

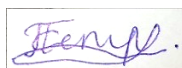
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРІВ ГНУЧКОЇ
ЕЛЕКТРОНІКИ**

Магістрант гр. ЕП.м.-92



О.С. Петренко

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., старший викладач



Ю.М. Шабельник

Завідувач кафедри,

д.ф.-м.н., професор



І.Ю. Проценко

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної дипломної роботи є функціональні чутливі елементи сенсорів гнучкої електроніки.

Метою даної роботи є вивчення та аналіз функціональних та конструктивних особливостей сенсорів магнітного поля, а також елементів гнучкої електроніки спін-клапанного типу; розрахунок основних параметрів таких пристроїв.

Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в оптиці, у техніці надвисоких частот як захисних покриттів, елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, у кріогенній та обчислювальній техніці. Спостерігається значний інтерес до матеріалів, у яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО), з точки зору їх практичного застосування як функціональних чутливих елементів сенсорів гнучкої електроніки. Ці фактори і визначають актуальність даної роботи, а самі дослідження фізичних властивостей тонкоплівкових структур як чутливих елементів датчиків та сенсорів є важливими та своєчасними.

Робота викладена на 35 сторінках і складається з трьох розділів, містить 11 рисунків та 1 таблицю.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТОНКІ ПЛІВКИ, ДАТЧИКИ ВІГАНДА, ДАТЧИКИ ХОЛЛА, ПСЕВДО СПІН-КЛАПАН, ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТООПР, МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ, ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН. (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	6
1.1 Порівняльна характеристика сенсорів магнітного поля.....	6
1.2 Загальні уявлення про тензоефект та тензорезистивні властивості плівкових матеріалів.....	11
1.3 Конструктивні особливості тензодатчиків.....	13
РОЗДІЛ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ МЕТАЛЕВИЙ ЕЛЕМЕНТ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ СПІН-КЛАПАННОГО ТИПУ	20
2.1 Функціональні елементи сенсорів на основі гетероструктур та псевдо-спін-вентилів.....	20
2.2 Металеві чутливі елементи спін-клапанного типу на основі Au, Cu та Co.....	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ	26
3.1. Вихідні дані.....	26
3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання.....	27
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

В останні роки швидко розвиваються напрямки науки, що займаються дослідженням тонких металевих та напівпровідникових плівок, так як вони мають унікальні в своєму роді властивості, що відкриває для них перспективи для застосування в багатьох галузях науки та техніки. Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в оптиці, у техніці надвисоких частот як захисних покриттів, елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, у кріогенній та обчислювальній техніці.

Спостерігається значний інтерес до матеріалів, у яких виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО), з точки зору їх практичного застосування. Уже створені декілька груп електронних приладів та пристроїв: інформаційні системи (високочутливі головки для зчитування інформації з магнітних носіїв та магнітні реле); вимірювальні прилади (ГМО-сенсори різного функціонального призначення); активні елементи інтегральної електроніки (спінові діоди і транзистори, транзистори на «гарячих» електронах, логічні схеми) та ін.

Хоча плівкові матеріали також широко застосовуються і при побудові тензодатчиків. Перевагою тонкоплівкових тензодатчиків на основі металів є їх висока термічна стійкість у порівнянні з напівпровідниковими, але останні мають значно більший коефіцієнт тензочутливості ($\gamma_1 \sim 10 \div 10^3$). Використання композиційних наноструктурних матеріалів як чутливого елемента дозволить вирішити обидві проблеми: збільшити величину γ_1 та досягти стабільності характеристик прилада у широкому температурному інтервалі.

РОЗДІЛ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН. (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1 Порівняльна характеристика сенсорів магнітного поля

Для вимірювання параметра постійних, змінних і імпульсних полів розроблена велика кількість датчиків. Найбільш розповсюджені є такі датчики як датчики Віганда, датчики Холла, ферозонди, СКВІД (на основі надпровідного квантового інтерферометра) сенсори, магнітотранзистори, магнітоелектричні датчики, магніторезистори, магнітодіоди тощо. Такі датчики розповсюджені в чутливих елементах для вимірювання параметрів магнітного поля та магнітних властивостей матеріалів, у металодетекторах, для виміру електричних сигналів. В залежно від того яку величину вимірюють ці пристрої, можливе їх застосування для вимірювання магнітної індукції (тесламетри), напруженості магнітного поля (ерстедметри), магнітного потоку (веберметри або флюксметри), коерцитивної сили (коерцитиметри), магнітної проникності (мюметри), магнітної сприйнятливості (капаметри) та ін. Крім того, ці датчики нашли широке застосування при пошуці корисних копалин, в археології, у навігаційних системах на суші та у повітрі [1].

Одним з нових напрямків у техніці є мікромагнітоелектроніка, що вивчає роботу сучасних перетворювачів магнітного поля, до яких належать магніторезистори, магнітодіоди, магнітотранзистори, магнітотиристри, елементи Холла, а також вироби мікромагнітоелектроніки, створені на їх основі – магніточутливі та керовані магнітами інформаційні системи, магнітні датчики та ін. [1].

Магніторезистивні датчики. Розглянемо датчик, який використовуються для вимірювання параметра магнітного поля. Принцип дії такого датчика оснований на залежності опору з феромагнітним матеріалом від інтенсивності магнітного поля [2]. В залежності від кута вектору магнітної індукції і напрямком струму відбувається зміна опора датчика. Дані датчики

використовуються в промисловості тому що вони дешеві та мініатюрні за розміром. Вони можуть являти собою вимірювальний та резистивний елемент форма якого як мембрана і опір її може дорівнювати від десятків до тисяч омів. Магніторезистивні датчики дуже чутливі і дають змогу вимірювати незначні зміни в магнітних полях від десятків мікрогаусів. Вони широко використовуються в магнітометрії, магнітних сканерах, для вимірювання слабких полів, навігації, в електронних та цифрових компасах, установках неруйнівного контролю та ін. Перевагами даних датчиків є великий діапазон робочих температур, що становить від -100 до $+100$ °C, відсутність магнітного дрейфу, простота, надійність, довговічність [2, 3].

Датчики Холла. Для контролю магнітної індукції використовується пристрій з датчиком Холла. Вимірювальні елементи які бувають на основі цих датчиків можуть відзнятися невеликими розмірами та можуть складаються з одного, двох чи трьох кристалів з напівпровідниковим матеріалом. Датчики Холла (рисунок 1.1) нашли широкого використання для вимірів переміщення та положення. Даний датчик можна використати як датчик тиску якщо постійний магніт помістити на мембрану. Перевагами датчика Холла є можливість вимірювання як постійного та і змінного магнітних полів, завдяки малим розмірам перетворювача, висока чутливість. Недоліком даних датчиків досить низька стійкість до зовнішніх впливів і досить незначна регульовальна температура. [1, 3].

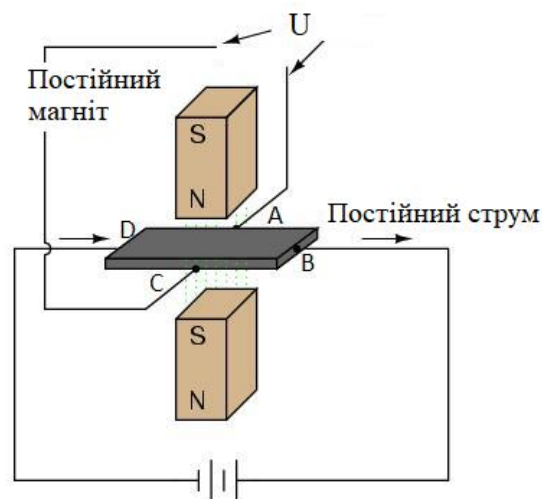


Рисунок 1.1 Датчик Хола

Ферозонди. Пристрої призначені для виміру напруженості зовнішніх магнітних полів. Даний датчик являє собою одне або декілька осердь з магнітом'якого матеріалу із обмотками. [2]. Завдяки високій чутливості, досить простій конструкції, мали габаритні розміри та високій надійності ферозондові перетворювачі широко застосовуються як поле міри (визначення наявності магнітного поля і його напруженості), градієнтноміри (градієнт напруженості магнітного поля), портативні тесламетри [2]. Недоліком даного датчика є те що ферозонди є досить відносними індикаторами поля. Вимірювання відбувається шляхом порівняння результату з «еталонним».

Електростатичні датчики – ємнісні, принцип роботи яких заснований на ефекті періодичної зміни ємності. Електростатичні, зокрема, ємнісні, датчики мають досить високу чутливість добротність та досить малі теплові втрати. Дані датчики дуже широко використовують ефект періодичної зміни індуктивності або взаємоіндуктивності.

Електромагнітні індуктивні датчики. Дані датчики використовуються в періодичній зміні індуктивності (коефіцієнта самоіндукції) котушки або взаємоіндуктивності при зміні опорів речовин, що є у магнітному полі. Магнітний опір змінюється або при впливі зовнішніх магнітних полів або при переміщенні датчика в робочу зону магнітних елементів. Дані датчики поступаються ємнісним за чутливістю та лінійністю характеристики, але вони переважають їх за вихідною потужністю, завадостійкістю, надійністю в польових умовах (де можливі коливання температури і вологості навколишнього середовища) [4]. Вони можуть бути використані для контролю розмірів електропровідних (як правило, немагнітних) елементів. Частота живлення досить високою для більшої глибини проникнення електромагнітної хвилі в контролюючих об'єктах. Висока частота та властивості матеріалу практично не впливають на точність вимірювання. [5].

Принцип роботи такого датчика оснований на дії вихрових струмів (для матеріалів з високою провідністю) або намагнічуванням (для магнітних матеріалів). Якщо дуже близько до обмотки, яка живиться від змінного струму,

перебуває провідне тіло або магнітний матеріал, то в ньому виникають відповідно вихрові струми або поле намагнічування, що приводить до зміни електричних параметрів обмотки (індуктивність та добротність). В середині обмотки збудження може перебувати друга обмотка яка називається сприймаюча обмотка, яка налаштовується в резонанс частоті генератора. Коли підносиш матеріал в робочу зону котушки добротність змінюється, в результаті цього змінюється напруга на сприймаючій обмотці[5].

Характеристики деяких датчиків наведені в таблиця 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика перетворювачів магнітного поля

Тип перетворювача магнітного поля	Розмір активної частини, мм ²	Магнітна чутливість, В/Тл	Діапазон вимірюваної індукції, мТл	Діапазон робочих частот, Гц	Динамічних діапазон, мТл	Споживана потужність, мВт
Магніторезистивний	0,3-100	1-60	10^{-4} - 10^2	0- 10^9	300-1000	30-90
Датчики Холла (дискретні)	0,02-50	0,02-5	10^{-4} - 10^3	0- 10^7	1000	10-50
Ферозонди	1-100	10	10^{-7} -10	0- 10^4	0,1-1	5-50
Магніточутливий Z-елемент	5-2	500-600	10^{-9} - 10^3	0- 10^5	10-50	
Магнітоелектричний датчик	25-50	25	0- 10^9	1000-2000	1-5	
ГМР-перетворювач	0,5-2	6-60	н/д	0-80		
Магнітоіндуктивний	10×8×4	1-10	10^{-3} - 10^3	0,1- 10^6	1-200	

1.2 Загальні уявлення про тензоефект та тензорезистивні властивості плівкових матеріалів

Тензоефектом називається явище, що проявляється в результаті стискування чи розтягуванні масивного або плівкового провідника, та спричиняє зміну його опору. При тензоефекті відбуваються зміна на мікроскопічному рівні (зменшуються або збільшуються параметр ґратки) або макроскопічному і мікроскопічному рівні – поворот і зміна розмірів зерен, поява локалізованих енергетичних рівнів, зміна концентрації і типу дефектів, залежність від деформації, коефіцієнтів дзеркальності, розсіювання (проходження) межі зерен та проходження інтерфейсу [7].

Явище тензочутливості було відкрито У. Томсон (Кельвіном) ще в 1856 р. Але регулярно і систематично досліджувати його почали лише в 30-х роках 20-го століття. Перші тензодатчики були виготовлені в 1938 р. американськими вченими Л. Руже і Є. Сіммонсом. В 50-60-х рр. чималий внесок у дослідження явища тензочутливості масивних і плівкових матеріалів зробили Г. Кузинські (1950-і рр.), А. Колумбані (1960 р.), П. Туре (1961 р.), Р. Паркер і А. Кринські (1963 р.), З. Мейксін і Р. Худзинські (1967 р.) та ін. Більшість цих досліджень мали експериментальний характер і, в основному, практичну направленість. В 1970-х і 1980-х роках почалися активні теоретичними дослідженнями розмірного ефекту. Так зокрема тензочутливість одношарових металевих плівок досліджувалася Ф. Варкушем [8] і К. Тельє, А. Тоссе і К. Пішаром [8], а дослідження двошарових плівок проводилися Ф. Катером і М. Ель-Гіті [9-10]. Було виявлено, що в тонких плівках, особливо у тугоплавких металів, значення коефіцієнта тензочутливості було більше ніж у масивних зразків (фольги, стрічки, тонкі дроти). Металеві плівки мають набагато менші значення γ_l та γ_t у порівнянні із напівпровідниковими плівками, але вони є більш ефективними при підвищених температурах у зв'язку з тим, що після відпалювання у них відсутні подальші рекристалізаційні та дифузійні процеси [6].

Кількісно тензоефект можна охарактеризувати за допомогою коефіцієнта тензочутливості(КТ) (γ_l , γ_t), який є відношенням відносної зміни опору до

відносної зміни довжини (γ_l) або ширини (γ_t):

$$\gamma_l = \frac{\Delta R/R_n}{\Delta l/l_n}, \quad \gamma_t = \frac{\Delta R/R_n}{\Delta a/a_n}, \quad (1.1)$$

де $\varepsilon_l = \Delta l/l_n$; $\varepsilon_t = \Delta a/a_n$ (l_n, a_n – початкові довжина і ширина).

Зазвичай поздовжня деформація більша, що пов'язано із протіканням електричного струму за напрямком деформації, а в випадку поперечної деформації вони взаємно перпендикулярні.

Утворення тензоефекту пояснюється тим, що при деформації плівки змінюється її кристалічна будова – кристаліти повертаються один відносно іншого та змінюють свою форму, а це в свою чергу обумовлює утворення поверхневих енергетичних станів. Також на межі і всередині кристалітів відбувається зміщення атомів решітки із рівноважних положень, зміна концентрації та характеру дефектів. Всі ці фактори впливають на процеси розсіювання електронів. У зв'язку з цим були запропоновані два параметри розсіювання носіїв струму [10]:

$$\nu = L\lambda_0^{-1}(\ln \frac{1}{r})^{-1}, \quad \mu = d\lambda_0^{-1}(\ln \frac{1}{p})^{-1}, \quad (1.2)$$

де L – середній розмір кристалітів;

d – середній розмір товщини плівки;

λ_0 – середня довжина вільного пробігу електронів у масивних зразках;

r та p – коефіцієнти проходження межі кристалітів та дзеркальності зовнішніх поверхонь плівки. Варіанти розсіювання електронів можна побачити на (рисунок 1.2).

Саме співвідношення між ν та μ визначає абсолютну величину коефіцієнтів тензочутливості й характер її залежності від товщини.

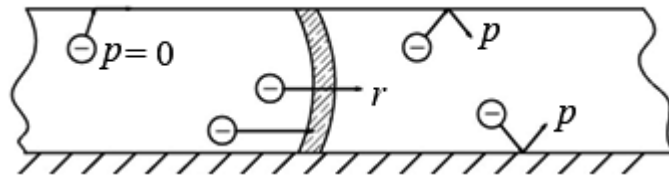


Рисунок 1.2. Варіанти розсіювання електронів на зовнішніх поверхнях плівки та межах зерен (МЗ)

Основний внесок у значення тензоефекту дають зміна геометричних розмірів резистора та зміна середньої довжини вільного пробігу (СДВП), що відбувається за рахунок деформації фононного спектру.

У випадку, коли чутливий елемент виготовлений на основі одношарової чи багатшарової полікристалічної плівкової системи, то зміна СДВП буде відбуватися не тільки за рахунок деформаційних змін фононного спектру, але і коефіцієнтів дзеркальності (p), розсіювання (r), і величини проходження меж зерен (Q) (у випадку багатшарової плівки).

На практиці найбільший інтерес представляють тонкі плівки, так як вони мають значно кращі тензорезистивні характеристики, ніж плівкові зразки з товщиною більше 100 нм. Тому для тонкоплівкових зразків точними і достовірними можна вважати лише експериментально отримані дані, а не дані розраховані з теоретичних моделей. І вже, виходячи із даних експеримента можливе виведення емпіричних формул, які могли б з достатньою точністю описати явище тензоефекту. Наприклад, для плівкового сплаву Ni-Co було виведене емпіричне правило, що дозволяє розраховувати величину КТ для даної системи залежно від концентрації компонент [11].

1.3 Конструктивні особливості тензодатчиків.

Резистивний шар який нанесений на гнучку плівку або підкладку яка є резистивного типу являє собою тензометричний датчик. Якщо це плівковий датчик то на ньому є тонке напилення, а якщо він дротяний то на гнучкій підкладці розміщена дріт. Напилення або дріт розміщується в звивисту лінію.

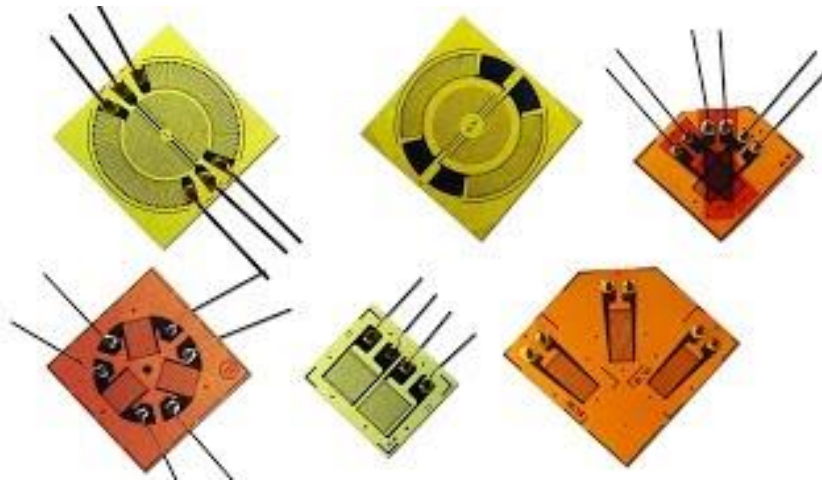


Рисунок 1.3. Зображення тензодатчиків різних форм

При механічному втручанні на підкладку вона згинається, в результаті чого плівка, змінює свої властивості і розтягується. Коли плівка знаходиться в натягнутому стані змінюється її площа поперечного перерізу і як наслідок цього опір збільшується. Коли на підкладку знижується тиск підкладка повертається у вихідне положення, резистивний шар теж, а її опір зменшується і вертається до норми.

Подібні ним є ємнісні датчики це прилади, які використовують для вимірюванні ємності між гнучкими пластинами. Є також електромагнітні пристрої, в яких під впливом на муздраттеатр змінюються характеристика контуру[12].

Відомий чутливий елемент тензодатчика, виготовлений у вигляді паралелепіпеда із напівпровідникового матеріалу на основі твердого розчину.

Основним недоліком таких елементів є те, що вони дуже чутливі до дії зовнішніх факторів, зокрема, – температури, що обмежує температурний інтервал їх функціонування. Найбільш близьким з технічної точки зору та результату, який при цьому досягається, є чутливий елемент тензодатчика, виконаний у вигляді паралелепіпеда з металевого матеріалу (тонкої плівки), наприклад, одношарової плівки Mo, Cr, W, яка нанесена на діелектричну підкладку.

Чутливий елемент на основі одношарової металевої плівки є більш надійним при роботі в інтервалі відносно високих температур. Але і цей чутливий елемент має невисоке значення коефіцієнту тензочутливості (порядка одиниці), про що свідчать експериментальні результати. Це обумовлено тією обставиною, що в одношарових плівках розсіювання електронів відбувається лише в об'ємі та на поверхні плівки.

Дослідження залежності коефіцієнтів тензочутливості від товщини одного багатшарових плівок на основі Cr, Ni та Co показує, що тензочутливість багатшарової плівкової системи завжди більше порівняно з одношаровими Cr, Ni та Co такої ж товщини [12].

Таким чином, пропонується використовувати як матеріал чутливого елемента тензодатчика багатшарової плівки на основі Cr, Co та Ni з товщинами окремих шарів від 10 до 100 нм. Плівки з товщиною меншою 10 нм є структурно несучільною, а при товщинах більше 100 нм величина коефіцієнта тензочутливості незначна в наслідок слабого проявлення розмірного ефекту.

На рисунок 1.4 схематично зображений чутливий елемент тензодатчика. Чутливий елемент представляє собою паралелепіпед з металевого матеріалу - багатшарової плівки, яка складається з шару Ni, шару Co та шару Cr, нанесених по черзі у вакуумі на діелектричну підкладку. Чергування шарів металів може бути довільним, наприклад, – Ni/Co/Cr/Ni/Co/Cr/П; товщина Ni складає 25 нм, Co – 30 нм, Cr – 35 нм, Ni – 30 нм, Co – 40 нм, Cr – 20 нм. Загальна товщина багатшарової плівки залежить від кількості товщини окремих шарів. Максимальна кількість шарів обумовлена дією структурних макронапружень, які можуть привести до руйнування зразка.

Плівкові шари Ni та Co конденсуються за допомогою електронно-променевої гармати, а шари Cr – методом термічного випаровування.

Чутливий елемент тензодатчика працює таким чином. При деформації чутливого елемента виникають механічні напруження розтягувального або стискувального характеру, які приводять до зміни електричного опору багатшарової плівки 12.

Таким чином, використання як чутливого елемента тензодатчика багатошарової плівки, забезпечує найбільш повну передачу інформації про напруження, які виникають у деталях у широкому інтервалі температур.

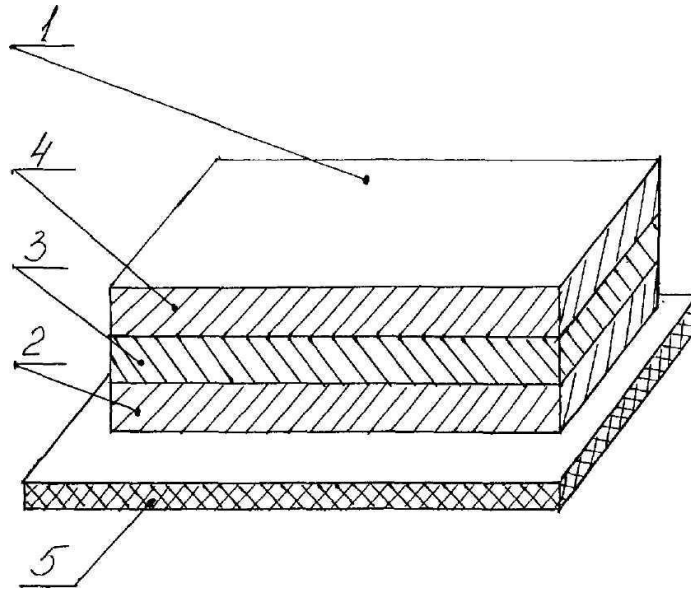


Рисунок 1.4 Схематично зображений чутливий елемент тензодатчика [12]:

1 – металевий елемент багатошарової плівки, 2 – шар Ni, 3 – шар Co, 4 – шар Cr, 5 – діелектрична підкладка.

Для виміру тиску рідини чи газу існує багато способів. Найбільш розповсюджений метод в промисловості є спосіб вимірювання деформацій пружного елемента до якого прикладена сила тиску. Для того щоб розділити робоче і зовнішнє середовище можна використати пружні циліндричні мембрани, на які наносять чутливі до мікродеформації елементи. Коли на середовище діє різниця тисків біля мембрани та після неї, то вона деформується, та змінює характеристики чутливого елемента. Сигнал чутливого елемента електроніки перетворює його в цифрові, аналогові та нормовані сигнали. В датчиках з абсолютним тиском виникає розрахунок деформації мембрани, яка розподіляється середовище і камеру в якій тиск дорівнює нулю. Для цього, щоб залежність переміщення центру мембрани в залежності від тиску була більш прямою, її центр роблять більш потовщений (рисунок 1.5).

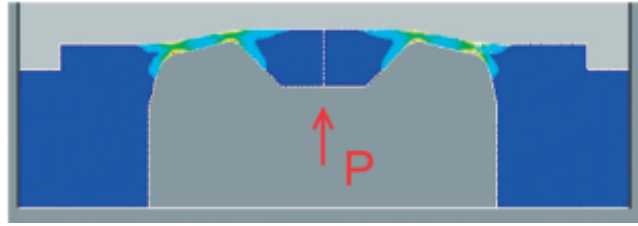


Рисунок 1.5 Деформація мембрани з жорстким центром під дією тиску [13]

Найбільш розповсюджені технології тиску перетворювачів є ті в яких використовують чутливі до мікродеформацій п'єзорезистивні сенсори або тонкоплівкові тензорезистивні сенсори які нанесені на сталі і товстоплівкові сенсори які є на кераміці. П'єзорезистивні датчики є найбільш розповсюджені, але є датчики в яких набагато краща стабільність це датчики з тензорезисторами.

Існують різні способи якими можна наносити чутливих елементів на мембрану вони можуть бути як дифузійного типу так і приклеюю чого типу. Зазвичай чотири чутливі елементи можна нанести на певні місця на діафрагмі та можна з'єднати за схемою вимірювання мосту. Мікродеформація мембрани коли на неї діє тиск дуже малий близько до одиниці мікрон, наприклад він може бути близькій 5-6 мкм для перетворювачів заводу «Манометр» [13]. Заміна опорів тензорезисторів та п'єзорезисторів вона є досить малою, тому важливими складовими датчика є модулі електроніки, який в свою чергу підсилюють корисні входні сигнали, щоб компенсувати системні похибки та фільтрувати шум який виникає.

Бувають різні способи вимірювання мікродеформацій, це можуть бути як індуктивні, ємнісні так і резонансні. Резонансний спосіб широко використовують, в перетворювачах типу Yokogawa, вимірюючи зміні власності частотних коливань пружного елемента на який діє тиск. Ємнісний спосіб, він дуже поширений у використанні в компанії Rosemount вони використовують його на обкладинках конденсатора [13].

Коли наносиш на металевих тензорезистори на мембрану виникають невеликі технологічні проблеми, в яких причиною є якість та стабільність клею. Крім цього, необхідно нанести на мембрану і шар діелектрика який є проміжним. Рівень технологій який використовують в механоелектричних чутливих елементів, що являє собою мембрану з тензорезисторами, визначає важливі параметри датчика такі як дрейф та наскільки довго буде довготривалість стабільності.

Одним з розробників цієї технології є компанія Trafag. В промисловості датчики тиску роблять в середовищах з дуже широким діапазоном температур який може бути (від -40 до $+125^{\circ}\text{C}$ і більше). В основному усі датчики випробовуються при температурі $+25^{\circ}\text{C}$. Для того щоб врахувати компенсацію похибки від температури можна застосувати контур температурної компенсації. Додатковим похибки які можуть внести деформації мембран під дією можуть виникати під дією агресивного середовища, гідроударів, а також і в механічних вібрацій та ударів та в зовнішнім електромагнітним випромінювання.

Всі похибки які наведені вище мають бути мінімальні за рахунок матеріалу, механічної конструкції датчика і електронного модуля. В датчиків тиску типу Trafag для чутливих елементів виробляють пружні мембрани 2 типів такі як керамічні та сталеві. Керамічні сенсори дешевші, дуже добре витримують агресивне середовище, та ідеально підходять там де потрібно виміряти низький тиск. Сталеві сенсори більш стійки до гідроудару та перенагрузки, мають стабільну характеристику при тривалій роботі, та високу стійкість до дуже високих температур які виникають в середовищі [14].

Технології Trafag полягає в тому що нанести металевий тензорезистор можна на керамічну мембрану, та на сталеву, з прохідним шаром діелектрика. Для того щоб врахувати похибки від температури, вона вимірює температуру датчика, який нанесений на мембрану.

На рисунок 1.6 розташований чутливий елемент датчика тиску Trafag, який можна використати в тонкоплівковій технологіях на металевій мембрані. Під цифрою (1) знаходиться мембрана на якій нанесені 4 тензорезистори (2), які

з'єднують за схемою вимірюю чого мосту, елементи з контуру компенсації температури (3), провідні а також позолочені контактні площадки (4).



Рисунок 1.6 Чутливий елемент датчика тиску Trafag: 1- мембрана, 2 - 4 тензорезистори, 3 - елементи з контуру компенсації температури, 4 - провідні а також позолочені контактні площадки

Модуль електроніки розробляють з урахуванням великих вимог до вібро та і до ударостійкості. Електричні з'єднання частин датчика відбуваються через контактуючі площі мембран а також штиркові контакти модульній електроніки без паяння провідників.

РОЗДІЛ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ МЕТАЛЕВИЙ ЕЛЕМЕНТ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ СПІН-КЛАПАННОГО ТИПУ

2.1 Металеві чутливі елементи спіно-клапанного типу на основі Au, Cu та Co.

Як варіантом для виконання ефектної та просторової спіно-вентильної структури є багатослойна структура типу «сендвіч», що виконують за схемами «магнітний шар показаний під цифрою 1 / нижче розташований немагнітний прошарок / потім магнітний шар 2», дане схематичне зображення ви можете глянути на рисунку 2.1. Магнітний шар які знаходяться під цифрами 1 та 2 їх виготовляють у вигляді тонкої плівки Co, чи Fe. Немагнітний прошарок виготовляється з плівок які мають металевий характер та високу провідність наприклад це може бути Cu або Au. Особливістю такої функціональної структури, є використання 1 матеріалу для магнітних шарів 1 і 2. Різниця між феромагнетиком або сегнетоелектриком забезпечується так званим розмірним ефектом, здатність намагнічувати тонкі плівки дуже сильно залежить від товщин зразків та умов в яких був отриманий цей зразок.

В роботах [15-17] показані параметри функціонування елементів на основі спіно-вентильних структур які виготовляють з магнітного шару Co, що розділяється немагнітними прошарками з Cu товщина яких дорівнює 5 – 6 нм, а наступні: товщини верхніх шарів “якій м’якій” він складається з 15÷20 % від товщин шарів “твердого” що знаходяться нижче. Завдяки такому співвідношенні забезпечується поєднання та функціонування у магнітному полі цього вентилію. Шар що знаходиться зверху виготовляють з Co тому що він більш чутливий до зміни, в індуктивності магнітних полів B і у ньому виникається процес перемагнічування у своєї доменної структури при малих допустимих значеннях, тоді як шар який знаходиться знизу він більш товщий і має більше перемагнічування.

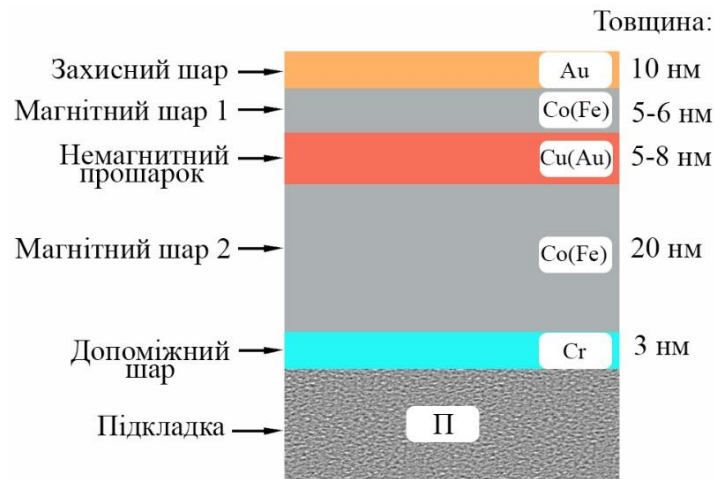


Рисунок 2.1 Схема в якій формується проста функціональна плівка гнучкої структури на основі спіно-кляпанного типу «сендвічу» на магнітних шарах з Co різних товщин. [26]

Вибори матеріалів які мають магнітні шари а також мають немагнітний прошарок обумовлюється можливим вирахуванням ступенів розмиття інтерфейса між ними. У різних дослідженнях [18, 19] були проведені дослідження магніторезистивних, а також і магнітооптичних властивості в яких за основу були взяті плівки Co і Cu. У розглянутих системах які зображені на (рис. 2.1) частіше значення максимального магнітоопору (див., наприклад, [20, 21]) одним із варіантів являє собою псевдо спіно-вентель.

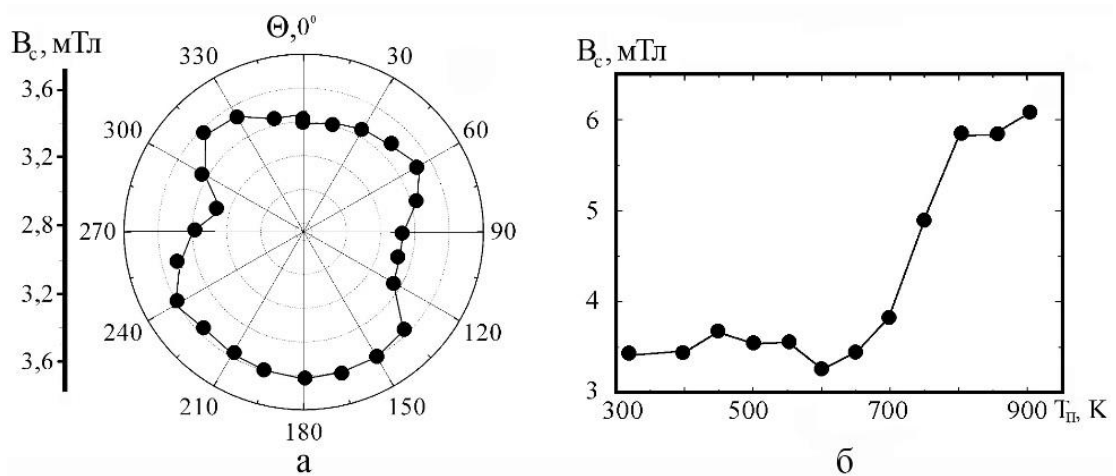


Рисунок 2.2 Залежні коерцієнти B_c плівки яка має один шар Co (40) / П від кутів поворотання зразка Θ при температурі $T_p = 300 \text{ К}$ (а) і температур T_p при $\Theta = 0^\circ$ (б) [18]

Підсилення магнітних шарів 1 і 2 можливо тільки за допомоги різної термообробки. В наших роботах [22, 23] були отримувати шари Co при змінних температурах підкладки ($T_{\text{п}}$). Шар який знаходиться нижче його товщина ($d = 20$ нм) отримувався в результаті температури яка дорівнює $T_{\text{п}} = 950$ К, а шар що знаходиться зверху він тонкий і дорівнює ($d = 5 \div 6$ нм) і температура в нього дорівнює $T_{\text{п}} = 300$ К. Основою для цього служить дослідження компанії МОКЕ в плівці яка має тільки один шар Co, який був отриманих при перепадах температур підкладок, що приведені на рисунку 2.2. Так коерцетивність плівок отриманих в високих температурах підкладок повинно дорівнювати в $5 \div 6$ разів більшим ніж у плівок, що були отримані в кімнатних температурах.

2.2 Структури з функціональними мультишарами

Другі способи для формування псевдо спін-вентильних систем в яких за основу взяли метали були запропоновані в нашій роботі [23] по аналогічних роботах [24, 25], для яких використовують мультишари на основі $[\text{Co}(3) / \text{Cu}(3)]_n$ або $[\text{Fe}(3) / \text{Au}(3)]_n$, з співвідношенням ($n = 3 \div 18$ – кількість повторів) для формування яких використовують спін-вентильну типу систему яку можна замість магнітним шаром за умов зберігання іншого яке показано на рисунок 2.3. Суцільні шари Co чи Fe з високими показниками коерцетивності у порівнянні з мультишаровими будуть мати роль закріпленого на магнітожорсткому шарі для дотримання спін-вентильного ефекту.

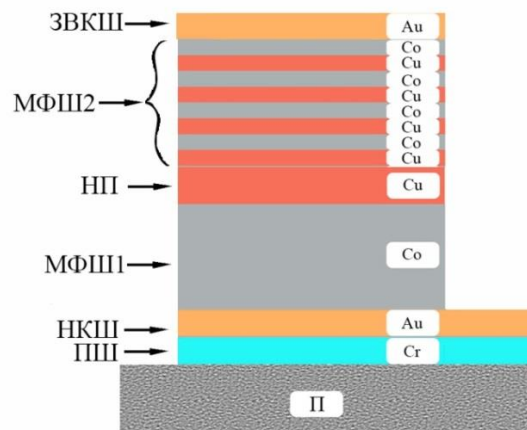


Рисунок 2.3 Схематично зображена будова функціонального елемента на гнучкій електроніці спін-клапанного типу в яких за основу було взято тонкі плівки з Co і Cu та мультишару $[Co/Cu]_n$ [26]

Гнучка конструкція надає можливість використати гнучку підкладку, а наноструктура метала забезпечує стабільність електричного параметра елемента коли неоднакові деформації. Конструктивні та функціональні елементи мають складатися з тонких металевих багатошарових плівок та мають вигляд паралелепіпеда слідкуючої структури: підкладка позначається літерою (П) – тефлон товщиною дорівнює $0,5 \div 2$ мм / адгезійний підшар позначається літерами (ПШ) – плівка Cr (3) / нижній контактний шар позначається літерами (НКШ) – плівка Au (10) / нижній функціональний магнітний шар позначається літерами (МФШ1) – плівка Co (20 нм) / немагнітний прошарок позначається літерами (НП) – плівка Cu (6 нм) / верхній функціональний магнітний шар позначається літерами (МФШ2) – мультишар $[Co(3)/Cu(3)]_n$, де $n = 4 \div 14$ – визначають кількість повторів фрагменту даного мультишару / захисний та верхній контактний шар позначається літерами (ЗВКШ) – плівка Au (10). На рисунку який зображений нижче а саме 2.4 на ньому схематично зображена схема при якій формується модифікована функціональна структура в основі мультишару.

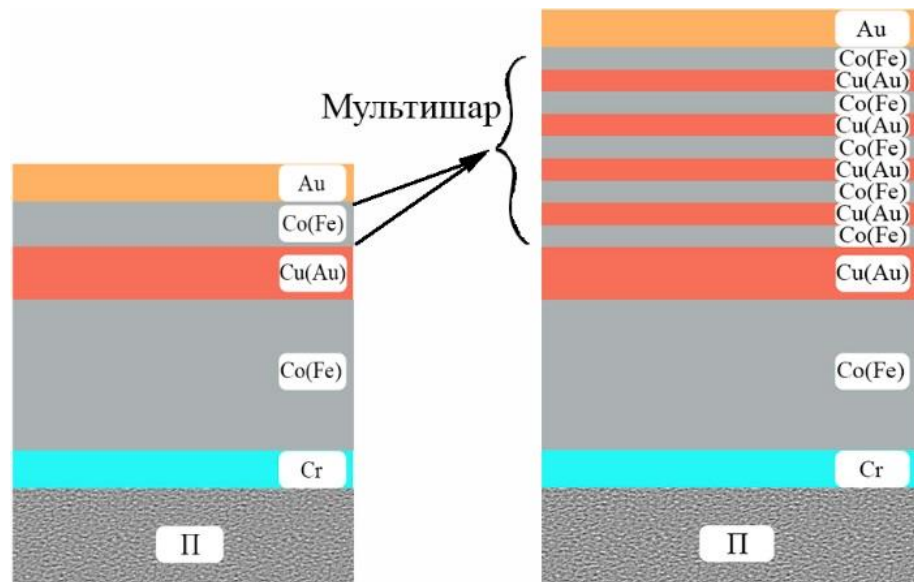


Рисунок 2.4 Схема при якій формується модифікована функціональна структура в основі мультишару [26]

Захист верхніх шарів забезпечується захистами від впливу фізичного і зовнішнього, та разом з контактами що знаходяться с низу забезпечується електричними контактами у поперечній чи поздовжній геометріях пропускаючого струму через функціонувані елементи. Зазначені вище структури можна отримувється шляхами пошарової конденсації з наступного термооброблення до температури 700 К, що призводить працювати функціональному елементу в широких діапазоні від 300 – 700 К і в магнітних полях від 0 до 0,5 Тл. Товщини в функціональних магнітних шарах які дорівнюють 6 і 20 нм були вибрані за врахуванням максимального значення їх коерцитивності в основі попередніх експериментах в досліджувальних роботах [20]. Також згідно з цих дослідження магнітного шару що знаходиться знизу (ФМШ1) після того як сформується додаткове підпалюється до температури 950 К, щоб закріпити його магнітний домен в структурі та підвищити його магнітожорсткість.

А на рисунку 2.5 ми бачимо можливі схеми включення функціональних елементів гнучкої електроніки який має спін-клапанного тип, а електричне коло: перпендикулярне позначене під буквою (а), та поздовжнє позначене під

буквою (б) яке пропускає електричний струм. Функція такої структури забезпечує специфічні властивості мультишарів $[\text{Co}(3)/\text{Cu}(3)]_n$, підібраних характерними товщі нами окремими шарами та режиму їх термообробки. Завдяки цьому виникає чутливий електричний опір функціонування елемента до орієнтації та напруженостями зовнішніх магнітних полів та досить високу термічну стабільність.

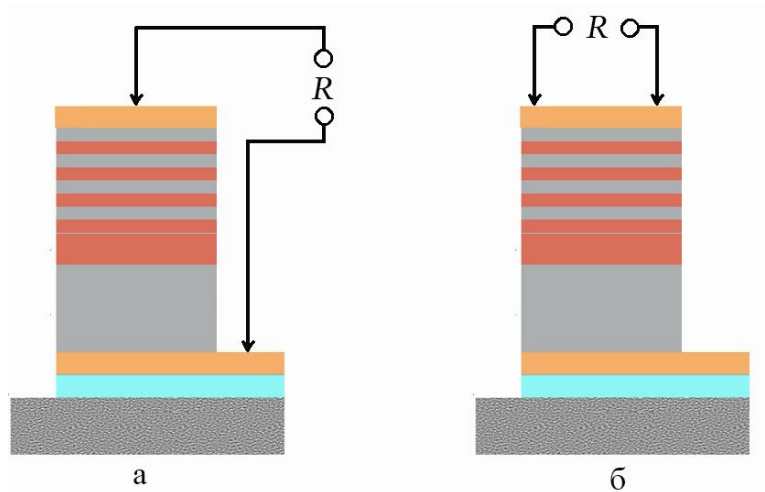


Рисунок 2.5 Перпендикулярна під буквою (а) та поздовжня під буквою (б) схеми включення функціональних елементів приладової металевої плівки в структуру спін-клапанного типу із використанням мультишару. [26]

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ ЗРАЗКІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

3.1. Вихідні дані

Для розрахунку вихідних плівкових систем спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) в одношарових та багатошарових плівках було обране тришарова структура була обрана система Fe/Au/Fe/П, де Fe – феромагнітний шар, а Au це немагнітний шар. Також в основу розрахунку була використана література з досліджень по магніторезистивним властивостям (а саме про магнітоопір) для даних зразків двох типів: для першого зразку були взяті структури Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П (де П – ситалова підкладка, $d_{Au} = 3-10$ нм – товщина немагнітного шару); а для другого була взята плівкова структура Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П ($d_{Au} = 3-10$ нм). Схематична структура зразка по який був проведений розрахунок зображений на рисунку 3.1.

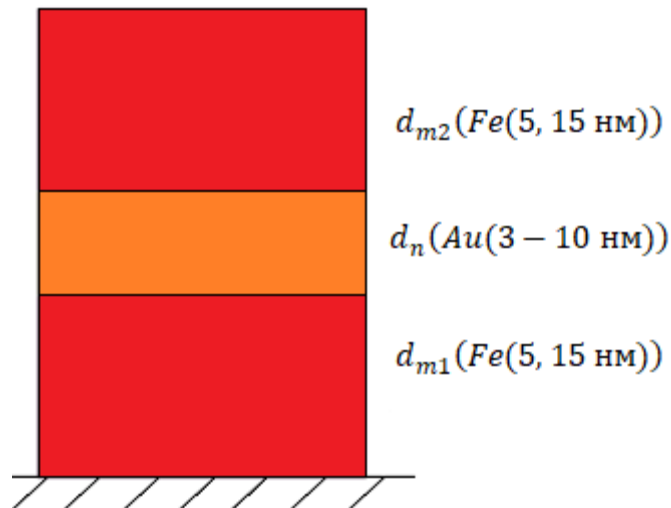


Рисунок 3.1 – Схематична структура зразка

Результати для вимірювання магнітоопору та досліджувані плівкові зразки були взяті з літературних даних для 3 орієнтацій які ми будемо брати та використовувати в розрахунку для магнітних полях і температур, можна глянути в таблиці 3.1.

Спочатку ми будемо розраховувати величину МО співвідношення розраховується за формулою:

$$MO = [R(B) - R(B_s)/R(B_s)] * 100\% \quad (3.1)$$

де $R(B_s)$ це електричний опір у магнітному полі якій насичений або максимально можливий до нього; $R(B)$ це поточне значення опору плівки в магнітному полі.

Таблиця 3.1 – Величина магнітного опору у трьох геометріях виміру гранульованого сплаву, який уже сформованих після того як пройшло термовідпалювання тришарових систем Fe/Au/Fe до $T_s = 300, 700$ і 900 К

Зразок	МО, %								
	поздовжн. геом.			попереч. геом.			перпенд. геом.		
	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К	300 К	700 К	900 К
Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,11	0,08	0,02	0,1	0,04	0,05	0,12	0,02	0,03
Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,15	0,15	0,06	0,12	0,05	0,07	0,11	0,08	0,1
Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,25	0,22	0,12	0,11	0,06	0,1	0,13	0,16	0,4
Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	0,07	0,05	0,12	0,03	0,06	0,1	0,02	0,04
Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,22	0,1	0,06	0,15	0,04	0,05	0,16	0,02	0,02
Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,27	0,12	0,1	0,2	0,04	0,04	0,15	0,16	0,02

3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання

Даний розрахунок потрібно почати із побудови залежності магнітного опору (δ) з співвідношенням товщини немагнітного до магнітних шарів. На рисунку 3.2 представлені зразки експериментальних результатів для вище зазначених які представлені у вигляді залежності δ від залежності товщини немагнітного прошарку d_n який нормований на товщину d_m .

Коли проаналізували залежність, яка представлена на рисунку 3.2, слід зазначити, те що коли зростає товщина немагнітного шару d_n від 3 до 10 нм виникає майже лінійне зростання амплітуди та магнітного співвідношення для обох типів зразків. Ці дані використовуються в розрахункових параметрах спінозалежного розсіювання: параметри в об'ємній асиметрії – α_m , питомого опору з більшим та з меншим носіями заряду, та параметра спінової асиметрії – β [27].

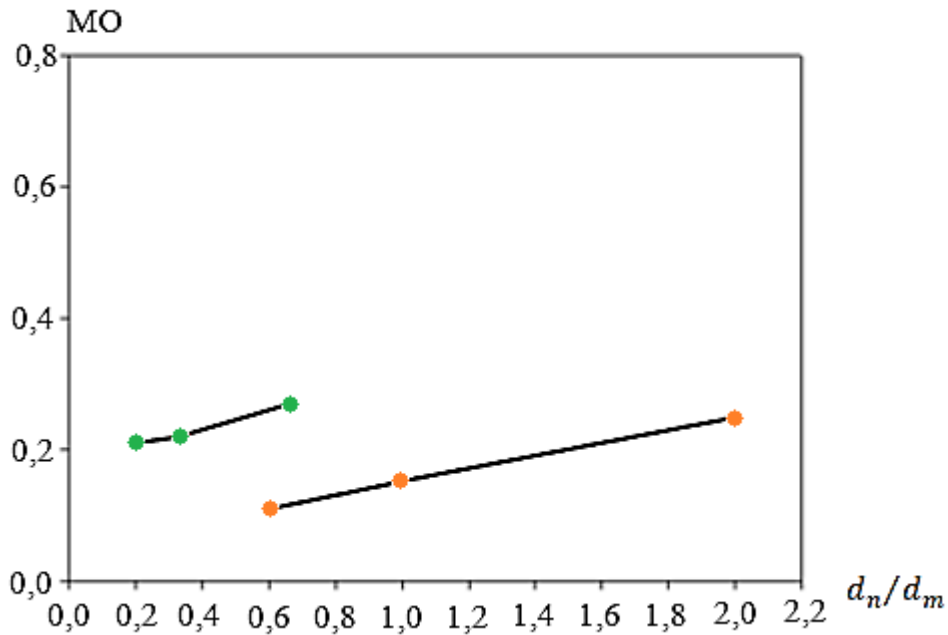


Рисунок 3.2 – Експериментальна залежність δ від товщини з немагнітним прошарками d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (●), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (●).

За даною формулою проводиться розрахунок параметра об'ємної асиметрії α_m :

$$\alpha_m = 1 + 2(1 + d_{n,m}) \left(\delta(d_{n,m}) + \sqrt{\delta(d_{n,m}) (1 + \delta(d_{n,m}))} \right), \quad (3.2)$$

В даній формули величина магніторезистивного ефекту δ і величина $d_{n,m}$ – експериментальні дані яких накреслені на рисунку 3.2. А результати розрахунку зведені в таблиці 3.2.

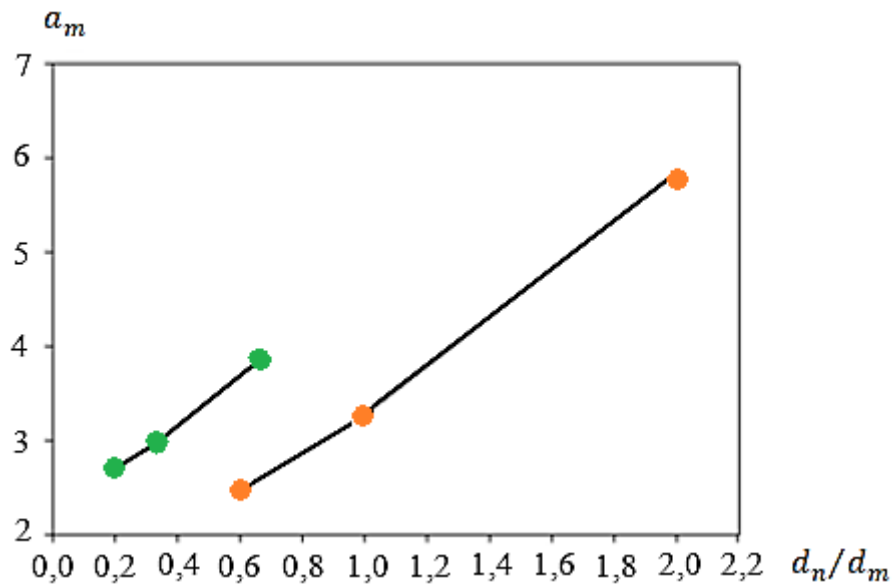


Рисунок 3.3 – Розрахункова залежність параметра об’ємної асиметрії, та співвідношення α_m від товщини не магнітного шару d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (\bullet), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (\bullet).

Коли проаналізувати дані для параметра об’ємної асиметрії α_m можна зазначити, що його показники змінюється у межах від 2,47 до 5,85 для систем Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П, а для систем Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П в межах 2,71 до 3,85.

Коли ми знаємо величину параметрів об’ємної асиметрії ρ_m і враховуючи те, що проміжного немагнітного шару ρ_n може дорівнювати питомому опору на мажоритарних носіях заряду ρ_m^+ (проміжного шару експериментальні дані золота наведені на рисунку 3.3), також можна розрахувати величини питомих опорів малих носіїв заряду ρ_m^- , а також і параметри спінової асиметрії β які обчислюється за формулами:

$$\rho_m^- = \alpha_m \rho_m^+ \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{(1+d_{n,m})\left(\delta(d_{n,m})+\sqrt{\delta(d_{n,m})(1+\delta(d_{n,m}))}\right)}{1+(1+d_{n,m})\left(\delta(d_{n,m})+\sqrt{\delta(d_{n,m})(1+\delta(d_{n,m}))}\right)} \quad (3.4)$$

Після розрахунку результати заносимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

№ п/п	Система	МО, %	α_m	$\rho_m^- \cdot 10^{-7}$, Ом·м	$\rho_m^+ \cdot 10^{-7}$, Ом·м	β
1	Fe(5)/Au(5)/Fe(5)/П	0,11	2,47	4,00	1,62	0,42
2	Fe(5)/Au(15)/Fe(5)/П	0,15	3,26	4,40	1,35	0,53
3	Fe(5)/Au(25)/Fe(5)/П	0,25	5,85	6,44	1,1	0,71
4	Fe(25)/Au(5)/Fe(25)/П	0,21	2,71	4,40	1,62	0,46
5	Fe(25)/Au(15)/Fe(25)/П	0,22	2,97	4,01	1,35	0,50
6	Fe(25)/Au(25)/Fe(25)/П	0,27	3,85	4,24	1,1	0,59

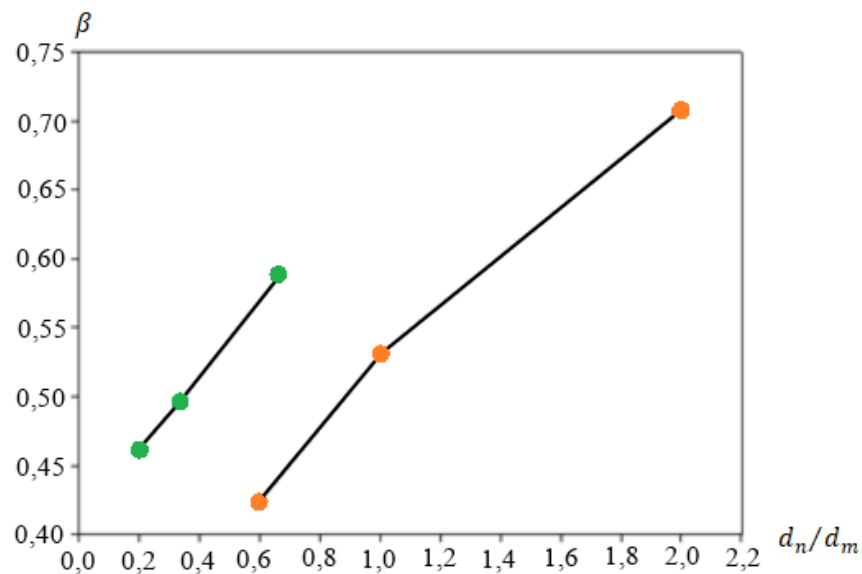


Рисунок 3.4 – Розрахункова залежність параметра спінової асиметрії β від товщини з немагнітним прошарком d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (●), а для 2 – $d_m = 5$ нм, $d_n = (3-10$ нм) (●).

Розрахунок залежності спінових параметрах асиметрії β від товщини не магнітного шару d_n однаковим на товщину d_m базовий магнітний шар якого для двох типів зразків представлена на рисунку 3.4.

Коли ми проаналізували мажоритальні дані то можна зробити наступні висновки що для системи Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П, на відміно від систем Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П, відбувається зниження величини ρ_m^- коли зростають товщини на немагнітних прошарках.

Порівнюючи всі дані для спінової асиметрії β можна зробити наступні висновки, що величини у межах від 0,42 до 0,71 для систем Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П змінюються так, а для систем у межах 0,46 до 0,59 Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П.

ВИСНОВКИ

По даній роботі можна зробити наступні висновки:

1. У сучасному мікроприладобудуванні та сенсориці знайшли широке застосування плівкові системи із спін-залежним розсіюванням електронів на основі немагнітного та магнітного металів. Для виготовлення тонкоплівкових чутливих елементів використовують поєднання NiFe та Cu, Si та Co або Cu та Co, тощо.

2. Матеріалом чутливого елементу тензодатчика є також багатошарова плівка на основі Cr, Co та Ni з товщинами окремих шарів від 10 до 100 нм. На практиці найбільший інтерес представляють тонкі плівки, так як вони мають значно кращі тензорезистивні характеристики, ніж плівкові зразки з товщиною більше 100 нм.

3. Варіантом виконання ефективної та простої спін-вентильної структури є багатошарова структура типу «сендвіч», що виконується за схемою «магнітний шар 1 / немагнітний прошарок / магнітний шар 2». Магнітний шар 1 та 2 виконуються у вигляді тонких плівок Co, або Fe. Немагнітний прошарок виконується з плівок металу з високою електропровідністю, наприклад, Cu або Au.

4. Значення величини спінової асиметрії β в зразках Fe(5)/Au(d_{Au})/Fe(5)/П змінюється у межах від 0,42 до 0,71, тоді яку для системи Fe(15)/Au(d_{Au})/Fe(15)/П – від 0,46 до 0,59.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алейников А. Ф. Датчики (перспективные направления развития): учебное пособие / А. Ф. Алейников; под ред. М. П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
2. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника [Текст] / М. Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 554 с.
3. Джексон Р. Г. Новейшие датчики [Текст] / Р. Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Энциклопедия промышленности. Контрольно измерительные средства / сост. Л. К. Пташный. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Сов. энциклопедия, 1971. - 428 с.
5. Высокочастотный индуктивный датчик / Большая Энциклопедия Нефти и Газа. Электронная библиотека «Нефть-Газ» [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ngpedia.ru/> – Дата доступа: 28.11.2020.
6. Проценко І. Ю., Саєнко В. А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості). – Суми: СумДУ, 2002. – 187 с.
7. Великодний Д. В, Гричановська Т. М., Однодворець Л. В., Проценко І. Ю., Проценко С. І. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) // Вісник Сумського державного університету. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – №1. – С. 5–51.
8. Стасюк З. В. Розмірні кінетичні явища в тонких плівках металів Класичні ефекти (огляд) / [Стасюк З. В., Лопатинський А. І.]// Фізика і хімія твердого тіла, 2001. – Т. 2, № 4. – С. 521–542.
9. Однодворець Л.В. Ефект тензочутливості в металевих плівкових матеріалах/[Л.В. Однодворець, С.І. Проценко, А.М. Черноус, І.Ю. Проценко]// Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. Суми, 2007. – 48 с.

10. Мейксин З. Г. Физика тонких плёнок / Мейксин З. Г. – Москва: Мир, 1978. – 184 с.
11. Kravchenko V. A. Structure and electrophysical properties of Ni-Co alloy films within 300-1300 K temperature range / [V. A. Kravchenko, V. B. Loboda, I. Yu. Protsenko et al.]// *Functional Materials*. – 1999. – V.6, No5. – P. 892 – 896.
12. Що таке тензодатчик і як він працює. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://samelectryk.in.ua/> (Дата доступу: 28.11.2020 р.).
13. Г. И. Лурье. Датчики давления для общепромышленного применения. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.manometr.com/lematt/r174-1.pdf (Дата доступу: 28.11.2020 р.).
14. Pressure Transmitters. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.trafag.com/products/pressuretransmitters/#fndtn-ctab1629 (Дата доступу: 28.11.2020 р.).
15. Luby S. Tailoring of multilayer interfaces by pulsed laser irradiation / S. Luby, E. Majkova // *Applied Surface Science*. – 2005. – V. 248. – P. 316-322.
16. Butler W. H. First-principles calculations of electrical conductivity and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves / W. H. Butler, X.-G. Zhang, D. M. C. Nicholson // *Physical Review A* – 1995. – V. 52, No 18. – P. 13399-13410.
17. Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves / C. Blaas, L. Szunyogh, P. Weinberger et al. // *Physical Review B*. – 2002. – V.65. – P.134427-1–134427-8.
18. 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.
19. Cheshko I. Magneto-optical and magnetoresistive properties of Co/Cu(Au)-based spin-valve structures / I. Cheshko, S. Protsenko, L. Odnodvoretz // *Technical Physics Letters*. – 2009. – V.35, No10. – P. 903 – 905.
20. Magnetic and magnetoresistance studies of nanometric electrodeposited Co

- films and Co/Cu layered structures: Influence of magnetic layer thickness / S. Zsurzsa, L. Péter, L. F. Kiss et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – V. 421. – P. 194–206.
21. Matthesab P. Pseudo spin valve thin films with crossed magnetic anisotropies / P. Matthesab, M. Albrecht // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2015. – V. 233. – P. 275-278.
22. Annealing behaviour of structural and magnetic properties of evaporated Co thin films / M. Jergel, Y. Halahovets, P. Siffalovic et al. // *J.Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – V.42.– P.135406-135414.
23. Формування приладових наноструктур спін-клапанного типу на основі Co і Cu / І. В. Чешко, М. В. Костенко, В. І. Гребинаха та ін. // *Журнал нано-та електронної фізики*. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 03041(4).
24. Magnetoresistance and Anomalous Hall Effect with Pt Spacer Thickness in the Spin-Valve Co/Pt/[Co/Pt]₂Multilayers / F. Zhang, Z. Liu, F. Wen // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2017. – V. 30, No. 2. – P. 533–538.
25. Magnetization reversal signatures in the magnetoresistance of magnetic multilayers / P. Perna, C. Rodrigo, M. Muñoz et al. // *Physical Review B* – 2012. – V. 86. – P. 024421(6).
26. Шабельник Ю.М., Чешко І.В., Логвинов А.М., Ткач О.П., Проценко С.І., Патент на корисну модель «Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-клапанного типу» № 136613 (27.08.2019 р.).
27. Calculation of Spin Polarized Transport Parameters in "Simetric" GMR Structures of Co/Cu/Co Type / L.V. Dekhtyaruk, A.P. Kharchenko, Yu.O. Shkurdoda [et al.] // *Proc. NAP-2017*. – 2017. – V. 6(2) – 02MFPM04.