

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУР ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ
НАНОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ**

Здобувача групи ЕП-91 Фролова Данила Валерійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Данило ФРОЛОВ

Керівник: доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
к.ф.-м.н., доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю. Проценко
«16» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Фролова Данила Вадимовича

1. Тема роботи: **МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУР ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАНОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ**

затверджена наказом по університету від «15» травня 2023р., №0499-VI

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 12 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

На теперішній час велика увага приділяється розробці та пошуку нових матеріалів для чутливих елементів тонкоплівкових сенсорів та моделюванню структур чутливих елементів наноелектронних сенсорів.

Використання різних методологічних підходів для покращення фізичних властивостей тонкоплівкових наноструктур може включати в себе створення багатошарових плівкових наноструктур спінової структури типу або мультишарів, які створюються на основі різних магнітних і немагнітних металів, а також використання різних наноструктур, таких як упорядковані масиви магнітних наночастинок, шари графеноподібних нанокластерів тощо. Ці методи можуть сприяти підвищенню надійності, повторюваності та стати важливим рішенням для сучасної гнучкої електроніки.

Мета кваліфікаційної роботи полягала в проведенні огляду і аналізу літературних джерел стосовно конструкційних особливостей та фізичних принципів функціонування тонкоплівкових сенсорів; проведення розрахунку параметрів спінової залежності розсіювання для плівкових систем на основі Fe і Cr.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити)

1. У літературному огляді представити результати моделювання структур чутливих елементів та конструкційних особливостей наноелектронних сенсорів.

2. Провести критичний аналіз характеристик тонкоплівкових структур для чутливих елементів наноелектронних сенсорів.

3. Навести результати розрахунків тришарових плівкових зразків спін-вентильного типу.

4. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди №1-2 – Мета та актуальність роботи.

Слайди №3-6 – Моделювання структур чутливих елементів наноелектронних сенсорів (літературний огляд).

Слайди №7-8 – Характеристика тонкоплівкових структур для чутливих елементів електронних сенсорів.

Слайди № 9-11 – Результати розрахунків тришарових плівкових зразків спін-вентильного типу.

Слайд № 12 – Висновки

Слайд № 13 – Список публікацій

6. Дата видачі завдання 16.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 04.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Підготовка тексту кваліфікаційної роботи	до 11.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	20.06.2023 р., 10-00 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Фролов Д.В.

Керівник

Шабельник Ю.М.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 34 сторінках, зокрема, містить 20 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 23 найменувань.

Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в сенсориці, як елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, датчиків магнітного поля тощо. Ці фактори і визначають актуальність даної роботи, а самі дослідження фізичних властивостей тонкоплівкових структур як чутливих елементів датчиків та сенсорів є важливими та своєчасними.

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

У результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено аналітичний огляд стосовно конструкційних особливостей та фізичних принципів функціонування тонкоплівкових сенсорів, розглянуті типи матеріалів для їх створення.

Розраховано параметри спін-залежного розсіювання для плівкової системи Fe/Cr/Fe/П. Значення величини спінової асиметрії β в зразках Fe(10)/Cr(d_{Cr})/Fe(15)/П змінюється у межах від 0,81 до 0,91, тоді яку для системи Fe(15)/Cr(d_{Cr})/Fe(20)/П – від 0,81 до 0,89. Розрахункові дані можуть бути використані при підготовці практичних робіт з дисципліни «Інформаційні і сенсорні пристрої на основі ГМО-ефекта»

За матеріалами кваліфікаційної роботи була опублікована теза доповіді на Міжнародній науковій конференції «Фізика: Електроніка: Електротехніка: 2023» (м. Суми, СумДУ, 24-28 квітня 2023 р.).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГІГАНТСЬКИЙ МАГНІТООПР, ДАТЧИКИ ХОЛЛА, МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ, ПАРАМЕТРИ СПІНОВОЇ АСИМЕТРІЇ, ПСЕВДО СПІН-КЛЯПАН, ТОНКІ ПЛІВКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУР ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАНОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	7
1.1. Фізичні основи роботи сенсорів тиску та температури.....	7
1.2. Основні конструкційні типи сенсорів тиску та температури.....	8
1.2.1. Ємнісні датчики тиску.....	9
1.2.2. П'єзоелектричні та п'єзорезистивні датчики тиску.....	11
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ	20
2.1. Чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску.....	20
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ	26
3.1 Вихідні дані.....	26
3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання.....	28
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	33

ВСТУП

Завдяки сучасному розвитку електроніки з'являються нові вимоги до пристроїв та компонентів, які здатні працювати як у звичайних, так і в екстремальних умовах. Для підвищення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик приладів використовується ефективний підхід – заміна традиційних конструкційних матеріалів, таких як сталь та сплави, на нові перспективні матеріали.

На сьогодні велика увага в розвитку електронного приладобудування приділяється розробці та пошуку нових матеріалів для чутливих елементів тонкоплівкових сенсорів. Моделювання властивостей таких структур має ряд переваг. Використання різних методологічних підходів для покращення термостабільності металевих багат шарових наноструктур може включати в себе створення багат шарових плівкових наноструктур спін-клапанного типу, які базуються на різних магнітних і немагнітних металах, а також використання різних наноструктур, таких як упорядковані масиви магнітних наночастинок, шари графеноподібних нанокластерів, шари графену тощо. Ці методи можуть сприяти підвищенню надійності, повторюваності та стати важливим рішенням для сучасної гнучкої електроніки.

Такий підхід дозволяє, зробивши аналіз отриманих нових експериментальних і розрахункових даних, підібрати всі складові компоненти спін-клапанних структур, що будуть мати оптимальні робочі параметри, стабільні до дії температури та у подальшому реалізувати на їх основі компоненти функціональної електроніки.

Мета кваліфікаційної роботи полягала в аналізі конструкційних особливостей тонкоплівкових сенсорів для датчиків тиску та розгляд способів моделювання основних параметрів чутливих елементів таких датчиків.

РОЗДІЛ 1.

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУР ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАНОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Фізичні основи роботи сенсорів тиску та температури.

Тиск p є вимірюваною фізичною величиною, що відповідає силі, що діє на одиницю площі поверхні тіла, і має напрямок, що перпендикулярний до цієї поверхні:

$$p = \frac{F_n}{S},$$

де S – площа поверхні, на яку діє сила;

F_n – складова цієї сили, яка є перпендикулярною до поверхні.

Існує три основних типи вимірювання тиску:

- Абсолютний тиску, який вимірюється відносно абсолютного вакууму;
- Надлишковий, який вимірюється відносно атмосферного тиску;
- диференціальний, який вимірює різницю між тисками у двох точках.

Найпоширенішими типами сенсорів тиску є термопари, напівпровідникові сенсори, капсульні та п'єзоелектричні сенсори.

Вимірювальний прилад повинен відповідати таким факторам як:

- параметри точності і чутливості;
- умови навколишнього середовища;
- діапазон тисків;
- характеристики використовуваних речовин в середовищі[1].

В даний час запропоновано широкий вибір моделей датчиків і вони поділяються на:

1. ємнісні;
2. п'єзорезистивні;
3. п'єзоелектричні;

4. трибоелектричні. [2]

Серед цих моделей об'єктом досліджень став саме ємнісний датчик завдяки своїй високій продуктивності, стабільності та малому часу відліку. Ємність цього типу датчику визначається за такою формулою [3]:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.1)$$

де ε_r – діелектрична константа матеріалу між пластинами (це 1 для вакууму);

ε_0 – електрична константа (дорівнює $8,854 \times 10^{-12} \text{ Ф} \times \text{м}^{-1}$);

S – площа пластин;

d – відстань між пластинами.

Чутливість є важливим показником для вимірювання продуктивності датчика.

1.2. Основні конструкційні типи сенсорів тиску та температури

В більшості випадків датчики тиску укладені у невеликий відсік рідину з однією пружиною. Вимірювання тиску можна здійснювати шляхом вимірювання відхилення еластичної стінки або шляхом перетворення електричних сигналів. Пружні датчики тиску відрізняються високою чутливістю до змін тиску, але вони також характеризуються крихкістю і вразливістю до вібрації. Крім цього, пружні датчики тиску є більш витратними порівняно зі звичайними манометрами. Тому вони частіше використовуються для передачі вимірювання даних та вимірювання різниці тисків.

Мембрани, які представлені на рисунку 1.1, складаються з металевих дисків і використовують для їх пружних властивостей. В той же час, інші пружні елементи виготовлені з гнучких матеріалів і діють на мембрани як опора.

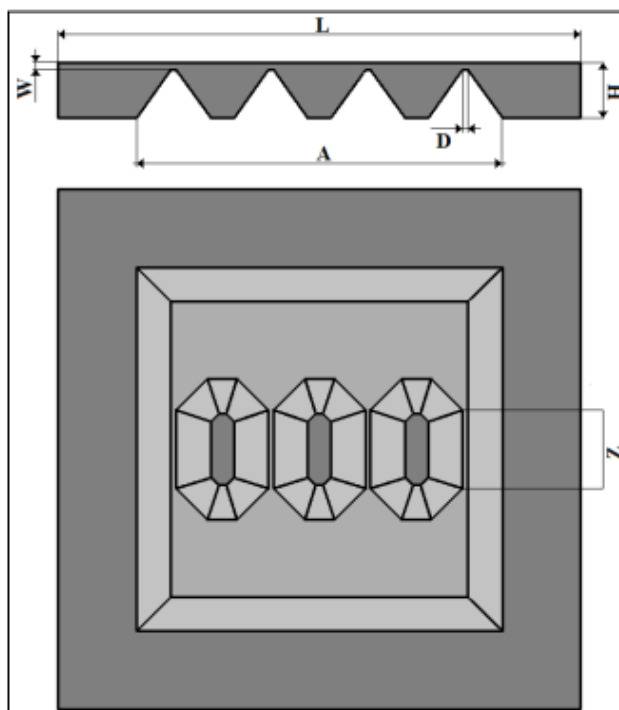


Рисунок 1.1 – Геометрична структура мембрани: L – довжина сторони матриці, W – товщина мембрани, H – висота мембрани, A – довжина сторони мембрани, D – ширина простору між жорсткими острівцями і рамою, Z – довжина краю жорсткого острівця. Адаптовано з роботи [4]

Мембрани виявляють високу чутливість до раптових змін тиску. Металева мембрана здатна вимірювати значний тиску до 7 МПа, тоді як мембрана з пружного матеріалу може забезпечувати вимірювання низького тиску в діапазоні від 0,1 кПа до 2,2 МПа, коли вона підключена до ємнісних перетворювачів або датчиків перепаду тиску [3].

1.2.1. Ємнісні датчики тиску

Робота ємнісних датчиків базується на зміні їх чутливого елемента, такої як діафрагма, під впливом прикладеної сили, тиску або прискорення. Схематичне зображення принципу роботи можете побачити на рисунку 1.2.

Конденсатор складається з двох пластин, які розташовані паралельно одна одній і між ними є невеликий зазор.

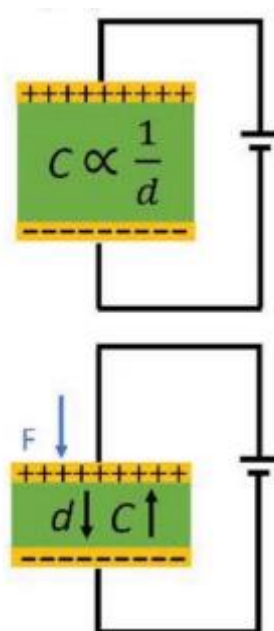


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення принципу роботи ємнісного датчика тиску. Адаптовано з роботи [5]

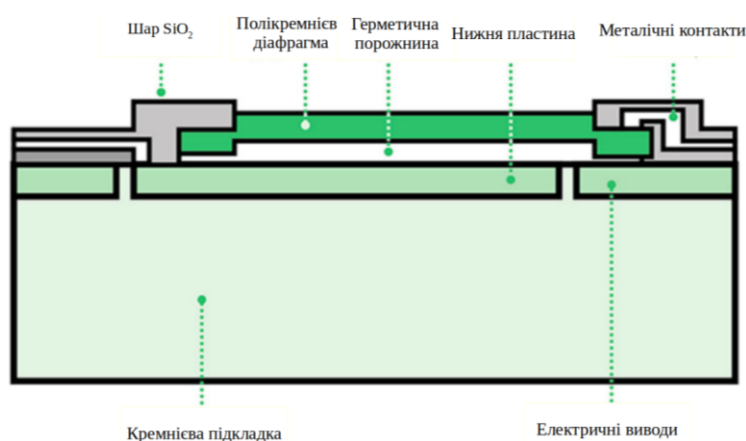


Рисунок 1.3 – Конструкція ємнісного сенсора тиску. Адаптовано з роботи [6]

Зазвичай в ємнісних датчиках один з електродів є чутливим до тиску діафрагмою, а другий електрод є фіксованою пластиною. На рисунку 1.3 показано приклад конструкції ємнісного датчика тиску, який може бути виготовлений на кремнієвій мікросхемі.

Для зафіксування зміни ємності, сенсор вбудовують в регульовану схему, яка включає як сам датчик, так і індуктор. Це може призвести до зміни частоти генератора або змінного струму резонансного кола. Для створення діафрагми

використовуються різноманітні матеріали, до яких відносять кремній, кераміка, тощо. Зазвичай ємність самого датчика становить між 50 та 100 пікофарадами.

Також існує метод узгодження ємнісного сенсора з зовнішньою схемою. Він називається методом резонансної частоти. В даному методі сенсор інтегрується в коливальний контур, а вихідний сигнал формується на основі резонансної частоти та періоду синусоїдальних коливань. Сенсори, які вимірюють статичні деформації, підключаються до мостових схем зі змінним струмом, тоді як сенсори, що вимірюють динамічні деформації, підключаються до джерела постійного струму. Щоб забезпечити високу чутливість у ємнісних сенсорах, використовують джерела поляризації з великим значенням напруги та конденсатори зі значно меншою загальною ємністю[7].

Зі збільшенням тиску відносна проникність повітря та інших газів може змінюватися, що може негативно вплинути на лінійність характеристик датчиків. Однак, цей негативний вплив може бути змінений для датчиків, що вимірюють абсолютний тиск.

Для покращення системи можна використовувати два плечі в мостовій схемі постійного струму, що дозволить створити лінію вихідного сигналу. Це досягається за допомогою наступної формули:

$$U_{\text{вих}} = \left(\frac{U_{\text{жив}}}{2d} \right) \cdot x, \quad (1.2)$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга;

$U_{\text{жив}}$ – напруга живлення;

$2d$ – відстань між крайніми пластинами конденсатора;

x – зміщення центральної пластини.

1.2.2. П'єзоелектричні та п'єзорезистивні датчики тиску

П'єзоелектричні датчики засновані на властивостях деяких кристалів перетворювати механічні деформації у зміну кількості електричних зарядів на

гранях кристала.

Схематично конструкція та зображення принципу роботи такого датчика показані на рисунках 1.4 та 1.5 відповідно. Напруга і сила, яка прикладається на діафрагму датчика, пов'язані пропорційно. При прикладенні сили генерується напруга [8].

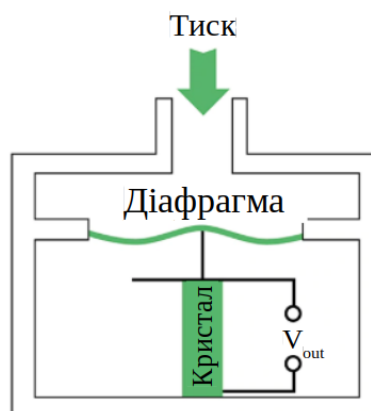


Рисунок 1.4. – Схематична будова п'єзоелектричного датчика тиску.

Адаптовано з роботи [8]

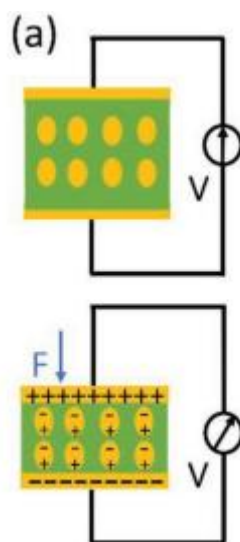


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення принципу роботи п'єзоелектричного сенсора тиску. Адаптовано з роботи [5]

Основний елемент датчика цього типу це пластина, що вирізана у певну форму. Електричні та механічні характеристики п'єзоелемента залежать від типу кристала, розмірів пластини і орієнтації її граней відносно кристалографічних осей.

Поява зарядів на гранях кристала можна пояснити через зміну взаємного розташування позитивних та негативних іонів у кристалі. Знайти цей заряд можна за допомогою цієї формули:

$$q = F \times d, \quad (1.3)$$

де d – п'єзоелектричний модуль матеріала;

F – сила, що прикладається.

Величина сигналу датчика прямопропорційна п'єзомодулю d .

В якості чутливих елементів до гідростатичного тиску, можуть застосовувати кристали цукрози, турмаліну, винної кислоти. Ще одним варіантом сенсорного елемента є хрестоподібний промінь, який розташований по периметру опорного кільця, на якому в свою чергу розташована мостова схема металоплівкових тензодатчиків та п'єзоелектричних ємнісних датчиків (рисунок 1.6).

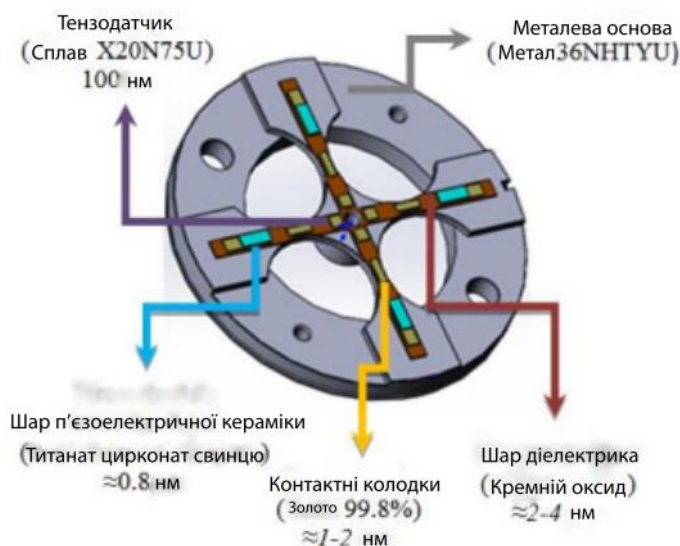


Рисунок 1.6 – Чутливий елемент з інтеграцією тонких п'єзоелектричних плівок і металевої плівки тензодатчику. Адаптовано з роботи [9]

Промінь виготовлений з еластичного сплаву з високим модулем пружності. У цій структурі тензодатчики сформовані за технологією термовакuumного напарювання сплаву. Тонкі плівки титанату-цирконату свинцю формуються

шляхом високочастотного напилення при потужності в 300 Вт [9].

Кераміка, як матеріал для основи датчика має більші частотні діапазони роботи в порівнянні з кремнієм. Кварцові датчики можуть застосовуватися в діапазоні температур навколишнього середовища від 196 °С до +399 °С. Температурний діапазон керамічних датчиків від – 55 до +100 °С. Температурний діапазон залежить головним чином від точки Кюрі п'єзоелектричного матеріалу, що застосовується.

Кварцевий п'єзоелектричний датчик може працювати при температурах до 500 °С, при температурі 573 °С п'єзоелектричний ефект зникає, але це датчик, який не має внутрішнього підсилювача, тобто датчик подає на вихід заряд. Характеристики при малих частотах визначаються швидкістю розрядження підсилювача [11].

Кристал являє собою заряджений конденсатор, напруга на обкладках якого визначається виразом:

$$U = \frac{q}{C}, \quad (1.4)$$

де q – електричний заряд кристала;

C – ємність кристала.

Характеристику чутливості п'єзоелектричного датчика тиску можна розрахувати за формулою:

$$B = \frac{\Delta U}{\Delta F} = d \frac{h}{\varepsilon S}, \quad (1.5)$$

де B – чутливість;

h – товщина кристала;

ε – діелектрична проникність кристала;

S – площа пластини.

Важливим фактором, що забезпечує надійність роботи п'єзоелектричних датчиків тиску є захист їх від впливу вологи і солей, що містяться в атмосфері, так як навіть невеликий вміст вологи або солей може призвести до значного зниження вихідного сигналу [12-13].

Для стабільної роботи датчика обирають діапазон кривої, що відносно прямий, цей діапазон показано на рисунку 1.7. При малих частотах заряд не може тримати статичне значення та зменшується з часом, а якщо частоти занадто високі, то датчик входить в резонанс та має пік характеристик.

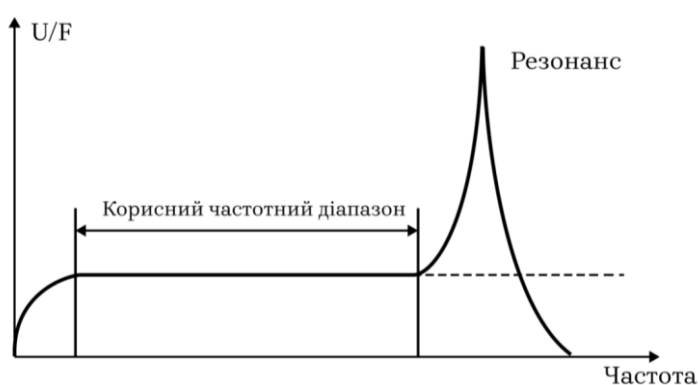


Рисунок 1.7 – Приклад частотної характеристики п'єзоелектричного датчика.

Адаптовано з роботи [12]

При використанні п'єзорезистивних датчиків тиску, вихідний сигнал є лінійним і має широкий діапазон від 0,5 кілопаскаль до 80 мегапаскаль з високою точністю приблизно 1%. Кераміка в датчиках старіє з часом, що призводить до зменшення чутливості близько 1% протягом року. [14].

Схеми п'єзорезистивних сенсорів тиску представлені на рисунку 1.8. Для вимірювання тиску використовують п'єзорезистивні датчики, які мають міст Уітстона на основі кремнію як свій вимірювальний елемент. Під дією тиску, цей датчик незначно розширюється, що змінює його електричний опір. З конструктивної точки зору, тензодатчик кріпиться до діафрагми, яка реагує на зміну опору при розтягуванні.

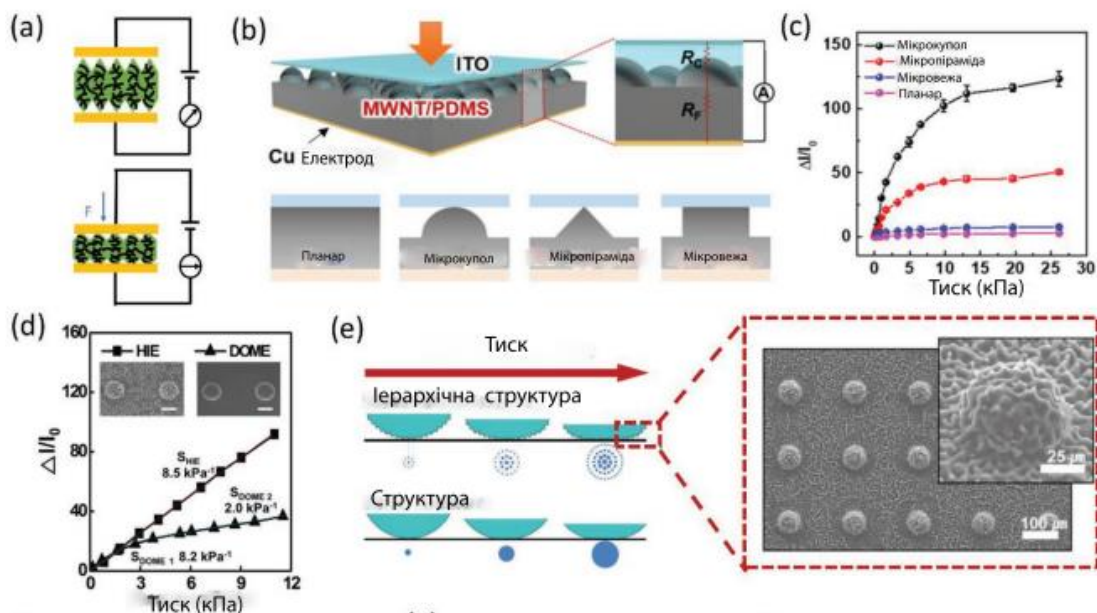


Рисунок 1.8 – П'єзорезистивні сенсори тиску (а – схематичне зображення механізму, б – активні речовини з чотирма різними морфологіями, розміщеними у вертикальній площині, с – відповідні криві переносу датчиків, д – Криві передачі п'єзорезистивних плівок з ієрархічною структурою (HIE) та без ієрархічної, структури (DOME), е – вплив ієрархічної системи на зростання контактів між електродом та матеріалом. Адаптовано з роботи [5]

Фактор зміни опору:

- Обмеження кількості матеріалів у можливості зміни свого опору при деформації (п'єзорезистивний ефект);
- Зменшення товщини провідника під час розтягування – обмеження протікання струму [17].

За допомогою даної формули можна обчислити коефіцієнт чутливості п'єзорезистивного датчика:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}, \quad (1.6)$$

де ΔR – абсолютна зміна опору;

R – початкове значення опору;

ε – деформація чутливого елемента.

Через дану формулу можна розрахувати деформацію чутливого елемента:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1.7)$$

де ΔL – абсолютна зміна довжини;

L – довжина недеформованого елемента.

Завдяки механічній дії, опір резисторів зазнає змін, яка відображається у величині ΔR . Ця зміна опору має прямий вплив на вихідну напругу.

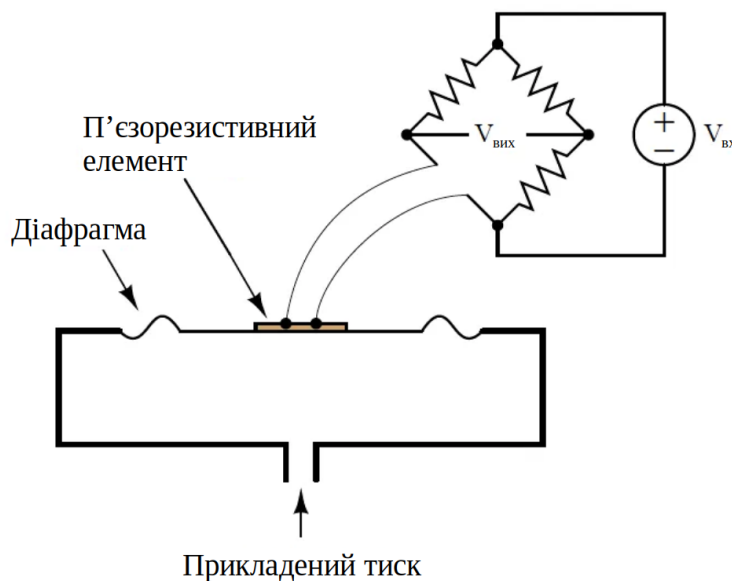


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення мосту Уїтстона з одним п'єзорезистивним елементом. Адаптовано з роботи [15]

Схема Уїтстона, яка вказана на рисунку 1.19 використовується для вимірювання зміни опору, що виникає внаслідок деформації.

При дії тиску рідини, діафрагма починає вигинатися назовні, що призводить до розтягування тензодатчика і збільшення його опору. Змінення опору в цьому випадку порушує баланс мостового кола, в результаті чого виникає вихідна напруга ($V_{\text{вих}}$), яка пропорційна прикладеному тиску. Завдяки цьому, тензодатчик виконує функцію

перетворення прикладеного тиску на вимірювальний сигнал напруги, який може бути подальше підсилено і конвертовано у сигнал струму в діапазоні від 4 до 20 мА або цифровий сигнал.

Для розрахунку зміни опору використовується відповідна формула:

$$V_{\text{вих}} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] \times V_{\text{вх}}, \quad (1.9)$$

де R_1, R_2, R_3, R_4 – опори резисторів;

$V_{\text{вх}}$ – напруга живлення.

Від положення датчиків відносно центру діафрагми і орієнтації чутливого елемента залежить їх механізм розтягування та стискання. На рисунку 1.10 показано як положення резистора дає вплив на його деформацію.

Для кріплення датчиків деформації до діафрагми використовується спеціальний клей, який зберігає свою цілісність при високих температурах і надійно передає деформацію на датчик. Чутливий елемент може бути виготовлений з металів або напівпровідників.

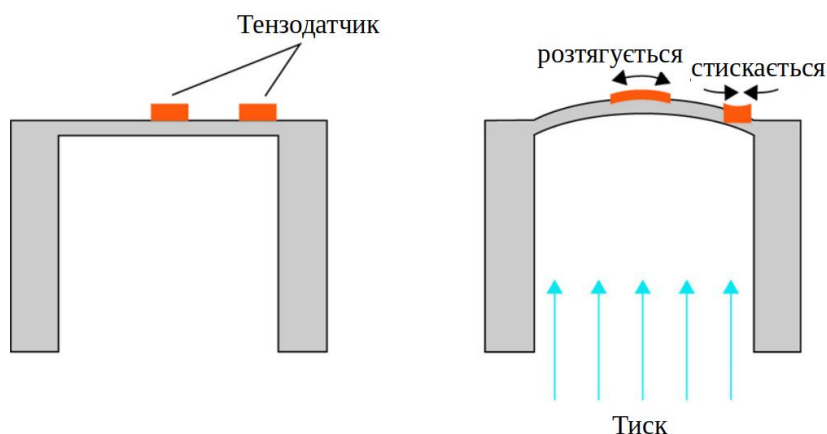


Рисунок 1.10 – Деформація резистора в залежності від місця розташування.

Адаптовано з роботи [16]

У деяких конструкціях датчиків використовується одна кремнієва пластина, яка виконує дві функції – вона служить як діафрагма і, одночасно, як тензодатчик. Ця пластина наноситься на кремній, щоб повністю використовувати механічні властивості кремнію. Проте тиск у кремнію потрібно передавати до діафрагми через

нехімічну рідину для заповнення, бо кремній сам по собі не має хімічну сумісність з великою кількістю рідин.

Механізм передачі тиску у цій конструкції полягає в тому, що металева ізолююча діафрагма передає тиск, що створюється технологічною рідиною, на рідину для заповнення. Рідина для заповнення, у свою чергу, передає цей тиск на кремнієву пластину.

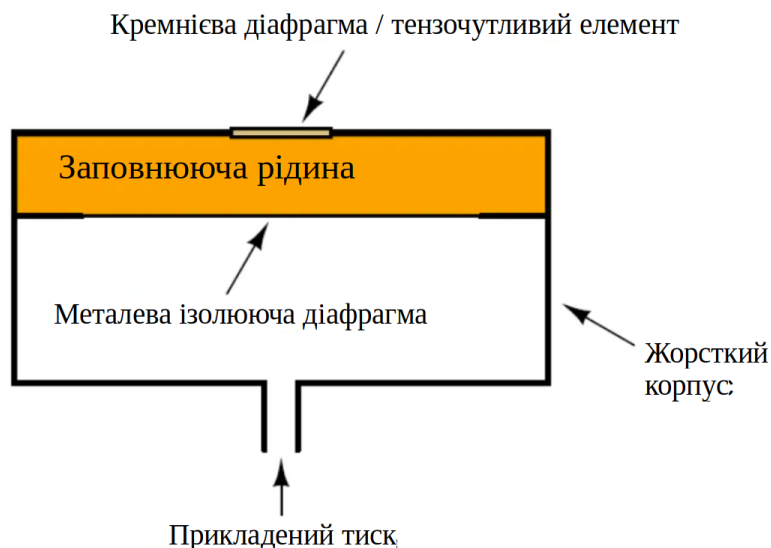


Рисунок 1.11 – Конструкційна схема кремнієвого тензодатчика.

Адаптовано з роботи [17]

Діафрагма, яка зображена на рисунку 1.11, розроблена як ізолюючий елемент, який передає тиск від технологічної до заповнюючої рідини.[17]

Кремнієві датчики мають коефіцієнт вимірювання в межах 100-200, це спричинене додатковим легуванням домішками. Сигнал на виході становить 10 мВ/В. Варто пам'ятати, що велика залежність від температури погіршує характеристики, але навіть при цьому напівпровідникові елементи кращі за металеві.

РОЗДІЛ 2.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР ДЛЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ

2.1. Чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску

Зазвичай, у традиційних конденсаторах пластини мають фіксовані розміри та площу. Для ізоляції між пластинами використовуються речовини, які характеризуються своєю величиною опор.

На рисунку 2.1 представлена модель чутливого датчика для вимірювання змінного і статистичного тиску, побудований на основі кремнієвих полюсів зі сформованих платиновими доріжками, які інтегровані п'єзoeлектричними ємнісними структурами з напівпровідниковими тензодатчиками [9].

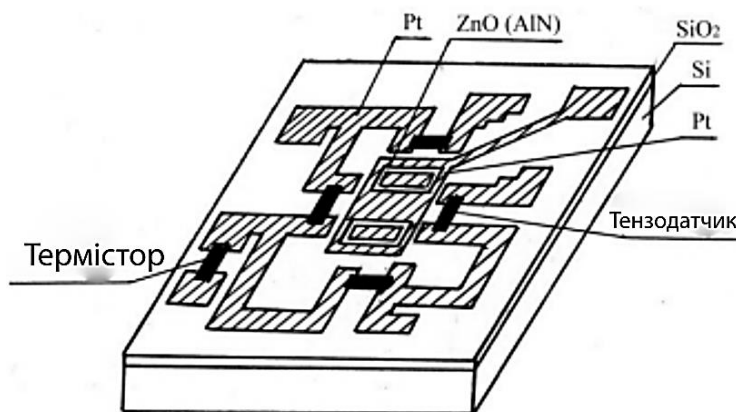


Рисунок 2.1 – Модель чутливого елементу датчика тиску. Адаптовано з роботи [9]

Принцип роботи конденсатора в тому, що якщо одна пластина буде підключена до додатного джерела електричного струму, а друга – до від'ємного, то на обох пластинах будуть різні заряди. Ці заряди будуть утримуватися на пластинах навіть після відключення від джерела живлення, оскільки зарядки притягуються один до одного, проте діелектрик, який розташований між пластинами і не

проводить струм, перешкоджає їхньому злиттю. Тому заряди залишаються на своїх місцях через силу тяжіння.

Конденсатор накопичує електричне поле і поляризує діелектрик, який знаходиться між пластинами. В ньому молекули вирівнюються у визначеному порядку. Негативні полюса молекул спрямовані в сторону до додатнього заряду, а додатні полюси – до від’ємного заряду

Для поліпшення вихідного сигналу використовують датчики з трьома пластинами, серед яких середня пластина виступає в ролі діафрагми. Завдяки цьому є можливість створення двох конденсаторів, що покращує параметри датчики.

Зазвичай для ємнісних датчиків використовуються два типи мембран: “затиснута” діафрагма та діафрагма, що виготовлена з цільного шматка матеріалу. На рисунку 2.2 показані ці типи діафрагм.



Рисунок 2.2 – Діафрагми ємнісних датчиків тиску. Адаптовано з роботи [18]

Щоб зрозуміти структуру ємнісного сенсора тиску, потрібно розглянути конструкцію датчика, яка схематично зображена на рисунку 2.3. Можна побачити, що даний датчик вимірює саме різницю тисків, через наявні в ньому два входи. У цій конструкції чутливий елемент — туга суцільна металева діафрагма, розташована рівновіддалено між двома нерухомими металевими поверхнями, утворюючи з ними пару електричних конденсаторів. Силіконове масло, яке заповнює проміжок між обкладками конденсатора, виконує роль діелектрика та забезпечує передачу тиску від роздільної до чутливої діафрагм. Роздільні діафрагми необхідні для захисту чутливої діафрагми від агресивного середовища. Корпус цього датчика обмежує роздільні діафрагми не даючи їм передати тиск, при якому чутлива діафрагма вийде з ладу.

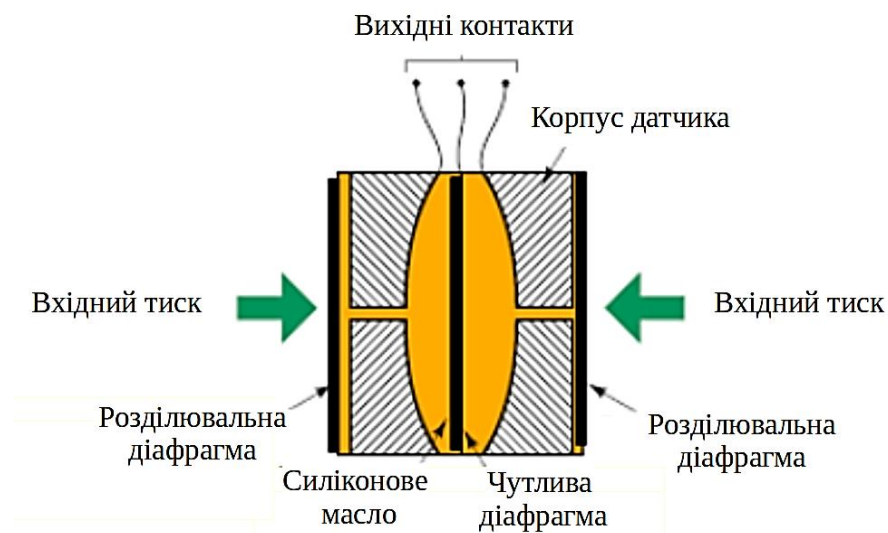


Рисунок 2.3 – Схематична конструкція ємнісного датчика тиску.

Адаптовано з роботи [19]

Щоб досягти лінійності ємнісних датчиків треба, щоб діафрагми мали рівну поверхню в центральній частині. Зазвичай вважають, що ємнісні датчики мають лінійність при умові, якщо переміщення діафрагм менше за їх товщину. Одним із методів підвищення лінійності полягає у використанні гофрованих діафрагм.

Тонкоплівкові ємнісні датчики використовують поліїмідні плівки в якості діелектрика, оскільки ці матеріали характеризуються високою термостійкістю, низьким рівнем викидання газів і стійкістю до випромінювання. Плівка може працювати довгий час при температурі до 230°C і короткий час до 400°C. Товщина плівки може варіюватися в діапазоні від 10 до 25 мікрометрів. Для контактів використовуються матеріали, такі як алюміній, нікель або їх сплави [19].

Під дією тиску на сенсорі, який вказаний на рисунку 2.4 відбувається деформація в області комірки. Поза межами чутливого елемента тонка плівка працює при дії на неї пружності. У всіх режимах роботи сенсора в плівці відбуваються зміни лінійних розмірів. Так як чутливий елемент сенсора складається з неподільної тонкої плівки, можна не брати до уваги опорні реакції за радіусом перфорації.

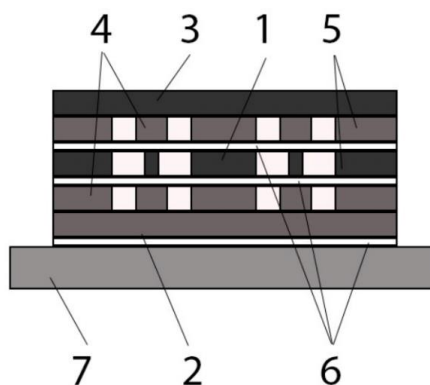


Рисунок 2.4 – Структура тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску: 1 – чутливий елемент, 2 – основа, 3 – мембрана, 4 – обкладки, 5 – захисні екрани, 6 – клей, 7 – профіль поверхні. Адаптовано з роботи [19]

Зміна ємності цього сенсора розраховується за формулою:

$$\frac{\Delta C}{C_1} = \frac{a^4 p (1 - \mu^2) n C_r}{16 E b^3 t (C_2 + n C_r)} \quad (2.1)$$

де C_r – ємність n -ої комірки з газовим діелектриком;

C_1 – початкова ємність сенсора;

C_2 – ємність стінки комірки;

a – радіус комірки;

b – товщина гнучкої мембрани;

p – тиск;

E – модуль пружності Юнга;

μ – коефіцієнт Пуассона;

n – кількість комірок.

За даною формулою можна зрозуміти, що при впливі тиску Δp на сенсор, він піддається деформації пропорційної величині Δl , що змінює його ємність на ΔC . Зміна вихідної напруги ΔU пов'язана зі зміною опорною напругою $\Delta U_{оп}$ згідно такого виразу:

$$\Delta U = \frac{\Delta C}{C} U_{оп}. \quad (2.2)$$

П'єзоелектричні датчики тиску працює на п'єзоелектричному ефекті. Цей ефект буває прямим і зворотним. Для прямого п'єзоефекту характерна електрична поляризація діелектрика, що виникає внаслідок дії на його зовнішньої механічної напруги, при цьому заряд, що індукується на поверхні діелектрика, виявляється пропорційний прикладеній механічній напрузі:

$$q = d_{\text{пр}} \sigma, \quad (2.3)$$

де $d_{\text{пр}}$ – п'єзомодуль для прямого п'єзоефекту;

σ – щільність поверхневого заряду;

Для п'єзоелектриків характерна кристалічна структура матеріалу з ковалентним або іонним зв'язком без центру симетрії. Матеріали з низькою питомою провідністю, у яких вільних носіїв заряду дуже мало, відрізняються високими п'єзоелектричними показниками.

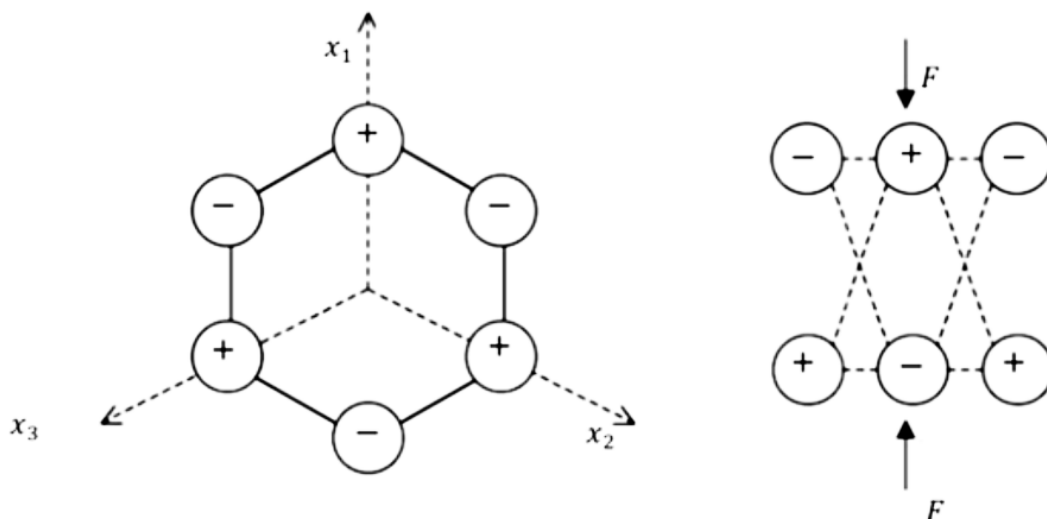


Рисунок 2.5 – Зміна положення йонів в п'єзоелектрику при прикладенні сили.

Адаптовано з роботи [20]

Як матеріали для п'єзоелементів використовують іонні кристали, у структурі яких розташовані різнойменні йони (катіони та аніони, позитивно та негативно

заряджені йони відповідно). При певних типах симетрії кристалічних ґраток іонних кристалів їх деформація призводить до просторового перерозподілу електричних зарядів. Інакше висловлюючись, природа пьезоелектрического ефекту пов'язані з зміною положення іонів у кристалічній решітці речовини (рис 2.5) [21].

До полікристалічних п'єзоелектриків належить сегнетоелектрична кераміка. Для надання сегнетокераміці п'єзоелектричних властивостей, таку кераміку необхідно протягом години поляризувати в сильному електричному полі (напруженістю від 2 до 4 МВ/м) при температурі від 100 до 150 °С, щоб після завершення в ній залишилася поляризація, що дозволяє в подальшому отримувати п'єзоелектричний ефект. Так отримують сильну п'єзоелектричну кераміку з коефіцієнтами п'єзоелектричного зв'язку від 0,2 до 0,4 [22-23].

Матеріалом для п'єзоелемента може бути кварц, танталат літію, ніобат літію або п'єзокераміка. Для роботи з високими температурами застосовують кристали сімейства лангасита.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ТРИШАРОВИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ СПІН-ВЕНТИЛЬНОГО ТИПУ

3.1. Вихідні дані

Під час дослідження вихідної плівкової системи спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) в одно- та багат шарових плівках була взята до уваги структура, що складається з трьох шарів типу Fe/Cr/Fe/П, де Fe – феромагнітний шар, а Cr це немагнітний шар. Для розрахунків також були розглянуті довідникові дані досліджень магніторезистивних властивостей (МО) двох типів зразків. Для першого зразку була взята структура, що складається з Fe(10)/Cr(d_{Cr})/Fe(15)/П (де П – підкладка на основі ситалова, $d_{Cr} = 5-20$ нм – немагнітний шар). Другим зразком виступала плівкова структура Fe(15)/Cr(d_{Cr})/Fe(20)/П. Схематична будова структури зразка на основі якого проведений розрахунок, зображена на рисунку 3.1, а вихідні значення магнітоопору при різних геометріях вимірювання – у таблиці 3.1.

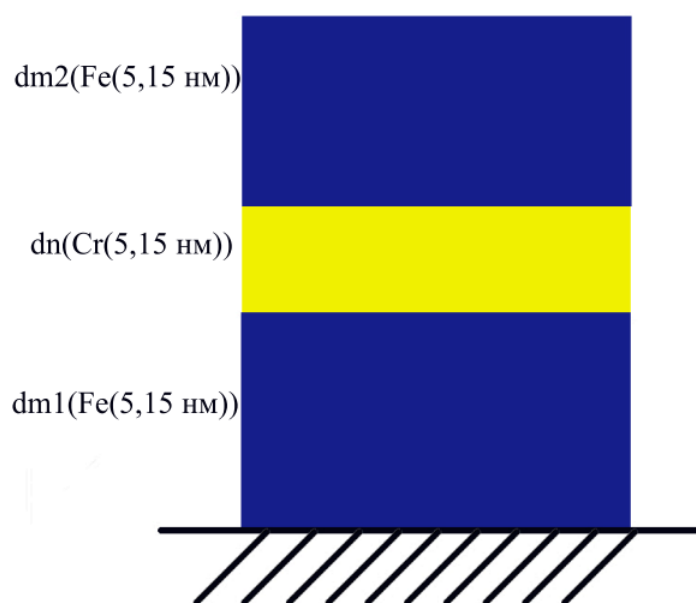


Рисунок 3.1 – Схематична структура зразка

Розрахунок величини МО проводиться 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; $R(B)$ – значення опору плівки у поточний момент в магнітному полі.

Таблиця 3.1 – Величина магнітного опору у трьох геометріях виміру тришарових структур Fe/Cr/Fe

Зразок	МО, %		
	поздовжня геометрія	поперечна геометрія	перпендикулярна геометрія
Fe(10)/Cr(5)/Fe(15)/П	0,30	0,38	0,40
Fe(10)/Cr(10)/Fe(15)/П	0,32	0,40	0,55
Fe(10)/Cr(15)/Fe(15)/П	0,35	0,42	0,56
Fe(10)/Cr(20)/Fe(15)/П	0,33	0,40	0,62
Fe(15)/Cr(5)/Fe(20)/П	0,35	0,42	0,45
Fe(15)/Cr(10)/Fe(20)/П	0,36	0,45	0,53
Fe(15)/Cr(15)/Fe(20)/П	0,40	0,42	0,58
Fe(15)/Cr(20)/Fe(20)/П	0,42	0,44	0,65

Варіант 1: $d_n = 5, 10, 15, 20$ нм – не магнітний шар; $d_m = 10$ нм – верхній магнітний шар

Варіант 2: $d_n = 5, 10, 15, 20$ нм – не магнітний шар; $d_m = 15$ нм – верхній магнітний шар

3.2 Розрахунок параметрів спін-залежного розсіювання

Розрахунок починається з побудови графіка залежності магнітоопору (δ) від співвідношення товщин немагнітного шару до магнітного. На рисунку 3.2 показаний приклад результатів наведеного вище експерименту. Це проявляється у вигляді залежності δ від нормованої на товщину d_m товщини немагнітного шару d_n .

Аналізуючи залежність, зображену на рисунок 3.2 знаходимо, що амплітуда і магнітне відношення обох типів зразків зростають майже лінійно зі збільшенням товщини немагнітного шару d_n від 5 нм до 20 нм. За цими даними розраховуються параметри спін-залежного розсіювання: параметри в об'ємній асиметрії – α_m , питомого опору з більшим та з меншим носіями заряду, та параметра спінової асиметрії – β .

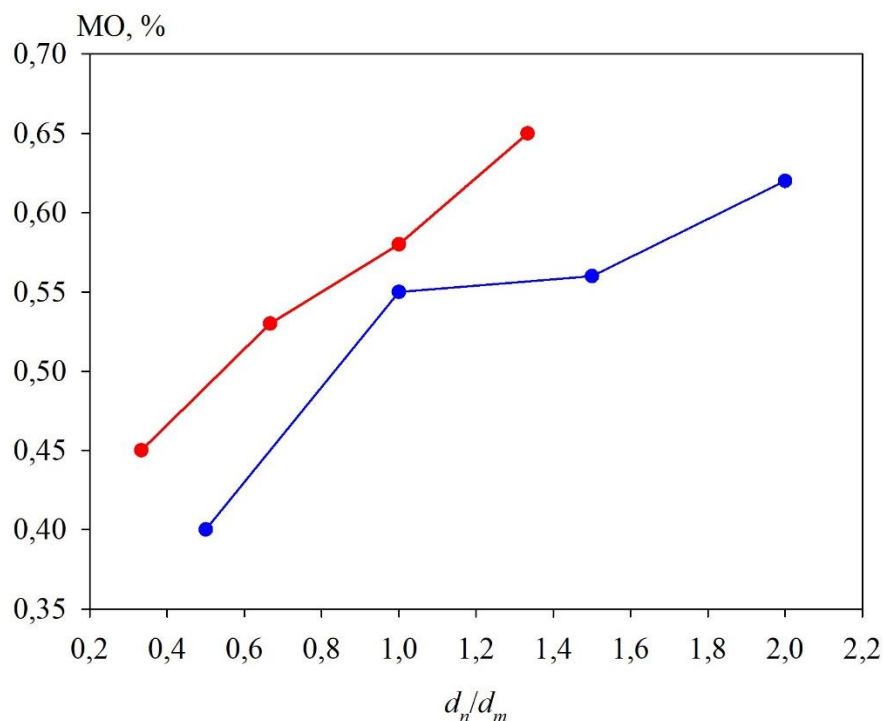


Рисунок 3.2 – Експериментальна залежність δ від товщин з немагнітним прошарком d_n однакою на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 10$ нм, $d_n = (5-20)$ нм (\bullet), а для 2 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (5-20)$ нм (\circ)

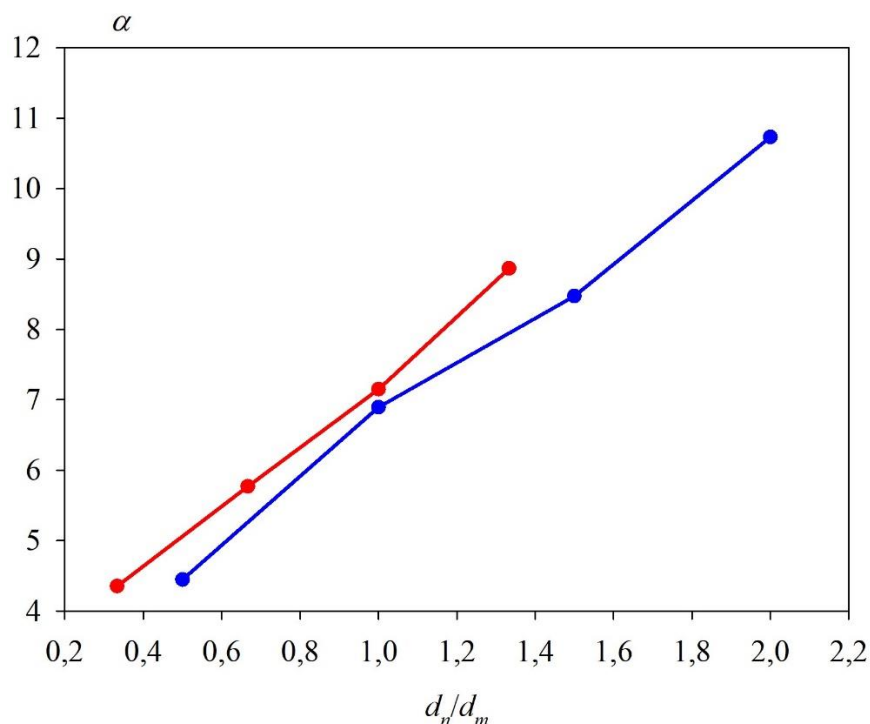


Рисунок 3.3 – Розрахункова залежність параметрів об’ємної асиметрії, та співвідношення α_m від товщини не магнітного шару d_n однаковим на товщину d_m і базовим магнітним шаром для 2 типів зразків: для 1 – $d_m = 10$ нм, $d_n = (5-20)$ нм (\bullet), а для 2 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (5-20)$ нм (\bullet)

Наступним кроком є розрахунок параметра об’ємної асиметрії α_m з використанням співвідношення 3.2:

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

У даній формулі величина магніторезистивного ефекту δ і величина $d_{n,m}$ поєднується з експериментальними даними які в свою чергу наведені на рисунку 3.2, а їх розрахунки були додані до таблиці 3.2.

Аналізуючи дані щодо параметра асиметрії об’єму α_m , зазначимо, що показник може в теорії змінюватися в мінімальних межах від 4,44 та в максимальних межах до 10,73 в залежності від параметри товщини плівкової системи

Fe(10)/Cr(d_{Cr})/Fe(15)/П, а в свою чергу для систем Fe(15)/Cr(d_{Cr})/Fe(20)/П це значення становить в межах від 4,35 та до 8,86.

Потім з відомою величиною параметрів об'ємної асиметрії ρ_m і з врахуванням проміжного немагнітного шару ρ_n можна зробити висновки, що величину питомого опору на мажористих носіїв заряду ρ_m^+ (експериментальні дані шару, що є проміжним та виготовлений на основі золота наведені на рисунку 3.3), також можна розрахувати як і величину питомих опорів малих носіїв заряду ρ_m^- , та параметрів спінової асиметрії β які обчислюються за формулами 3.3 та співвідношенням 3.4.

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

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

Після розрахунку всіх параметрів за співвідношенням, що наведені раніше 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(10)/Cr(5)/Fe(15)/П	0,4	4,44	7,2	1,62	0,81
2	Fe(10)/Cr(10)/Fe(15)/П	0,55	6,89	9,3	1,35	0,87
3	Fe(10)/Cr(15)/Fe(15)/П	0,56	8,47	9,32	1,1	0,89
4	Fe(10)/Cr(20)/Fe(15)/П	0,62	10,73	9,65	0,9	0,91
5	Fe(15)/Cr(5)/Fe(20)/П	0,45	4,35	7,05	1,62	0,81
6	Fe(15)/Cr(10)/Fe(20)/П	0,53	5,76	7,78	1,35	0,85
7	Fe(15)/Cr(15)/Fe(20)/П	0,58	7,14	7,86	1,1	0,87
8	Fe(15)/Cr(20)/Fe(20)/П	0,65	8,86	7,97	0,9	0,89

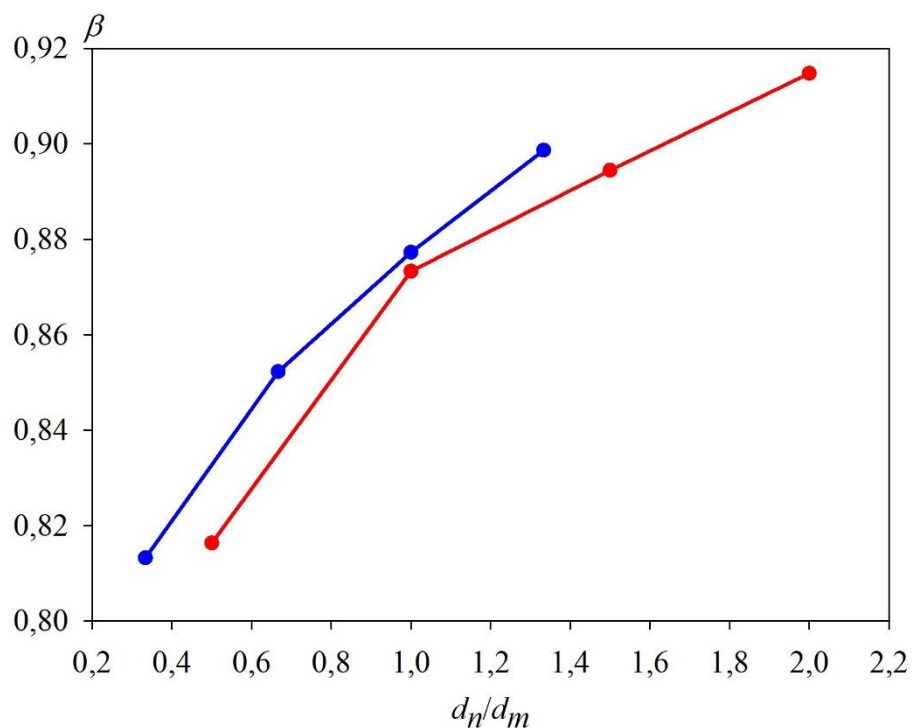


Рисунок 3.4 – Розрахункова залежність параметра спінової асиметрії β від відношення товщин немагнітного прошарку d_n і базового шару d_m для двох типів зразків: 1 – $d_m = 10$ нм, $d_n = (5-20$ нм) (\bullet); 2 – $d_m = 15$ нм, $d_n = (5-20$ нм) (\bullet)

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

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних даних стосовно питання сучасного матеріалознавства для електронної галузі та розробки нових функціональних матеріалів для чутливих елементів тонкоплівкових сенсорів (спін-вентильні структури, мультишари, гранульовані сплави, високоентропійні сплави).

2. Показано, що сучасні електронні прилади повинні мати ефективні параметри та враховувати наступні фактори: параметри точності і чутливості; умови навколишнього середовища; діапазон тисків; характеристики речовин в середовищі. Найбільш затребувані сучасні сенсори класифікують на ємнісні, п'єзорезистивні, п'єзоелектричні та трибоелектричні.

3. Для формування плівкових ємнісних сенсорних елементів використовують полімідні діелектричні плівки як матеріали з високою термічною стабільністю (елементи можуть працювати довгий час при температурі до 230 °C і короткий час до 400 °C), низьким рівнем викидання газів і низькою чутливістю до випромінювання. Товщина плівки варіюється від 10 до 25 мікрометрів.

4. Розраховано параметри спін-залежного розсіювання для плівкових систем на основі Fe і Cr. Отримано, що величина спінової асиметрії β змінюється для систем Fe(10-15 нм)/Cr(d_{Cr})/Fe(15-20 нм)/П) змінюється від 0,81 до 0,91, що вказує на зміну довжини вільного пробігу електронів в спінових каналах при зміні товщини окремих шарів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / З. Ю. Готра. – К.: Ліга-Прес, 2003. – 310 с.
2. Longquan Ma, Xuecheng Yu, Pengli Yang. Highly sensitive flexible capacitive pressure sensor with a broad linear response range and finite element analysis of micro-array electrode // China, 2019 – 9 с.
3. Готра З.Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково- навчальне видання. В 3 томах. Том 1/ За ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
4. Meng X., Zhao Y. The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor // MDPI «Sensors». 2016. №16. Pp. 1-12./
5. Yan Huang, Xiangyu Fan. Emerging Technologies of Flexible Pressure Sensor: Materials, Modeling, Devices and Manufacturing // Advanced Functional Materials – 2019 – 24 с
6. Ghanbari Mina. Analyzing the effect of existing bubbles in the interface liquid on the dynamic response of the strain-gauge type pressure sensor / Mina Ghanbari, Ghader Rezazadeh, Mohammad Fathalilou // Measurement. – 2022. – V. 196. – ID 111255.
7. Puers B. Sensor and Actuators / B. Puers, W. Sansen, S. Pazczyncky. – 1986. – 145–150 p.
8. Linear piezoresistive strain sensor based on graphene/g-C₃N₄/PDMS heterostructure / Sk. Riyajuddin, Sushil Kumar, Surender P. Gaur // Nanotechnology. – 2020. – V. 31. – ID 295501.
9. A. V. Filmin. Sensitive element of microelectronic sensors of fast variable and static pressure, 2019 – 9.
10. Tandeske Duane. Pressure Sensors: Selection and Application Mechanical Engineering / Duane Tandeske – Marcel Dekker, Inc., 1991 – 291 p.
11. Пазуха І.М. Чутливі елементи датчика тиску на основі плівок Cr і Cu або Fe / І.М. Пазуха, І.Ю. Проценко // Вісник СумДУ. Серія: фізика, математика, механіка. – 2008. – №2. – С. 82-87.
12. Chang S. Demonstration for integrating capacitive pressure sensors with read-out circuitry on stainless steel substrate // Sensors and Actuators / S. Chang, M. Pallen. –

2017. – ISBN: A116195204.
13. Zhao Wenju. Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors / Wenju Zhao, Cheng Zhang, Jian Zhang // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – V. 142. – ID 106782.
14. Peishuai Song, Zhe Ma, Jing Ma, Peishuai Song. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors // *Micromachines*. – 2020. – V. 11. – ID 56.
15. 3D Printed Force Sensor with Inkjet Printed Piezoresistive Based Strain Gauge / Mingjie Liu, Yulong Zhao, Yiwei Shao [et al.] // *IEEE Sensors*. – 2018. – 18381672.
16. 3D-Printed Strain-Gauge Micro Force Sensors / Juntian Qu, Qiyang Wu, Tyler Clancy [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – V. 20. – P. 6971-6978
17. Ємнісний передавач тиску. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.silverinstruments.com/product/pressure-measurement/capacitance-pressure-transmitter/> (Дата доступу: 05.05.2023 р.).
18. Ємнісні датчики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uadepe.ru/interier/36806-emnisni-datchiki.html> (Дата доступу: 10.05.2023 р.).
19. A Supersensitive, Multidimensional Flexible Strain Gauge Sensor Based on Ag/PDMS for Human Activities Monitoring / H. Li, J. Zhang, J. Chen, [et al.] *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – ID 4639.
20. Gold nanorods as a high-pressure sensor of phase transitions and refractive-index gauge / Marcin Runowski, Szymon Sobczak, Jędrzej Marciniak [et al.] // *Nanoscale*. – 2019. – V. 11. – P. 8718–8726.
21. S. Masihi, M. Panahi, D. Maddipatla, A Novel Printed Fabric Based Porous Capacitive Pressure Sensor for Flexible Electronic Applications // *IEEE Sensors*. – 2019. – 19261607.
22. Lopato Przemyslaw. A Circular Microstrip Antenna Sensor for Direction Sensitive Strain Evaluation / Przemyslaw Lopato, Michal Herbko // *Sensors*. – 2018. – V. 18. – P. 310.
23. І.Ш. Невлюдов, І.В. Жарікова, С.І. Гресько, Дослідження термічного впливу етапів пакування на параметри функціонування МЕМС ємнісних датчиків тиску // *НТЖ «Технологія приладобудування»*. – 2019. – № 2.