/Co/Ag, де I_e – струм емітера, а I_k - струм колектора (а), та Схематична енергетична зонна діаграма для спін-транзистора. Адаптовано з роботи [27]



а



б

Рисунок 2.5 – Схематичне зображення структури Ta(5)/FeMn(8)/NiFe(5)/Co(1)/CuAgAu(3)/Co(1)/NiFe(5)/Co(1)/CuAgAu(3)/Co(1)NiFe(5)/FeMn(8)/Ta(5)/Si транзистора на основі спін-вентильної структури та його зонна діаграма (а). I_e – струм емітера, I_b – струм бази, V_{be} – напруга база емітер, V_{bc} – напруга база колектор. Адаптовано з роботи [28]

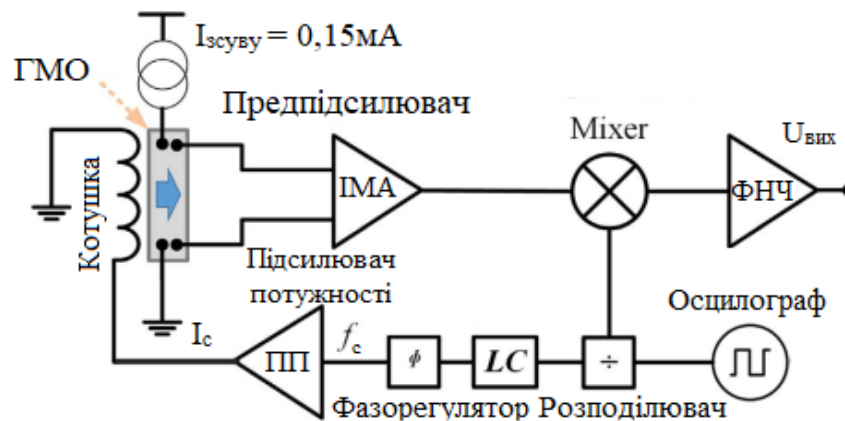


Рисунок 2.6 – Блок-схема підключення та роботи гібридного ГМО датчика що керує магнітним екраном на основі спін-вентильної структури $[\text{Si}/\text{SiO}_2]/\text{Ta}(30)/\text{NiFe}(30)/\text{Co}(10)/\text{Cu}(25)/\text{CoFe}(20)/\text{IrMn}(70)/\text{Ta}(100)$ (товщина в дужках вказана в Å), де ФНЧ-фільтр низьких частот, ІМА-інтегрована мережева архітектура. Адаптовано із роботи [29]

ГМО датчика, який керує магнітним екраном на основі спін-вентильної структури. Робота датчика феррозонду (магнітного екрану) заснована на зсуві петлі магнітного гістерезису чутливого елементу інтегрованого датчика потоку. В якості чутливого елементу виступає класична спін-вентильна структура $[\text{Si}/\text{SiO}_2]/\text{Ta}(30)/\text{NiFe}(30)/\text{Co}(10)/\text{Cu}(25)/\text{CoFe}(20)/\text{IrMn}(70)/\text{Ta}(100)$. Ця система періодично насичується у двох напрямках, в наслідок пропускання струму збудження через збуджуючу котушку. Для отримання струму збудження використовують генератор або зовнішні джерела коливань. В цій роботі запропоновано структуру гібридного ГМО сенсору, що об'єднує ГМО спін-клапан і датчик феррозонду (магнітного екрану).

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ПСЕВДО СПІН-ВЕНТИЛЬНИХ СТРУКТУР

3.1. Визначення температурного коефіцієнта опору (ТКО) на основі експериментальних даних

Загально відомо, що для характеристики температурної залежності опору плівок чи масивних зразків вводиться поняття термічного коефіцієнта опору (ТКО) β :

$$\beta_R = \frac{1}{R_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \text{ або } \beta_\rho = \frac{1}{\rho_n} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}, \quad (3.1)$$

де R_n , ρ_n – початкове значення опору та питомого опору, а величини β_R та β_ρ практично не відрізняються [31].

Вихідною магнітною наносистемою була обрана система псевдо спін-вентильного типу, що складається з двох феромагнітних шарів, розділених проміжним шаром немагнітного матеріалу – Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П, де Py – феромагнітний сплав Ni_xFe_{1-x} при $x = 80$ ат.%, П – підкладка з ситалу. Товщини магнітних шарів були сталими $d_{Py} = 30$ нм, $d_{Co} = 5$ нм, а товщина шару немагнітного матеріалу змінювалася і дорівнювала $y = d_{Ag} = 5-15$ нм. Схематично досліджувана магнітна псевдо спін-вентильна структура наведена на рисунку 3.1. Система обиралася з міркувань, щоб можна було провести аналіз впливу товщини немагнітного шару на величину ТКО системи вцілому.

На рисунку 3.2 наведені приклади температурних залежностей опору $R(T)$, які були використані у даній роботі для розрахунку величини температурного коефіцієнта опору, для зразків Co(5)/Ag(5)/Py(30)/П та Co(5)/Ag(15)/Py(30)/П.

У зв'язку з тим, що терморезистивні властивості тонко плівкових зразків суттєво залежать від їх геометричних розмірів, тому залежності $R(T)$ були

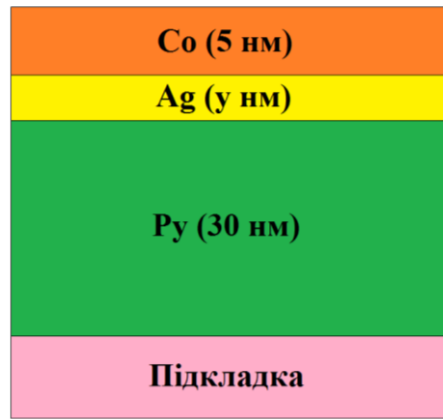


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення магнітної структури псевдо спін-вентильного типу $\text{Co}(5)/\text{Ag}(y)/\text{Py}(30)/\text{П}$ (П – ситалова підкладка, y – товщина немагнітного прошарку, в нм)

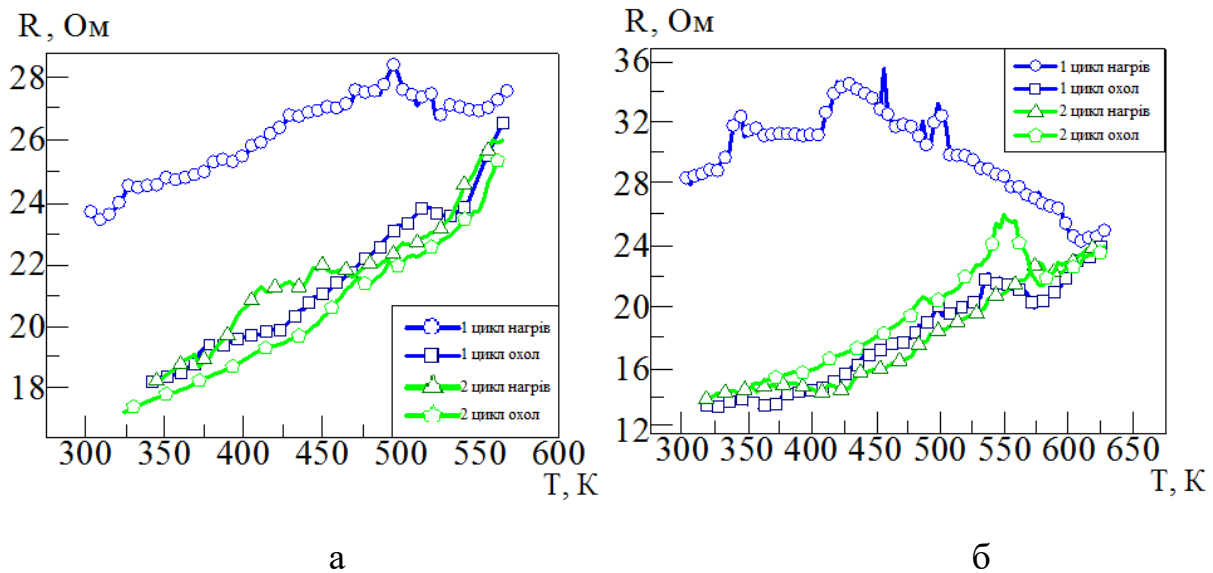


Рисунок 3.2 – Температурні залежностей опору $R(T)$, які були використані у даній роботі для розрахунку величини температурного коефіцієнта опору, для зразків $\text{Co}(5)/\text{Ag}(5)/\text{Py}(30)/\text{П}$ (а) та $\text{Co}(5)/\text{Ag}(15)/\text{Py}(30)/\text{П}$ (б)

перебудовані в координатах $\rho(T)$, де ρ – питомий опір, розрахований за співвідношенням $\rho = R \frac{a \cdot d}{l}$, де d , a , l – відповідно товщина, ширина й довжина зразка. Дані залежності представлені на рисунку 3.3.

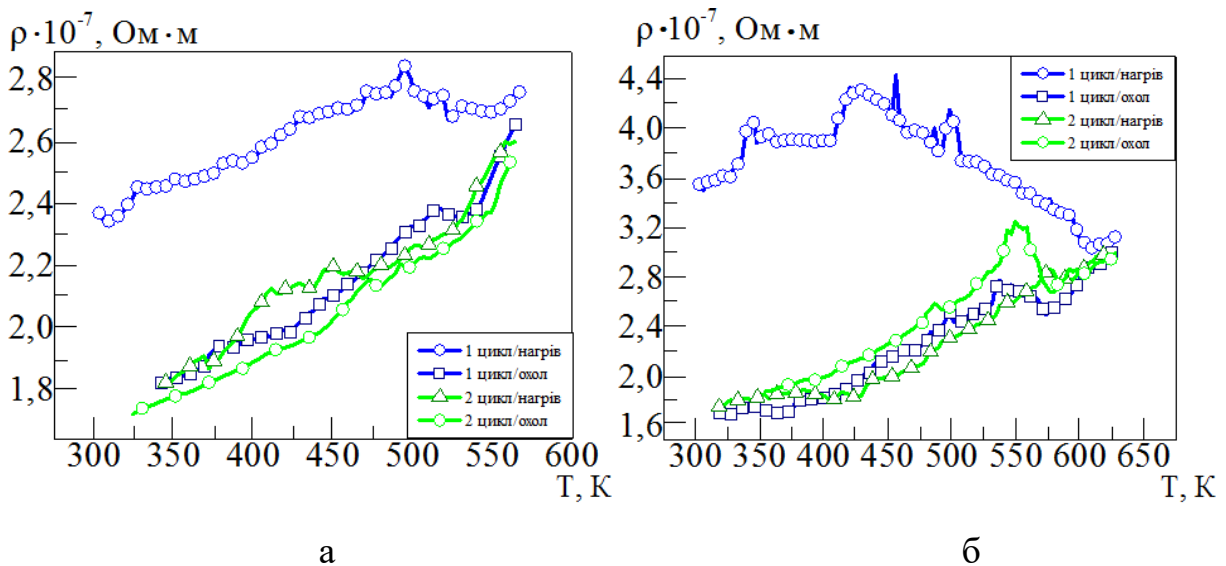


Рисунок 3.3 – Температурні залежності питомого опору $\rho(T)$, які були використані у даній роботі для розрахунку величини температурного коефіцієнта опору, для зразків Co(5)/Ag(5)/Py(30)/Π (а) та Co(5)/Ag(15)/Py(30)/Π (б)

Аналізуючи результати, наведені на рисунку 3.3, зазначимо, що на першому циклі нагрівання відбувається монотонне зростання величини питомого опору, температурний інтервал якого залежить від товщини немагнітного прошарку. Для зразка з $d_{Ag} = 5$ нм даний інтервал відповідає температурному діапазону $T_b = 300\text{--}550$ К, а для зразка з $d_{Ag} = 15$ нм – температурному діапазону $T_b = 300\text{--}450$ К. Процес монотонного зростання величини ρ у процесі подальшого збільшення температури змінюється різким його зменшенням в інтервалі $T_b = 550\text{--}580$ К для системи Co(5)/Ag(5)/Py(30)/Π та в інтервалі $T_b = 450\text{--}600$ К для системи Co(5)/Ag(15)/Py(30)/Π, після чого починається поступове зростання питомого опору для обох зразків. Такий характер залежності $\rho(T)$ свідчить про процес заліковування дефектів кристалічної будови у зразках.

При охолодженні на першому циклі, та при проведенні другого циклу «нагрівання↔охолодження» залежність $\rho(T)$ для обох систем має близький до лінійного характер, що свідчить про стабілізацію електричних властивостей.

На рисунку 3.4 наведено температурні залежності величини β , які були визначені за формулою $\beta = \frac{1}{\rho_n} \frac{d\rho}{dT}$.

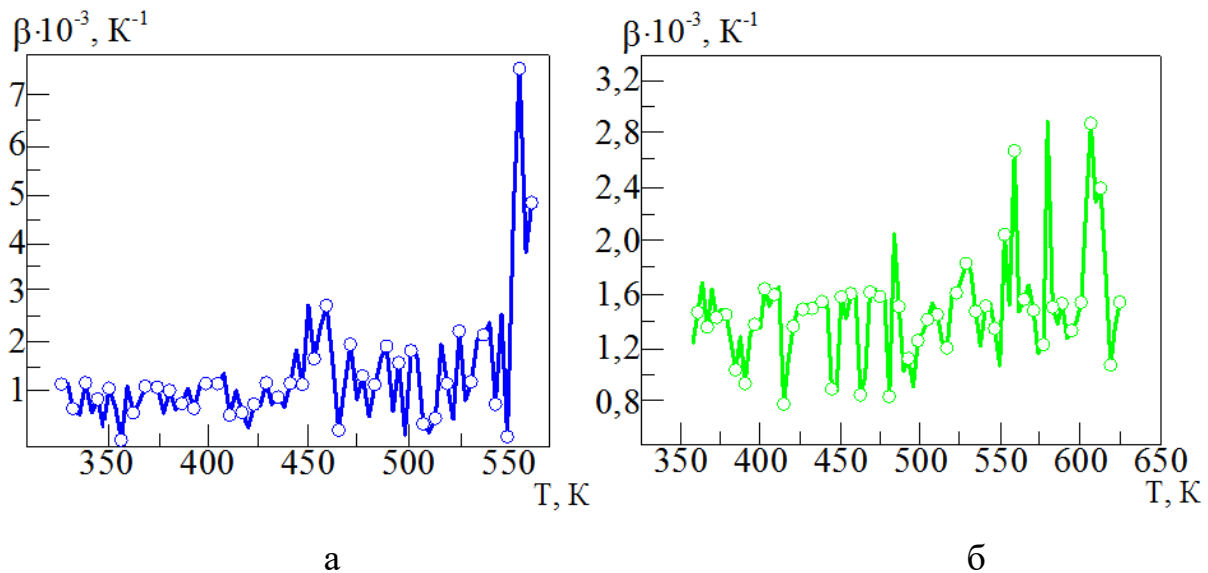


Рисунок 3.4 – Температурні залежності питомого опору $\beta(T)$, які були використані у даній роботі для розрахунку величини температурного коефіцієнта опору, для зразків Co(5)/Ag(5)/Py(30)/П (а) та Co(5)/Ag(15)/Py(30)/П (б)

З графіків, наведених на рисунку 3.4 видно, що величина ТКО зменшується при зростанні температури. Це логічно, оскільки згідно означенню температурного коефіцієнта опору β це фізична величина, що обернено пропорційна величині ρ . З графіків, наведених на рисунку 3.3, видно, що другому циклі охолодження спостерігається збільшення величини питомого опору ρ при зростанні температури.

Результати розрахунків середньої величини ТКО приведені у таблиці 3.1.

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.1 дозволяють визначити як впливає товщина немагнітного прошарку на величину ТКО псевдо спін-вентильних системи Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П вцілому. Збільшення d_{Ag} з 5 нм до 15 нм спричиняє поступово зростання величини β .

Таблиця 3.1 – Розрахунки середньої величини температурного коефіцієнту опору для псевдо спін-вентильних систем Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П на основі експериментальних даних

Система	d_{Ag} , нм	$\beta \cdot 10^3$, K ⁻¹
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	5	2,00
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	10	2,24
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	15	2,33

3.2. Апробація макроскопічної моделі для ТКО тришарових структур

Основною особливістю розмірного ефекту в електрофізичних властивостях багатошарових плівок в порівнянні з одношаровими є взаємодія носіїв заряду з межами поділу окремих шарів, які суттєво впливають на величини електропровідності та ТКО [32]. Для прогнозування електрофізичних властивостей магнітних наносистем використовуються різні теоретичні моделі [32]: макроскопічна, мікроскопічна, модель Дімміха тощо.

У даній роботі для розрахунку величини β була обрана макроскопічна модель. Для тришарової структури типу Me₁/Me₂/Me₃ загальне співвідношення для розрахунку величини ТКО має вид:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \frac{d_1 \rho_2 \rho_3 (\beta_2 + \beta_3)}{d_1 \rho_2 \rho_3 + d_2 \rho_1 \rho_3 + d_3 \rho_1 \rho_2} - \frac{d_2 \rho_1 \rho_3 (\beta_1 + \beta_3) + d_3 \rho_1 \rho_2 (\beta_1 + \beta_2)}{d_1 \rho_2 \rho_3 + d_2 \rho_1 \rho_3 + d_3 \rho_1 \rho_2},$$

де ρ , β та d – величини питомого опору, термічного коефіцієнту опору та товщина відповідно для кожного з шарів тришарової структури.

На рисунках 3.5 та 3.6 наведені експериментальні дані для величини питомого опору і ТКО для одношарових плівок Ag і Co, які були використані при розрахунках. Для шару феромагнітного сплаву Py були використані дані із роботи [34], згідно якої $\rho(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) = 3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, а $\beta(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) = 2 \cdot 10^{-3}$ K⁻¹ за

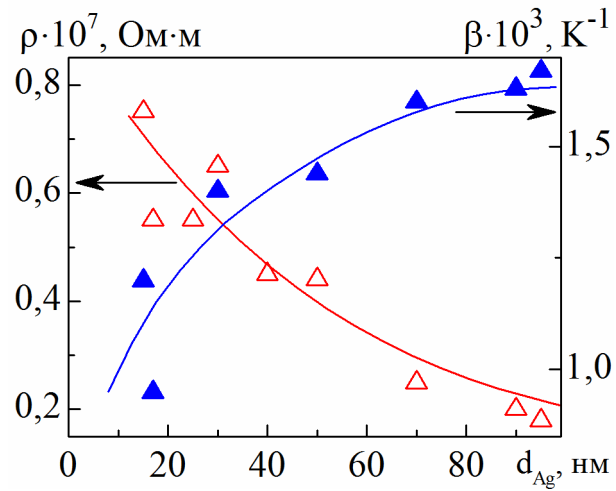


Рисунок 3.5 – Розмірні залежності величини питомого опору ρ та температурного коефіцієнта опору β для плівок Ag. Із роботи [32]

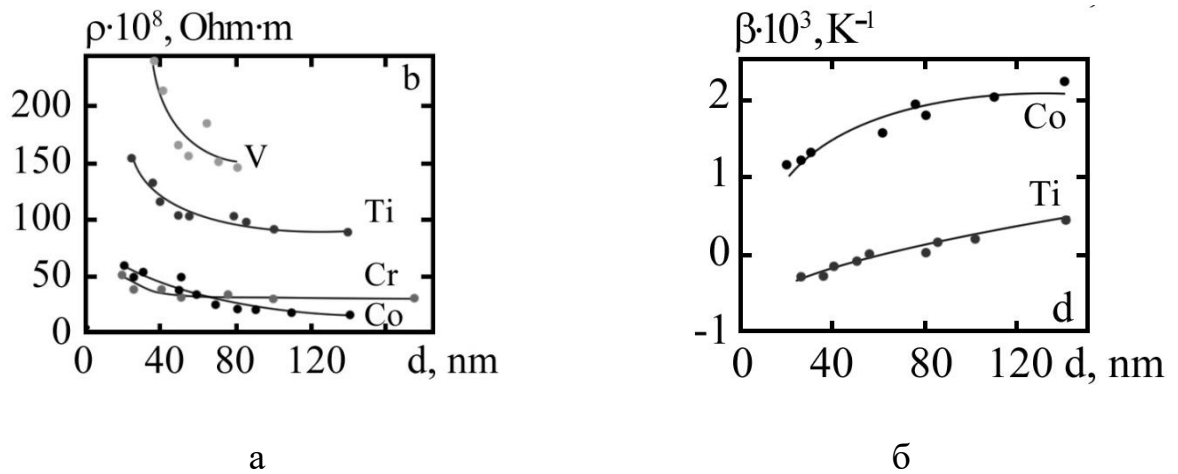


Рисунок 3.6 – Розмірні залежності величини питомого опору ρ та температурного коефіцієнта опору β для плівок Co. Із роботи [33]

Таблиця 3.2 – Порівняння величини ТКО, отриманих на основі експериментальних даних, та розрахункових даних для псевдо спін-вентильних систем Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П

Система	d_{Ag} , нм	$\beta_{експ} \cdot 10^3$, К ⁻¹	$\beta_{розра} \cdot 10^3$, К ⁻¹	$\frac{\beta_{експ} - \beta_{розра}}{\beta_{експ}}$, %
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	5	2,00	0,88	56,0
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	10	2,24	1,06	52,6
Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П	15	2,33	1,27	45,5

товщини $d = 30$ нм. Результати розрахунків зведені у таблиці 3.2.

Аналізуючи дані таблиці 3.2 можна зробити висновок, що макроскопічна модель незадовільно описує експериментальні результати для ТКО псевдо спін-вентильних структур. Це пояснюється тим, що після відпалювання у зразках Co(5)/Ag(y)/Py(30)/П згідно [35] відбувається утворення неупорядкованого т. р. Ag(Co) із обмеженою розчинністю компонент, а макроскопічна модель задовільно описує лише системи, в яких зберігається індивідуальність окремих шарів.

ВИСНОВКИ

1. Класична спін-вентильна структура представляє собою систему типу AF/FM2/NM/FM1, де FM2 і FM1 – шари феромагнітного матеріалу (Co, Ni, Fe або сплави на їх основі); NM – шар немагнітного, як правило благородного металу, який характеризується низькою ступінню розчинності з феромагнітними матеріалами та високою провідністю (Cu, Au, Ag); AF – шар антиферомагнітного матеріалу, який виконує функцію закріплення напрямку намагніченості одного з феромагнітних шарів (FeMn).

2. Однією з причин модифікації класичної спін-вентильної структури шляхом введення додаткових шарів чи заміни матеріалу феромагнітних та немагнітних шарів є пошуки структур із підвищеною термостабільністю магнітних характеристик. Так, наприклад, доцільним є застосування методики формування псевдоспін-вентильних структур із різною товщиною феромагнітних шарів при формуванні функціональних елементів сенсорів неелектричних величин.

3. До галузей застосування магнітних наносистем спін-вентильного типу сенсори відносяться: сенсорна електроніка, яка включає виготовлення датчиків магнітного поля різного призначення (для детектування магнітних наночастинок, визначення кутового положення чи переміщення тощо), функціональними елементами яких є спін-вентильні структури та мікро- і наноелектроніка (створення, наприклад, транзисторів).

4. Розрахунок величини ТКО для псевдо спін-вентильних систем Co(5)/Ag(y)/Pу(30)/П, де $y = d_{Ag} = 5-15$ нм, показав, що величина $\beta \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ і зростає при збільшенні товщини немагнітного прошарку з $2,00 \cdot 10^{-3}$ до $2,33 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. При цьому макроскопічна модель незадовільно описує електрофізичні властивості (відхилення експериментальних даних від розрахункових становить близько 50 %), що пов'язано з тим, що в системі не зберігається індивідуальність окремих шарів під час відпалювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. B. Dieny, V. S. Speriosu, B. A. Gurney et al. Spin-valve effect in soft ferromagnetic sandwiches // *J. Mag. Magn. Mater.* – 1991. – V. 93. – P. 101–104.
2. H.S. Tarazona, W. Alayo, C.V. Landauro, J. Quispe–Marcatoma. Effect of the strong coupling on the exchange bias field in IrMn/Py/Ru/Co spin valves // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2017. – V.432. – P. 494–500.
3. U.D. Chacón Hernandez, M.A. Sousa, F.J. Litterst, V.P. Nascimento, E. Baggio-Saitovitch, Effects of Nb buffer layer on superconducting and magnetic behavior of IrMn/NiFe/Nb/NiFe spin-valves // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2015. – V. 390. – P. 114–117.
4. Joo-hyeon Lee, Hyung-jun Kim, Joonyeon Chang¹ et. al. Multi-terminal spin valve in a strong Rashba channel exhibiting three resistance states // *Sci Rep.* - 2018. – V. 8. – P. 3397.
5. L.I. Naumovaa , M.A. Milyaeva , R.S. Zavornitsyna et. al. Spin valve with a composite dysprosium-based pinned layer as a tool for determining Dy nanolayer helimagnetism // *Current Applied Physics.* – 2019. – V. 19. – P. 1252–1258.
6. Товстолиткін О.І., Боровий М.О., Курилюк В.В., Куницький Ю.А. Фізичні основи спінтроники. – Вінниця : Нілан – ЛТД, 2014. – 500 с.
7. Пазуха І. М. Псевдоспін-вентильні структури: принципи формування, магніті та магніторезистивні властивості / І. М. Пазуха, С. І. Проценко, І. В. Чешко, Ю. О. Шкурдода ; за заг. ред. проф. С. І. Проценка та доц. І. М. Пазухи – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 158 с.
8. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev et al. Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in CoO_x/Fe₁/Cu/Fe₂/Cu/Pb multilayer // *Phys. Rev B.* – 2015. – V. 91. – P. 214508(4).

9. V. Svalov, A. N. Sorokin, P. A. Savin et al. Co/Cu/Co Pseudo Spin-Valve System Prepared by Magnetron Sputtering with Different Argon Pressure // *Key Eng. Mater.* – 2015. – V. 644. – P. 211–214.
10. A. V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya, V. O. Vas'kovskiy. Thermo-sensitive spin valve based on layered artificial ferrimagnet // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – V. 108. – P. 063504(5).
11. S. Luby, E. Majkova. Tailoring of multilayer interfaces by pulsed laser irradiation // *Applied Surface Science.* – 2005. – Vol. 248. – P. 316–322.
12. W. H. Butler, X.-G. Zhang, D. M. C. Nicholson. First-principles calculations of electrical conductivity and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves // *Phys. Rev. A* – 1995. – V. 52, №18. – P. 13399–13410.
13. C. Blaas, L. Szunyogh, P. Weinberger et al. Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves // *Phys. Rev. B.* – 2002. – V.65. – P. 134427 –134427.
14. Чешко І. В. Магнітооптичні та магніторезистивні властивості плівкових функціональних елементів на основі Co і Cu та Au / І. В. Чешко, С. І. Проценко, П. Шифалович // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка.* – 2008. – № 2. – С. 3–7.
15. Cheshko I. Magneto-optical and magnetoresistive properties of Co/Cu(Au)-based spin-valve structures / I. Cheshko, S. Protsenko, L. Odnodvoretz // *Tech. Phys. Lett.* – 2009. – V.35, №10. – P. 903–905.
16. S. Zsurzsa, L. Péter, L. F. Kiss et al. Magnetic and magnetoresistance studies of nanometric electrodeposited Co films and Co/Cu layered structures: Influence of magnetic layer thickness // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2016. – T. 421. – С. 194–206.
17. P. Matthes, M. Albrecht. Pseudo spin valve thin films with crossed magnetic anisotropies // *Sens. Actuat. A: Phys.* – 2015. – V. 233. – P. 275–278.
18. В. М. Коломієць, В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода та ін. Магніторезистивні властивості плівок Co/Cu/Co з додатковим ультратонким шаром Cr // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 197–201.

19. В. Б. Лобода, В. М. Коломієць, Ю. О. Шкурдода та ін. Магніторезистивний ефект та магнітні параметри нанокристалічних плівок на основі Co, Fe, Ag та Cu // Журнал нано- та електронної фізики. – 2012. – Т. 4, № 2. – С. 02014(6).
20. В. Б. Лобода, В. М. Коломієць, Ю. О. Шкурдода, та ін. Структура та магніторезистивні властивості нанокристалічних плівкових систем на основі Co, Fe, Ag та Cu // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2012. – Т. 34, № 8. – С. 1043–1055.
21. В. Б. Лобода, Ю. О. Шкурдода, В. М. Коломієць, Л. В. Дехтярук. Вплив додаткових шарів Ni на структуру та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Co та Cu // Журнал нано- та електронної фізики. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 27–35.
22. Muhammad Zahir Iqbal, Ghulam Hussain, Salma Siddique et. al. Graphene spin valve: An angle sensor // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. –2017. – V. 432. – P. 135–139.
23. Wenlan Qiu, Long Chang, Yu-Chi Liang et. al. Spin-Valve based magnetoresistive nanoparticle detector for applications in biosensing // *Sensors and Actuators* . –2017. – V. 265. – P. 174–180.
24. Tran Quang Hung, Sunjong Oh, Jong-Ryul Jeong et. al. Spin-valve planar Hall sensor for single bead detection // *Sens. Actuat. A: Phys.* – 2010. – V. 157. – P. 42-46.
25. D.J. Monsma, J.C. Lodder, Th.J.A. Popma et. al. Spintronic Materials and Technology // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – V.74. – P. 5260.
26. K. Mizushima, T. Kinno, K. Tanaka et. Al. Handbook of Spin Transport and Magnetism // *Phys. Rev.* –1998. – V. 58. – P. 4660.
27. P.S. Anil Kumar And J.C. Lodder. The Spin-Valve Transistor - A New Magnetoelectronic Device // *Proceedings of the European Conference "Physics of Magnetism '99"*, Poznań. – 1999. – V. 97. – P. 2000.

28. M. Avrama, A.M. Avrama, R. Vasilcoa et al. The optimised spin-valve magnetotransistor // *Materials Science and Engineering*. – 2008. – V. 152. – P. 72–75.
29. Van Su Luong, Anh Tuan Nguyen, Anh Tue Nguyen. Exchange biased spin valve-based gating flux sensor // *Measurement*. – 2018. – V. 115. – P. 173-177.
30. Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках // М.: Мир . – 1972. – Т. – С. 142 – 162.
31. І. Ю. Проценко, Л. В. Одродворець. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікро електроніки (практикуми). – Суми: Сумський Державний Університет, 2011. – 231с.
32. Пилипенко. О. В. Електрофізичні та електрорезистивні властивості плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au: автореферат ... канд. фіз.-мат. наук, спец.: 01.04.07 – фізика твердого тіла / Пилипенко. О. В. – Суми, 2019. – 24 с.
33. Pazukha I. M., Protsenko I. Yu. Theoretical methods of investigation of thin films materials properties. – Sumy : Sumy State University, 2017. – 102 p.
34. Pazukha I.M., Pylypenko O.V., Odnodvoret L.V. A comprehensive investigation of electrophysical and magnetoresistive properties of thin films based on permalloy and silver // *Materials Research Express*. – 2018. – V. 5. – P. 106409.
35. Pazukha I.M., Koloskova O.A., Protsenko S.I. Peculiarities of Magnetoresistive Properties of Co/Ag/Py Pseudo Spin Valves Under Heat Treatment // *J. Supercond. Novel Magn.* – 2019. – V. 33 – P. 1119-1124.