

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

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ:
КОНСТРУКЦІЯ ТА ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ**
спеціальності 171 Електроніка

Здобувач вищої освіти гр. ЕП-81

Д. О. Микитченко

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, доцент

Ю. М. Шабельник

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І. Ю. Проценко

Суми – 2022

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

«25» травня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Микитченка Дмитра Олександровича

1. Тема роботи Чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску: конструкція та фізичні принципи роботи

затверджена наказом по університету від «04» травня 2022 р. , № 0316-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 08 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Останнім часом мікроелектронні ємнісні сенсори тиску отримують більшу перевагу перед мікроелектронними п'єзорезистивними та п'єзоелектричними датчиками тиску за рахунок високої чутливості, низького енергоспоживання, відсутності температурних впливів, сумісності інтегральних систем, тощо. Спектр застосування ємнісних датчиків тиску збільшується, тому важливо переглянути шлях технологічного розвитку та подальшу перспективу використання даного сенсора з використанням останньої технології мініатюризації – технології тонких плівок.

Ця робота зосереджена на огляді актуальних типів датчиків тиску та сконцентрована на перспективності використання тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску та способах підвищення характеристик і зменшення розмірів вибраного типу датчиків. Детально розглянуто конструкцію, основні характеристики та способи виготовлення високотемпературного ємнісного датчика тиску на основі монокристалу 3C-SiC.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення принципів роботи та фізичних процесів, що відбуваються в датчиках тиску, методів та способів покращення електричних та механічних характеристик.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
 1. Огляд та порівняння сучасних сенсорів тиску (літературний огляд).
 2. Конструкція та процес виготовлення ємнісного сенсору тиску.
 3. Технологія виготовлення та основні характеристики високо-температурного ємнісного датчика тиску на основі монокристалу 3C-SiC
 4. Висновки.

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

Слайди № 1-2 – Загальна інформація

Слайди № 3-6 – Огляд та порівняння сучасних сенсорів тиску (літературний огляд).

Слайди № 7-8 – Конструкція та процес виготовлення ємнісного сенсору тиску.

Слайди № 9-11 – Технологія виготовлення та основні характеристики високо-температурного ємнісного датчика тиску на основі монокристалу 3C-SiC

Слайд № 12 – Висновки

6. Дата видачі завдання 26.05.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 30.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Методи отримання та властивості нанотрубок.	до 04.06.2022 р.	<i>вик.</i>
3.	Порівняння властивостей вуглецевих та нітрид-борних нанотрубок	до 06.06.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 08.06.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	10.06.2022 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	16.06.2022 р., 17.06. 2022 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Д. О. Микитченко

Керівник роботи

Ю. М. Шабельник

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи бакалавра є чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску.

Метою роботи є аналіз фізичних процесів, що відбуваються в чутливих елементах тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску. Також розглянуті переваги і недоліки цієї групи датчиків, їх конструкційні особливості.

Використання останнім часом мікроелектронних ємнісних сенсорів тиску є більш розповсюдженим, ніж мікроелектронні п'єзорезистивні та п'єзоелектричні датчики. Це є можливим за рахунок високої чутливості датчиків, низького енергоспоживання, майже відсутності температурних впливів на роботу сенсора та сумісності інтегральних систем. Ємнісні датчики тиску застосовуються у багатьох галузях промисловості, тому розвиток тонкоплівкової технології виготовлення таких датчиків є пріоритетним на сьогодні.

У роботі представлені сучасні типи датчиків тиску, їх фізичні принципи роботи, переваги та недоліки. Окремо розглянута перспектива використання тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску та способах підвищення характеристик і зменшення розмірів чутливих елементів даного сенсора. Детально розглянуто конструкцію та технологію виготовлення високотемпературного ємнісного датчика тиску на основі монокристалу 3C-SiC.

Робота викладена на 39 сторінках, зокрема, містить 19 рисунків і список використаних джерел із 20 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЄМНІСНИЙ ДАТЧИК, П'ЄЗОРЕЗИСТОР, ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ, SiC.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ЗМІСТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ СУЧАСНИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	7
1.1. Класифікація та принцип роботи сенсорів тиску.....	7
1.2. Типи тонкоплівкових сенсорів тиску.....	9
1.2.1. Ємнісні датчики тиску.....	9
1.2.2. П'єзорезистивні датчики тиску.....	14
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ ТИСКУ	23
2.1. Чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску.....	23
2.2. Технологія виготовлення та основні характеристики інерційного ємнісного датчика тиску.....	26
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЄМНІСНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ 3C-SiC	31
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

В наш час стрімкого розвитку таких галузей, як: електроніка, машинобудування, ракетобудування, літакобудування, автомобілебудування стало неможливим контролювати робочий процес без точних та надійних систем контролю та аналізу. Головну роль в даних системах має перетворювач неелектричних систем. Сучасні датчики здатні реагувати на всі зовнішні подразники і одним із таких є датчик тиску, який має велику частину вкладу в промисловий розвиток людства. Актуальність роботи полягає огляді способів боротьби з різними похибками та неточностями вимірювання тиску.

Сучасна технологія виготовлення датчиків має схожі риси з технологією виготовлення напівпровідникових інтегральних схем, а саме: кремнієва, тонкоплівкова та товстоплівкова. Як результат, стало можливим створення високостабільних датчиків, мініатюризація конструкції та гарні економічні показники виробництва.

Метою роботи вивчення принципів роботи та фізичних процесів, що відбуваються в датчиках тиску, методів та способів покращення електричних та механічних характеристик.

Результати роботи були представлені на Міжнародній науковій конференції «Фізика. Електроніка. Електротехніка» (СумДУ, м. Суми) у 2022 рр.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ СУЧАСНИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Класифікація та принцип роботи сенсорів тиску

Тиск потрібно враховувати в багатьох технологічних процесах, зокрема, хімічних. Тиском p називається фізична величина, яка чисельно дорівнює силі, яка діє на одиницю площі поверхні тіла та має напрямок зовнішньої нормалі 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.

Коли ми говоримо про виміри тиску то маємо на увазі один із трьох видів вимірювального тиску:

- абсолютний тиск;
- надлишковий тиск;
- диференціальний тиск (різниця тисків між двома точками).

Для стабільної і ефективної роботи системи, в якій тиск грає одну з головних ролей важливо, щоб використовуваний датчик тиску був достатньо точний та міг видавати інформацію достатньо швидко без необхідності ремонту або заміни в умовах роботи системи. Потрібно розуміти що для кожного виду роботи вимірювальний прилад повинен відповідати деяким факторам. Основні це:

- характеристики використовуваних речовин в середовищі яких буде використовуватися пристрій;
- параметри точності і чутливості, необхідні в процесі вимірювання;
- умови навколишнього середовища;
- діапазон тисків.

Потрібно розуміти, що чутливий елемент датчика може контактувати з агресивним середовищем. Знаючи цю проблему потрібно враховувати з якого матеріалу виготовлений чутливий елемент і в деяких випадках застосовувати мембрану (діафрагму) буде гарним рішенням, яке дозволить запобігти прямому контакту датчика та агресивного середовища [1].

Виміри тиску можуть мати різні рівні точності. Як правило, використовувати точні датчики для робіт, де надана точність буде надлишковою, не є доцільним через те, що є певна кореляція вартості та точності датчика. Необхідно пам'ятати, що швидкість вимірювання також грає велику роль і не завжди можливо з'єднати високу точність і час виміру, тому доводиться обирати виходячи з потреб.

В наш час електроніка розвивається дуже швидко та різноманітно. Але інтерес та попит не перестає зменшуватися в таких галузях, як автомобілебудування, космо- та авіабудування та навіть стає більш складним конструктивно та вимагає кращих характеристик в складних умовах роботи.

Для виміру механічних величин сенсори поділяють на ємнісні, п'єзорезистивні, магнітопружні, індуктивні, п'єзоелектричні, піроелектричні та акустоелектронні. За конструктивними та технологічними ознаками мікроелектронні сенсори механічних величин поділяються на напівпровідникові, тонкоплівкові та товстоплівкові, а за конструкцією – на об'ємні та плоскі [2].

Існує безліч різних датчиків тиску, що є більш та менш доцільними для конкретного процесу, але їх зазвичай можна розділити на кілька категорій, а саме: пружні датчики, електричні перетворювачі, датчики диференціального тиску та датчики тиску вакууму.

Більшість датчиків тиску рідини мають пружну структуру, де рідина укладена у невеликий відсік щонайменше з однією пружною стінкою. При використанні даного методу показання тиску визначаються шляхом вимірювання відхилення цієї еластичної стінки, представляючи результат безпосереднім відліком через відповідні зв'язки, або через трансдуковані електричні сигнали, як наприклад ємнісний датчик. Пружні датчики тиску дуже чутливі, вони досить

крихкі і схильні до вібрації. Крім того, вони, як правило, значно дорожчі, ніж манометри, і тому в основному використовуються для передачі вимірюваних даних та вимірювання різниці тисків. Теоретично можна використовувати досить широкий спектр пружних елементів пружних датчиків тиску. Однак більшість пристроїв використовують ту чи іншу форму трубки Бурдона або діафрагми.

Мембрани (діафрагми) виготовлені з круглих металевих дисків чи гнучких елементів, таких як гума, пластик чи шкіра. Матеріал, з якого виготовлена мембрана залежить від того, чи використовуються властивості пружності цього матеріалу або йому повинен протистояти інший елемент (наприклад - пружина). Мембрани, виготовлені з металевих дисків, використовують пружні характеристики, а тим, яким протистоять інші пружні елементи, виготовлені з гнучких елементів. Мембрани дуже чутливі до різких змін тиску. Мембрана виготовлена з металу може виміряти максимальний тиск, приблизно, 7 МПа, а мембрана, що використовує пружний тип матеріалу може вимірювати надзвичайно низький тиск (0,1 кПа - 2,2 МПа) при підключенні до ємнісних перетворювачів або датчиків перепаду тиску. Діафрагми бувають плоскі, гофровані та капсульного типу. Як зазначалося раніше, мембрани дуже чутливі (0,01 МПа). Вони можуть вимірювати дробові різниці тиску на дуже маленькому діапазоні (скажімо, тиску кількох дюймів води) (еластичний тип) або великі перепади тиску (наближаючись до максимального діапазону 207 кПа) (металевий тип) [2].

Мембрани дуже універсальні – вони зазвичай використовуються в дуже агресивних середовищах або ситуаціях з екстремальними надмірними тисками.

1.2. Типи тонкоплівкових сенсорів тиску

1.2.1. Ємнісні датчики тиску

Принцип роботи ємнісних сенсорів оснований на зміні ємності чутливого елемента – діафрагми внаслідок дії сили, тиску або прискорення.

Ємнісні датчики тиску вимірюють тиск, виявляючи зміни в електричній ємності, що викликана рухом діафрагми.

Конденсатор складається з двох паралельно провідних пластин, розділених невеликим зазором. Ємність визначається:

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

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

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

S – площа пластин;

d – відстань між пластинами.

Зрозуміло, що зміна одного параметра призведе до зміни ємності. Для виміру тиску саме простіше змінювати відстань між пластинами. Для реалізації необхідно пластину конденсатора зробити рухомою при зміні тиску [7].

Зазвичай один електрод - це діафрагма, що чутлива до тиску, а другий – фіксована пластина. Приклад конструкції ємнісного датчика показано на рисунку 1.1.

Ємнісний датчик тиску може бути побудований на кремнієвій мікросхемі, за тими самими технологіями, що створюють напівпровідникові електронні пристрої. Завдяки цьому стає можливим створювати повноцінну вимірювальну систему на одному кристалі [8, 10].

Для фіксації зміни ємності зручно буде зробити сенсор частиною відрегульованої схеми, яка поєднує в собі сам датчик та індуктор. Це може змінити частоту генератора або змінний струм резонансного кола. Для створення діафрагми використовуються дуже різні матеріали, такі як: пластик, скло, кремній або кераміка - усі ці матеріали потрібні, щоб задовольняти різні види використання. Ємність самого датчика зазвичай становить від 50 до 100 пФ, при цьому зміна становить кілька пікофарадів [7].

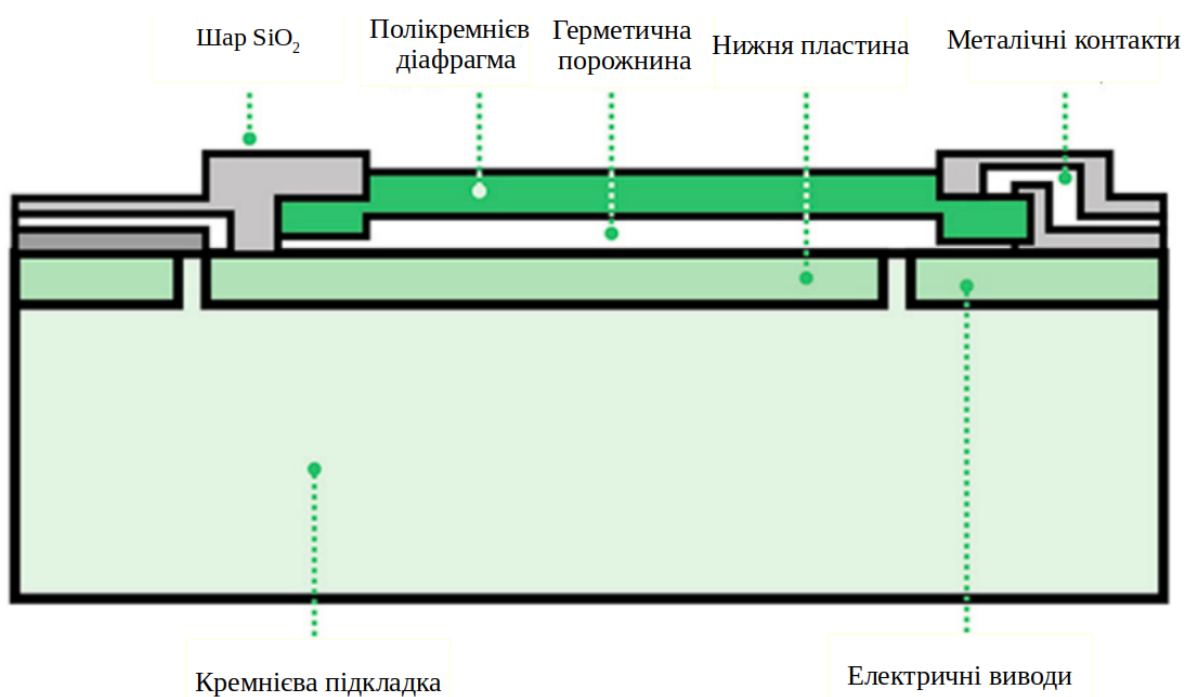


Рисунок 1.1 – Конструкція ємнісного сенсора тиску. Адаптовано з роботи [3]

Конструкція приладу дозволяє підбирати діапазон чутливостей тиску змінюючи міцність і жорсткість матеріалу діафрагми. Нажаль великі сенсори можуть обмежувати частотний діапазон роботи [4], але мати великий рівень сигналу. З іншого боку малі сенсори мають високу швидкодію. Мала товщина діафрагма спричиняє високу чутливість до вібрацій (за цим самим принципом будують конденсаторні мікрофони), особливо при низькому тиску.

Товста та міцна діафрагма дозволяє вимірювати високі тиски. Датчики, які можуть вимірювати тиски до $34 \cdot 10^6$ Па можна зробити за допомогою зміни товщини діафрагми.

Якщо зробити пластини конденсаторів з матеріалу, який має низький коефіцієнт теплового розширення, то ми отримаємо сенсор з малою температурною залежністю. Це є однією з переваг цих датчиків, через їх можливість роботи при високих температурах [7, 15].

Ємність можна виміряти підключивши датчик до частотно-залежного ланцюга, наприклад генератора або контура ємності. Частота ланцюга буде змінюватися за прямою залежністю зміни ємності.

Осцилятору, на відміну від резонансного контуру, який може використовуватися як пасивний датчик без джерела живлення, необхідні додаткові електронні компоненти та джерело живлення [6, 7].

Майже завжди ємнісні сенсори компонують з мостовою схемою. Сигнал електричної напруги, що виходить, перетворений за допомогою модулятора несучої частоти і підсилювача величини неузгодженості моста. Цей сигнал спричинений зміною реактивного опору сенсора. Ці особливості будови схеми вимагають додаткового узгодження мостової схеми та дорогих електронних компонентів. Такі схеми складніше інтегрувати. Також, при великих значеннях несучої частоти можливі збої ємнісної мостової схеми [7].

Можливий також другий метод узгодження ємнісного сенсора з зовнішньою схемою - метод резонансної частоти. За цим методом, сенсор входить до складу коливального контуру, а вихідний сигнал визначається величиною резонансної частоти та періодом синусоїдальних коливань. Але цей метод не позбавлений недоліків, що пов'язані з нелінійним співвідношенням резонансної частоти та ємності сенсора [7, 10]. Подолати цей недолік можна використавши диференційні конденсатори. Ємнісні сенсори статичних деформацій включають у мостові схеми змінного струму, а ємнісні сенсори динамічних деформацій – від джерела постійного струму. Щоб отримати високу чутливість в ємнісних сенсорах використовують джерела поляризації з високими значеннями напруги та конденсатори з відносно малою сумарною ємністю. Конструкція конденсатора допомагає запобігти руйнуванням через вібрації. Час відповіді може бути рівний порядку мілісекунд, а у випадку пристроїв MEMS (мікроелектромеханічні системи) - ще швидше. Датчик на основі ємнісних технологій показує малий гістерезис та стабільну повторюваність вимірювань. Вони також володіють низькою температурною чутливістю і можуть вимірювати широкий спектр пульсацій тиску. Основна проблема ємнісних сенсорів це чутливість до струмів витоку, тому більше розповсюдження отримали ємнісні сенсори з електронною схемою, яка подає на вихід частоту, що залежить від ємності [6].

Відносна проникність повітря та інших газів може змінюватися при збільшенні тиску це негативно впливає на лінійність характеристик. Цей негативний вплив нівелюється для датчиків, що вимірюють абсолютний тиск.

Ми пам'ятаємо що зміна d призводить до зміни C . Оскільки відношення між цими значеннями не лінійне, то потрібна лінеаризація для чого використовується підключення до мостової схеми або мікропроцесора [9]. Ємність дуже чутлива до змін температури оскільки термічне розширення впливає на величину d . Вплив цього ефекту можна подолати застосувавши конструкцію диференціального подвійного конденсатора, що показана на рисунку 1.2. Подальше покращення системи можна провести підключивши її двома плечами до мостової схеми постійного струму, що призведе до лінеаризації вихідного сигналу:

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

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

$U_{\text{жив}}$ – напруга живлення;

$2d$ – відстань між крайніми пластинами конденсатора;

x – зміщення центральної пластини.

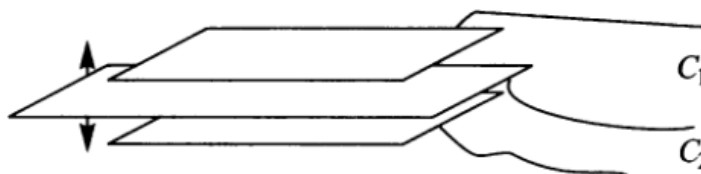


Рисунок 1.2. - Диференційна ємнісна система. Адаптовано з роботи [12]

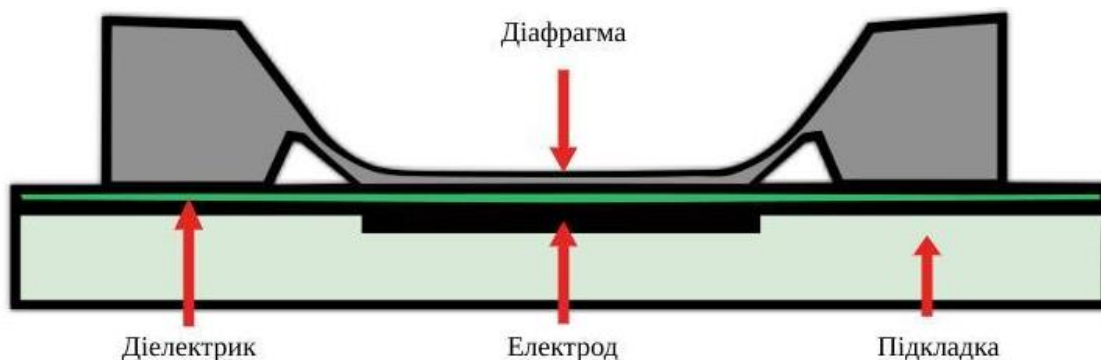


Рисунок 1.3 – Ємнісний сенсор у сенсорному режимі. Адаптовано з роботи [12]

Краща лінійна характеристика виходить при побудові датчика за допомогою “сенсорного режиму”, пластина конденсатора, яка виступає в ролі діафрагми, контактує з фіксованою пластиною, але між ними є шар діелектрика [12].

Даний вид датчиків не позбавлений недоліків, найголовніший з них це великий гістерезис через тертя між двома поверхнями. Однак дана конструкція має більші характеристики захисту від перенапруження. Схематична будова ємнісного сенсору у сенсорному режимі наведена на рисунку 1.3 [13, 17].

1.2.2. П’єзорезистивні датчики тиску

П’єзорезистивні датчики тиску працюють на властивості деяких матеріалів змінювати свій опір при розтягуванні.

У п’єзорезистивних датчиках тиску як вимірювальний елемент використовується міст Уітстона. Він мінімально розширюється під дією тиску і в такий спосіб змінює електричний опір. Конструкційно, тензодатчик прикріплюється до діафрагми, що реагує на зміну опору під час розтягування. Відповідно сама зміна опору відображається як деформований сигнал на виході [1, 18].

В порівнянні з п’єзоелектричними датчиками, п’єзорезистивні можуть вимірювати різні види тиску: відносний, абсолютний, диференційний та

калібрувальний. Діапазон тисків також не обмежений, від високих до низьких значень.

Коли мова йде про зміну опору через розтягування, то важливо зрозуміти, що це явище спричинене декількома факторами, такими як:

- властивість обмеженої кількості матеріалів змінювати опір при деформації;
- в процесі розтягування провідник стає тоншим, що обмежує протікання струму по ньому;
- через довший провідник струму ваще протікати [11].

Перший фактор також можна назвати п'єзорезистивним ефектом. Цей ефект притаманний провідникам та напівпровідникам і його суть полягає в зміні міжатомних відстаней при деформації речовини, це в свою чергу змінює ширину забороненої зони. Відстань між валентною зоною та зоною провідності прямо впливає на питомий опір матеріалу. У певному діапазоні відношення деформації до опору є лінійним, що дає змогу застосовувати його для визначення тиску [13].

Коефіцієнт чутливості п'єзорезистивного датчика визначається за наступною формулою:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}, \quad (1.3)$$

де ΔR – абсолютна зміна опору;

R – початкове значення опору;

ε – деформація чутливого елемента.

Деформацію чутливого елемента:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1.4)$$

де ΔL – абсолютна зміна довжини;

L – довжина недеформованого елемента.

Можна сказати, що опір резисторів змінено внаслідок механічної дії на них. Величина цієї зміни – ΔR , яка впливає на напругу виходу.

Зазвичай зміна опору металів здебільшого пов'язане зі зміною геометрії в результаті прикладеної механічної напруги [18-19]. У тих випадках, коли це так, його можна розрахувати за допомогою простого рівняння опору, отриманого із закону Ома:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.5)$$

де ρ – питомий опір матеріалу;

l – довжина провідника;

S – площа поперечного перерізу.

Проте, навіть якщо п'єзорезистивний ефект у випадках невеликий, їм не можна нехтувати.

Для того щоб використовувати п'єзорезистивний елемент як датчик тиску необхідно закріпити його на більш міцний елемент, який буде також деформуватися під впливом тиску (діафрагма) [19]. На рисунку 1.7 показана мостова схема Уітстона, саме за допомогою якої вираховується зміна опору .

Коли діафрагма вигинається назовні під дією тиску рідини, тензодатчик розтягується на більшу довжину, викликаючи збільшення його опору. Ця зміна опору порушує рівновагу мостового ланцюга, викликаючи напругу ($V_{вих}$), пропорційну величині прикладеного тиску. Таким чином, тензодатчик працює для перетворення прикладеного тиску в вимірювальний сигнал напруги, який може бути посилений і перетворений в сигнал струму контуру мА (або в цифровий сигнал) [18, 19].

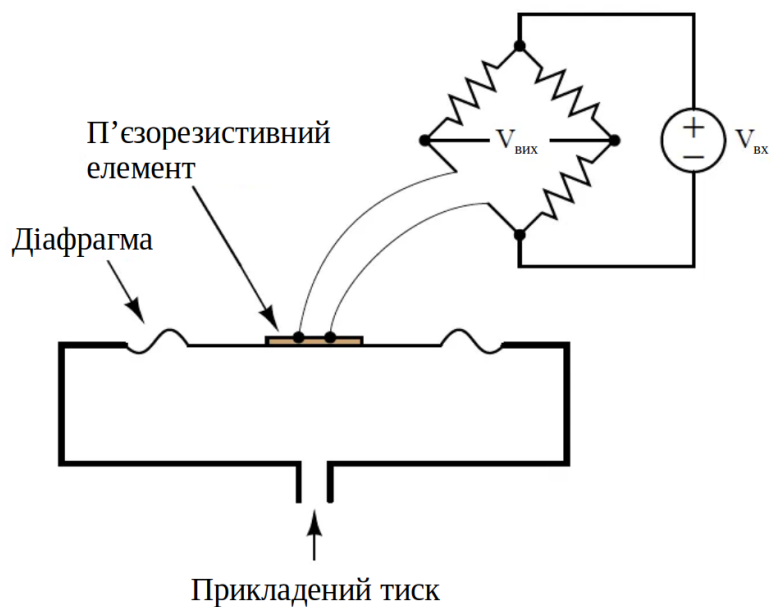


Рисунок 1.7 – Схема Уїтстона з одним п'єзорезистивним елементом. Адаптовано із роботи [11]

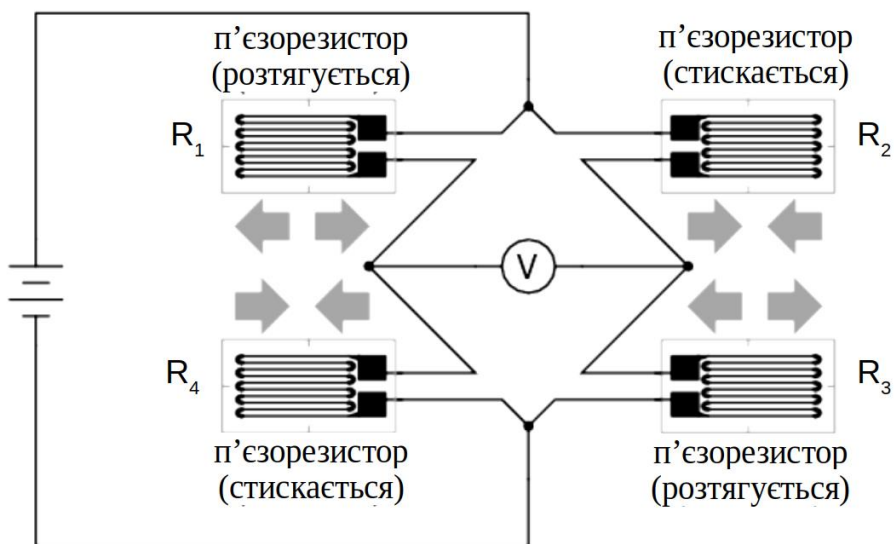


Рисунок 1.8 – Вимірювальна схема з чотирма п'єзорезисторами. Адаптовано із роботи [20]

Для цього використовується наступна формула:

$$V_{\text{вих}} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] \times V_{\text{вх}}, \quad (1.6)$$

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

$V_{\text{вх}}$ – напруга живлення.

На рисунку 1.7 показана мостова схема тільки з одним тензодатчиком, але для більшої точності можна використовувати 2 або 4 чутливі елементи. Схема з чотирма чутливими елементами має явні переваги в чутливості та лінійності характеристик. Це відбувається через те що, різниця відношення пар датчиків збільшується. В одній парі є два чутливих елементи, один з яких розтягується (збільшує опір) інший стискається (зменшує опір). На рисунку 1.8 показана схема Уїтстона з чотирма резисторами [20].

Розтягування та стискання датчиків залежить від їх положення відносно центру діафрагми та яка сторона чутливого елемента буде направлена до центру. На рисунку 1.9 показано як місце розташування резистора впливає на його деформацію.

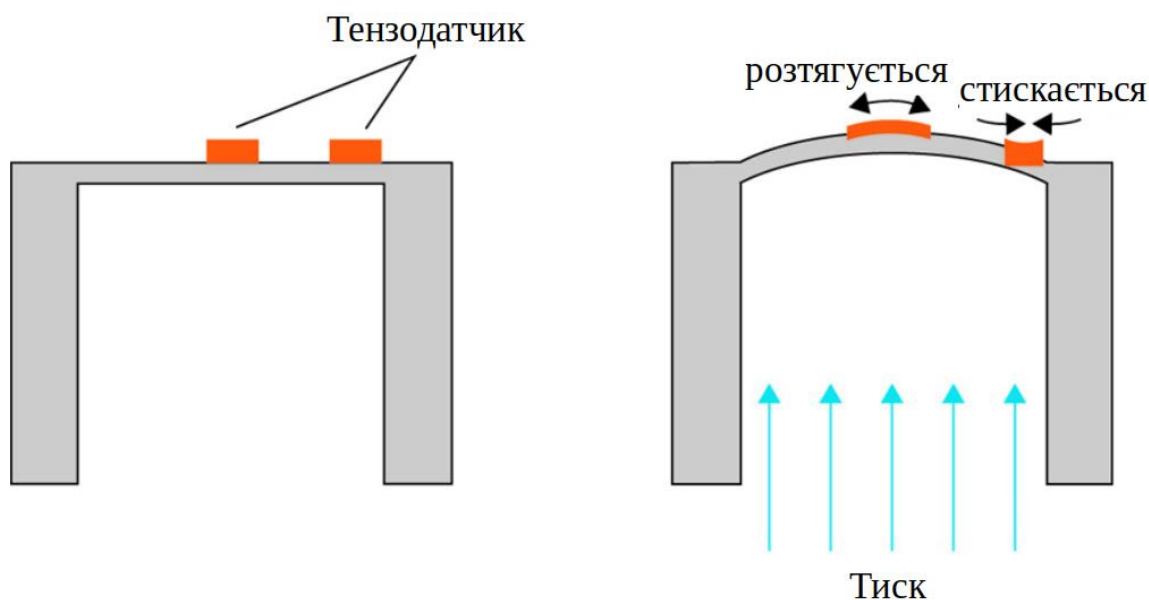


Рисунок 1.9 – Деформація резистора в залежності від місця розташування.

Адаптовано із роботи [20]

Датчики деформації фіксуються на діафрагму за допомогою спеціального клею, недолік цього способу заключається в підборі спеціального клею, який не буде руйнуватися при високих температурах, а також буде стабільно передавати деформації датчику [20]. Можна по іншому закріплювати чутливі елементи на діафрагму, а саме напилювати їх. Це дає можливість позбутися проблем з вибором матеріалу для фіксації, а також дає можливість мініатюризації датчика. Стосовно матеріалу з якого роблять чутливі елементи, то це може бути метал або напівпровідник [19].

Деякі види металів володіють непоганою п'єзорезистивністю, значення якої може перевищувати зміну опору спричинену деформаціями в декілька разів. Один з цих металів це платина сплави якої володіють коефіцієнтом більшим ніж удвічі. Платиновий датчик дасть коефіцієнт чутливості приблизно 3,5. Але це далеко не найкращий варіант. Чистий нікель володіє п'єзорезистивністю в 13 разів більшою, що робить його найефективнішим з чистих металів [5, 12].

П'єзорезистивний ефект напівпровідників може бути більшим на декілька порядків від своїх геометричних деформацій. Порівнюючи ці характеристики з металами, можна впевнено сказати, що перевага на боці напівпровідників. Цей ефект притаманний моно- та полікристалічному кремнію, германію, аморфному кремнію та карбїду кремнію. Знаючи ці властивості ми можемо створити датчик з чутливістю на порядки більшою ніж металеві тензорезистори. Недоліки неоднорідності вихідної величини спричинені залежністю від зовнішніх факторів (температура) [15, 17].

У деяких конструкціях одна кремнієва пластина служить одночасно діафрагмою, так і тензодатчиком, він напилюється на кремній, щоб повністю використовувати чудові механічні властивості кремнію (висока лінійність і низька втомлюваність). Однак кремній хімічно несумісний з багатьма технологічними рідинами, і тому тиск необхідно передавати на кремнієву діафрагму/датчик за допомогою не реакційної рідини для заповнення (зазвичай рідина на основі силікону або фторуглероду). Металева ізолююча діафрагма передає тиск

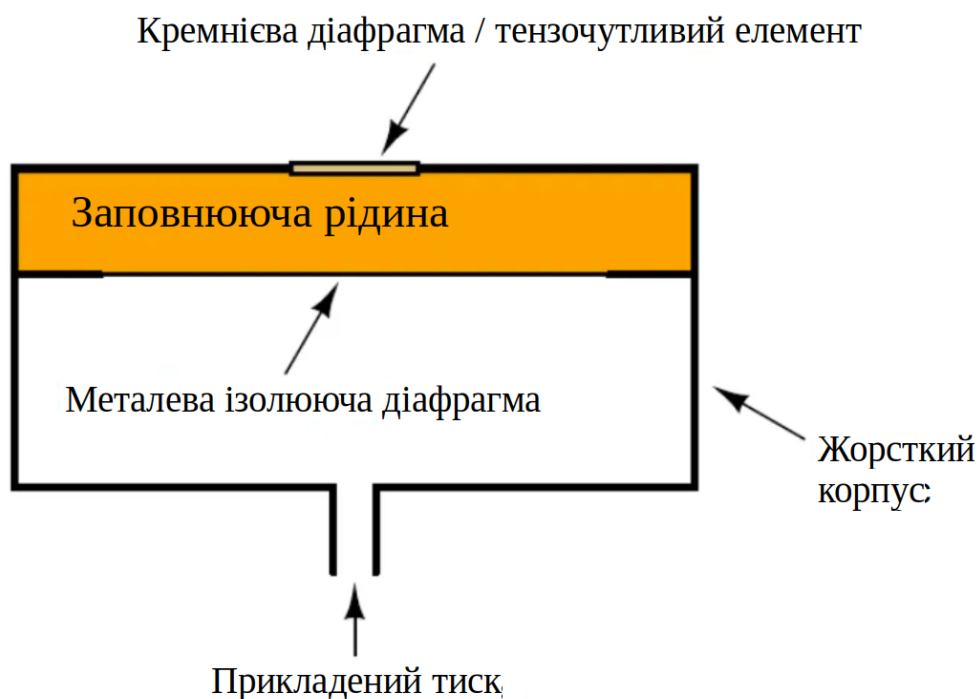


Рисунок 1.10 – Конструкційна схема кремнієвого тензодатчика. Адаптовано із роботи [19]

технологічної рідини на рідину для заповнення, яка, у свою чергу, передає тиск на кремнієву пластину. На рисунку 1.10 показана будова такого датчика [15].

Коефіцієнт калібрування залежить від рівня легування кремнія різними домішками. Нажаль є залежність температурної чутливості від ступеня додавання домішок і тому не варто ними зловживати [13].

Напівпровідникові датчики можуть бути значно меншими за їх металеві аналоги, а також через зручну технологію виготовлення чутливі елементи можна розміщувати разом з електронікою, яка буде калібрувати сигнал та враховувати помилки при збільшенні температури [11-12].

Ізолююча діафрагма (рис. 1.10) сконструйована так, щоб бути набагато більш гнучкою, ніж кремнієва діафрагма, оскільки її призначення полягає в тому, щоб безперешкодно передавати тиск від технологічної рідини до рідини для заповнення, а не діяти як пружинний елемент. Таким чином, кремнієвий датчик відчуває той самий тиск, який би, він був безпосередньо підданий впливу технологічної рідини, без необхідності контактувати з агресивною рідиною.

Гнучкість металевої ізоляційної діафрагми також означає, що вона відчуває набагато менше навантаження, ніж кремнієва чутлива діафрагма, що дозволяє уникнути проблем втоми металу, які виникають у конструкції передавача, що використовує метал як чутливий (пружинний) елемент [1, 12].

Однією з проблем цих датчиків є чутливість до зміни або шуму напруги. Перешкоди в сигналі можуть порушувати точність вимірювання. Для дотримання необхідної точності потрібно стежити за шумами а саме за тим, щоб вони не перевищували необхідну межу [11].

Існує варіант використання датчика в мостовій схемі зі змінним резистором для того щоб, відкалібрувати значення напруги до нуля при відсутності впливу тиску.

В цих датчиків, існує проблема високої чутливості до якості проводів та їх довжини. Основні недоліки це відносно великий опір, який зменшує чутливість та температурний коефіцієнт, що особливо впливає на датчики, також впливає на провід. Довгі дроти можуть ловити перешкоди і тому доцільно брати провід з екрануванням.

Необхідно дотримуватися певного балансу стосовно вхідного значення напруги, більша напруга дозволить збільшити якість сигналу і стійкість до різного шуму, але при цьому збільшить температуру через протікання струму [11, 15].

Найкраще значення напруги шукають експериментально. Беруть датчик на який не впливає тиск і зовнішня температура та який знаходиться в збалансованій мостовій схемі. Подаючи поступово напругу визначається значення при якому починається зміна сигналу, спричинена самонагріванням. Потім напругу поступово зменшують до того значення, при якому не спостерігається спотворення сигналу [6, 12].

Як говорилося вище, тензочутливі елементи зроблені з металу мають міла коефіцієнти вимірювання, порівняно з напівпровідниками. При вхідному сигналі в декілька вольт на тисячу це означає зміну сигналу при виході на 1 мВ на кожен вольт входу [18].

Кремнієві датчики мають коефіцієнт вимірювання в межах 100-200, це спричинене додатковим легуванням домішками. Сигнал на виході становить 10 мВ/В [11]. Варто пам'ятати, що велика залежність від температури погіршує характеристики, але навіть при цьому напівпровідникові елементи кращі за металеві

Можна зробити висновок з двох останніх абзаців і сказати, що чим більший вхідний сигнал тим стабільніші вимірювання з поправкою на температуру. З цього випливає факт, що датчики потребують високих значень напруги, іноді більших ніж в інших датчиках, це робить неможливим його використання в компактних приборах з батареєю або акумулятором.

Завдяки міцності матеріалів і простоті в конструкції датчика, він має стабільні характеристики з часом [12].

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ ТИСКУ

2.1. Чутливі елементи ємнісних сенсорів тиску

Для розуміння роботи датчиків на основі ємності ми розглянемо фізичні процеси які в них відбуваються.

Як нам вже відомо конденсатор складається з двох пластин та діелектрика між ними, є також інші схеми конденсаторів але їх ми не будемо розглядати. Традиційно пластини конденсатора мають однакові розміри та площу, вони виготовляються з металів. Діелектриком можуть бути різні речовини, основна характеристика це значення опору.

Принцип роботи наступний. Якщо одну пластину підключити до додатнього джерела електричного струму, а другу – до від'ємного, то обидві пластини зарядяться різними зарядами. Заряди продовжуватимуть утримуватися на обкладках навіть після від'єднання джерела живлення. Це обумовлено тим, що заряди різних знаків («+» і «-») прагнуть притягнутися один до одного. Однак цьому перешкоджає діелектрик (матеріал, що не проводить струм), розташований на їхньому шляху. Тому заряди, розподілені по всій площі обкладок, залишаються на своїх місцях та утримуються силами взаємного тяжіння [3-4].

Конденсатор накопичує електричне поле і тим самим поляризує діелектрик між пластинами. Молекули в діелектрику вистроюються в певному напрямку та мають чітку полярність. Негативні полюса молекул спрямовані до пластини з додатнім зарядом, а додатні - навпаки [4].

З формули 1.1 з першого розділу можемо зрозуміти, що важливим є відстань між пластинами та їх площа. Крім цих величин в формулі присутня діелектрична проникність речовини між пластинами ϵ . Вона показує у скільки разів заряд конденсатора з даним діелектриком перевершує заряд аналогічного накопичувача,

якщо між його пластинами тієї ж площі і відстані знаходиться вакууму. Для повітря це величина дорівнює одиниці, тобто практично нічим не відрізняється від вакууму. Конденсаторна кераміка має $\epsilon = 10..200$ одиниць, тому кераміка активно використовується для датчиків цього типу [1].

Для підвищення величини та стійкості вихідного сигналу використовуються датчики які мають три пластини, середня виступає в ролі діафрагми. Таким чином ми маємо одразу два конденсатора, що покращує характеристики датчика.

Як правило для ємнісних датчиків використовують два типа мембран: “затиснута” діафрагма та діафрагма, що виготовлена з цільного шматка матеріалу. На рисунку 2.1 показані ці два типа [12].



Рисунок 2.1 – Діафрагми ємнісних датчиків тиску. Адаптовано із роботи [1]

В тонкоплівкових ємнісних датчиках тиску, як діелектрик може використовуватись поліімідна плівка через її термостійкість, низький рівень виділення газів, стійкість до випромінювання та ізоляційні властивості. Можливі високі довготривалі робочі температури до 230°C і короточасні до 400°C . Товщина плівки буває різною, але знаходиться в діапазоні від 10 до 25 мкм. Для контактів використовуються алюміній, нікель або їх сплави [12, 15].

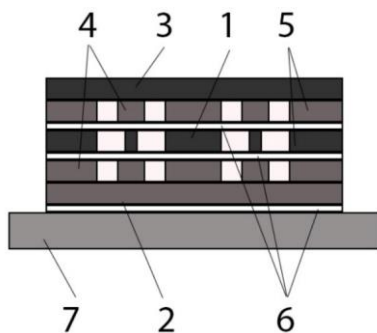


Рисунок 2.2 – Схематична структура тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску: 1 – чутливий елемент, 2 – основа, 3 – мембрана, 4 – обкладки, 5 – захисні екрани, 6 – клей, 7 – профіль поверхні. Адаптовано із роботи [1]

При дії тиску на сенсор (рис. 2.2) відбувається деформація в районі комірки (мембрана вигинається в комірку) поза межами зони чутливого елементу тонка плівка (де знаходяться металізовані виводи та екрани) працює на пружний стиск. У всіх цих режимах роботи сенсора в плівці можуть відбуватися зміни її лінійних розмірів (ширини, довжини, товщини). Всі шорсткості, виступи шарів деформуються завдяки рівномірній пружності клею. Оскільки чутливий елемент сенсора виготовлений з суцільної тонкої плівки, опорними реакціями по радіусу перфорації можна знехтувати, оскільки вони мають місце тільки при великих деформаціях чутливого елемента [1].

Зміна ємності такого сенсора розраховується за наступною 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.

З наведеної формули можна сказати, що при дії тиску Δp на сенсор, останній деформується на величину Δl , яка змінює ємність на ΔC . Вихідна напруга ΔU пов'язана з опорною напругою $\Delta U_{оп}$ через відносну зміну ємності $\frac{\Delta C}{C}$ [1].

2.2. Технологія виготовлення та основні характеристики інерційного ємнісного датчика тиску

В цьому підрозділі ми розглянемо технологію створення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску, оскільки ця технологія є доволі прогресивною та сучасною і має великий потенціал.

Представлені конструкція та спосіб збирання інерційного ємнісного датчика, а також спосіб вимірювання тиску у складі вимірювальної апаратури.

Даний датчик тиску, складається з трьох діелектричних плівок, з них перша діелектрична плівка містить основний екран, друга діелектрична плівка містить нижні обкладки з виходами і екран, обидві плівки з твердого полііміду, на верхній поверхні третьої діелектричної плівки сформована відповідна обкладка, з шарів трьох діелектричних плівок зібраний пакет, плівки скріплені між собою і досліджуваним об'єктом за допомогою клею, в пакеті третя діелектрична плівка виконана з м'якого діелектрика, на її поверхні сформована обкладка, всі обкладки з виходами і екрани виконані з мідної або нікелевої фольги, причому обкладки з виходами та екрани на поверхнях другої та третьої діелектричних плівок сформовані методом фотолітографії, товщина фольги з міді або нікелю має товщину від 5 до 20 мкм [12].

Шари діелектричних плівок між собою і з основою датчика скріплюють клеєм, вибирають конструкційний клей холодного затвердіння. Матеріал чутливого елемента датчика з м'якого діелектрика, повинен мати мінімальну швидкість проходження, всередині себе, звукової хвилі і гарною адгезією з клейовим з'єднанням [1].

Складання пакета датчика здійснюють у наступному порядку: наносять шар клею на основу датчика, на ній розташовують першу тверду діелектричну плівку, що містить основний екран, потім шар клею наносять на поверхню основного екрану, на ній розташовують другу тверду діелектричну плівку, що містить нижні обклашки з виходами та екрани, на них теж наносять шар клею і на цьому клейовому шарі розташовують третю м'яку діелектричну плівку, що є чутливим елементом датчика. У зібраному вигляді пакет витримують за умови 15-30°C температури, тривалістю 72 годин. Визначають параметри датчика і складають на нього паспорт [1, 15].

Фінальним етапом в створенні датчика є градування чутливих елементів датчика, визначення коефіцієнта перетворення вимірювального каналу. Датчики поміщають в газове середовище, реєструють без подачі швидко змінного тиску, подають напругу поляризації постійного струму ємнісних чутливих елементів, визначають час перехідного процесу на виході підсилювача напруги. У другому експерименті в стані поляризації ємнісних чутливих елементів та за сталої напруги поляризації та живлення вимірювальної апаратури, подають на датчик швидкозмінний тиск, вимірюють перехідний процес від впливу швидко змінного тиску, на виході підсилювача напруги реєструють та запам'ятовують в індикаторі (комп'ютері). Визначають швидкості поширення звукової хвилі розширення та спотворення в поліімідній плівці [1, 12].

На рисунку 2.5 зображена конструкція датчика (перерізи А Б В). Основою датчика служить сам досліджуваний об'єкт 1. Мідна або нікелева фольга 2, яка є основним екраном, і перша тверда діелектрична плівка 3, між досліджуваним об'єктом 1 та основним екраном 2, з поліімиду і це є ізолятором між об'єктом та екраном 2. На другій твердій діелектричній плівці 4 способом фотолітографії сформований екран 5 нижні обклашки 6 з виходами. На поверхні обкладок 6 і 5

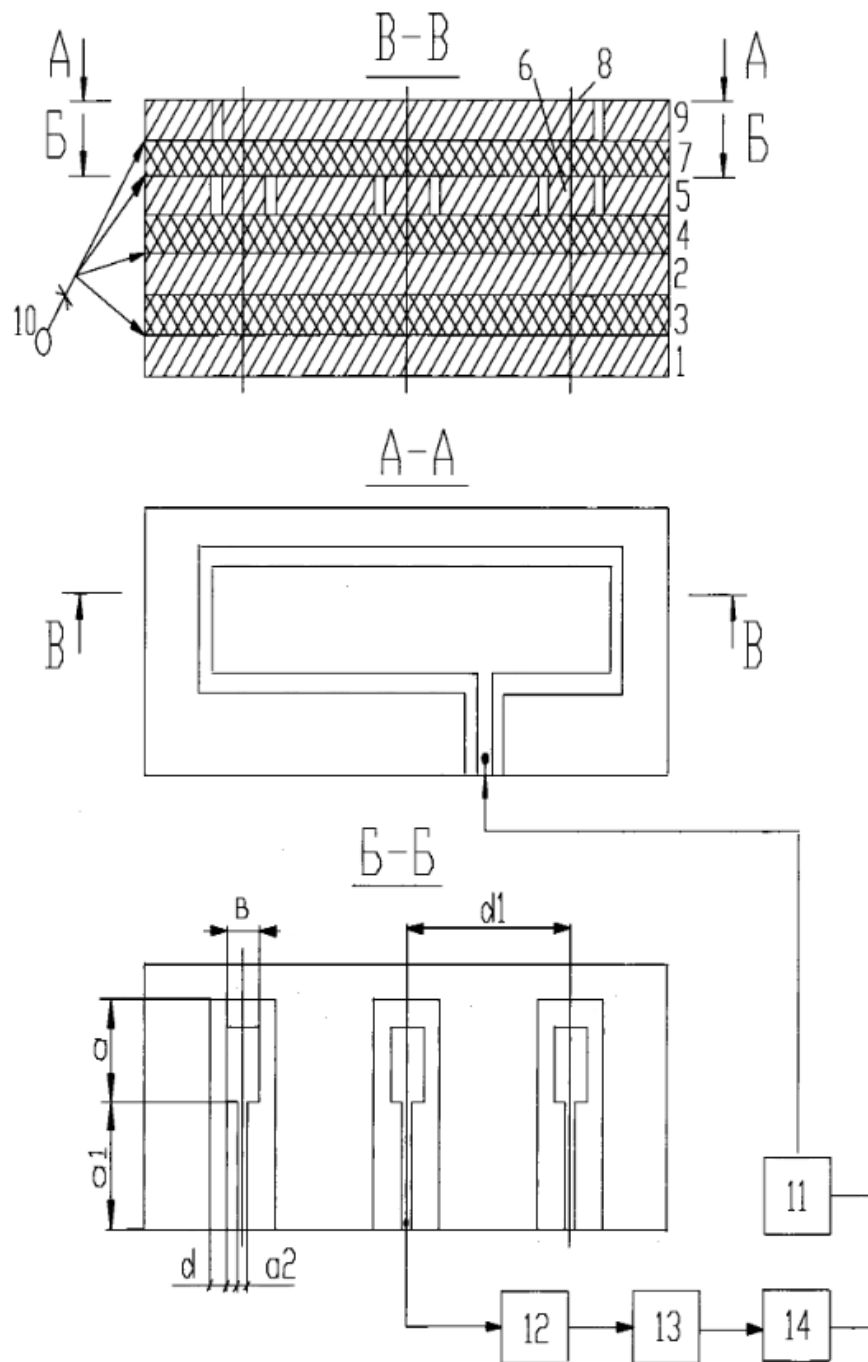


Рисунок 2.5 – Будова окремих елементів інерційного ємнісного датчика та структурна схема вимірювальної апаратури. Адаптовано із роботи [12]

екрана наклеєна третя м'яка діелектрична плівка 7, що служить в якості чутливого елемента (пружний елемент датчика) [12].

На поверхні пружного елемента датчика 7 наклеєна об'єднана обкладка 8 з виходом і екран 9, з міді або нікелю (рис. 2.5 перетини А-А, Б-Б). Вихідний контакт об'єднаної обкладки 8 зміщений щодо виходів обкладок 6. Напруга поляризації на датчик подають на обкладку 8 через контакт.

Розміри обкладок, $a \times b = 4 \times 6 - 6 \times 9$ мм (можуть бути більшими), довжина виходів $a_1 = 3$ мм і більше, залежить від умов і вимог експерименту. Ширина виходів $a_2 = 0,8-1,2$ мм. Відстань між екраном 5, обкладкою 6 та виходами 0,3-0,5 мм. Відстань між обкладками $d_1 = 8-12$ мм і більше. Форму обкладок вибирають будь-яку. Екран 2 захищає датчик від дії зовнішніх електромагнітних перешкод. Пружний елемент 7 виготовляють з м'якої гуми або каучуку, що здатні витримувати температуру від -80°C до $+300^\circ\text{C}$. Товщини обкладок, екранів із міді та товщини поліімідної плівки (кожною окремо) від 5 мкм до 20 мкм. Шари конструкції датчика між собою та на об'єкті скріплюють шарами клею 10 [12].

Після формування пакета вимірюють електричну ємність датчика, опір ізоляції, здійснюють пайку виводів олов'яним припоєм. Пайку нікелевих виводів здійснюють будь-якими активними флюсами, наприклад, нітридом бору. Датчики виготовляють у матричному та одноштучному варіантах [11].

Структурна схема містить джерело поляризації з постійними напругою та струмом 11, підсилювач заряду 12, підсилювач напруги 13 і індикатор 14. Нижні обкладки датчика через підсилювач заряду 12, підсилювач напруги 13 з'єднують з індикатором 14. Екрани 2 та 5 заземлюють [12].

Вибрана технологія виготовлення датчика доволі дешева. Це пояснюється тим, що не потрібні вакуумні установки для металізації вибраних діелектриків. Металізація м'якого діелектрика товщиною металу 50-60 нм [12] ненадійна через те, що м'який діелектрик легко деформується під впливом зовнішніх зусиль та руйнується його мікроструктурне покриття.

Відомо, що одним із центральних завдань швидкозмінних (динамічних) процесів в авіаційно-космічній техніці та промисловості є визначення формування крутих підйомів та спадів від впливу вибухових, ударних, вітрових навантажень. В енергонасичених силових установках великі витрати часу та енергоресурсів у перехідних процесах викликаються зовнішніми силами або дією внутрішніх процесів при переході з одного режиму до іншого [1-3].

Потреба створення ємнісного інерційного датчика, пов'язана з необхідністю скорочення часу переходу силових установок з одного процесу, що встановився до іншого. Не установленіми режимами (процесами) роботи об'єкта дослідження є періоди пуску, екстреного гальмування, зупинки, різкого переходу з одного режиму на інший [1, 8].

Актуальними об'єктами, що підлягають дослідженню, можуть бути аеродинамічні труби, літальні апарати, турбіни та генератори в енергетиці. Для скорочення часу перехідного процесу об'єктів необхідно спостерігати і вивчати причини затягування цього процесу, що виникають, в реальному часі. Спостереження та реєстрацію за перехідним процесом здійснюють інерційним датчиком при впливі динамічного навантаження на досліджуваний об'єкт.

Спостереженні явища можуть бути новими, які раніше не були виявлені та розпізнані або мало вивчені. Через малу інерційність традиційних об'ємних датчиків, дослідження будь-яких перехідних процесів фізичних величин було дещо обмежене.

На об'єкт дослідження з датчиком можуть впливати зовнішні сили, моменти, звуковий тиск, різні аерогідродинамічні навантаження, вибухові, ударні, вітрові хвилі. Тому для спостереження нагрузок на об'єкт при переході з одного до іншого стану, і детектування характеру зміни стану, необхідно мати інерційний датчик. При цьому датчик не повинен викликати додаткове спотворення досліджуваного процесу, а має зберегти цілісність конструкції об'єкта дослідження [7, 12].

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЄМНІСНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ НА ОСНОВІ МОНОКРИСТАЛУ 3C-SiC

На рис. 3.1 представлено спрощений вид у поперечному перерізі пропонуваного ємнісного датчика тиску. Пристрій складається з круглої 3C-SiC діафрагми з затиснутими краями, підвішеної над герметичною порожниною на кремнієвій підкладці. Діафрагма відхиляється в бік підкладки під впливом зростаючого зовнішнього тиску, таким чином збільшуючи значення ємності пристрою між діафрагмою і підкладкою. Як тільки діафрагма торкається підкладки при заданому тиску в точці дотику, ємність датчика збільшується майже лінійно з тиском через лінійно зростаючу площу дотику. Майже лінійна поведінка є бажаною для різних застосувань датчиків. Монокристалічний матеріал 3C-SiC обраний для згинаючої діафрагми, оскільки його можна легко вирощувати на поверхні кремнієвої пластини з фіксованою якістю, таким чином забезпечуючи надійну роботу при підвищених температурах [15, 17].

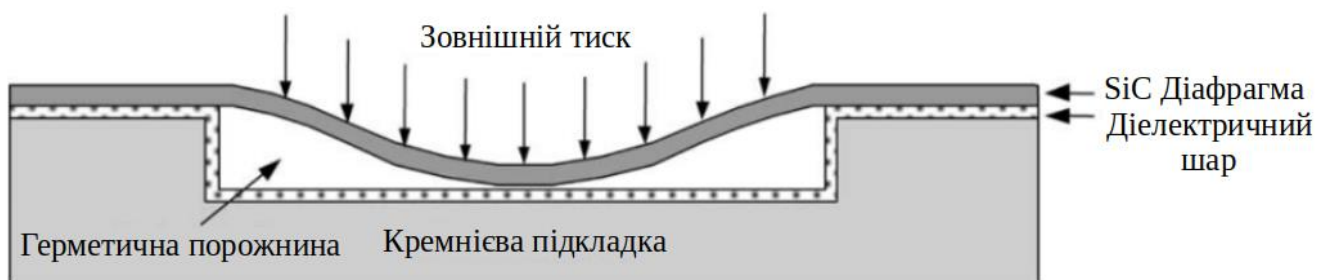


Рисунок 3.1 – Вид у поперечному перерізі датчика тиску SiC. Адаптовано із роботи [17]

На рис. 3.2 представлено мікрофотографію ТЕМ у поперечному перерізі наплавленого 3C-SiC, на якому показано як плівку 3C-SiC, так і кремнієву підкладку. На мікрофотографії чітко видно наявність кристалічних дефектів у шарі 3C-SiC, з найвищою щільністю на межі розділу плівки та підкладки. Ця

мікрофотографія характерна для епітаксійних плівок 3C-SiC в тому, що щільність дефектів найвища на межі розділу в результаті майже 20% невідповідності решітки між 3C-SiC і кремнієм [17]. Такий високий рівень дефектів є постійною проблемою для п'єзорезистивних датчиків тиску на основі 3C-SiC, оскільки дефекти, як правило, пригнічують п'єзорезистивні властивості, що погіршує чутливість пристрою. Для конструкцій ємнісних датчиків, таких як пристрій, зазначений у цьому пункті, висока щільність дефектів не впливає на продуктивність датчика, оскільки значення ємності пристрою не залежить від п'єзорезистивних характеристик SiC [15, 17].

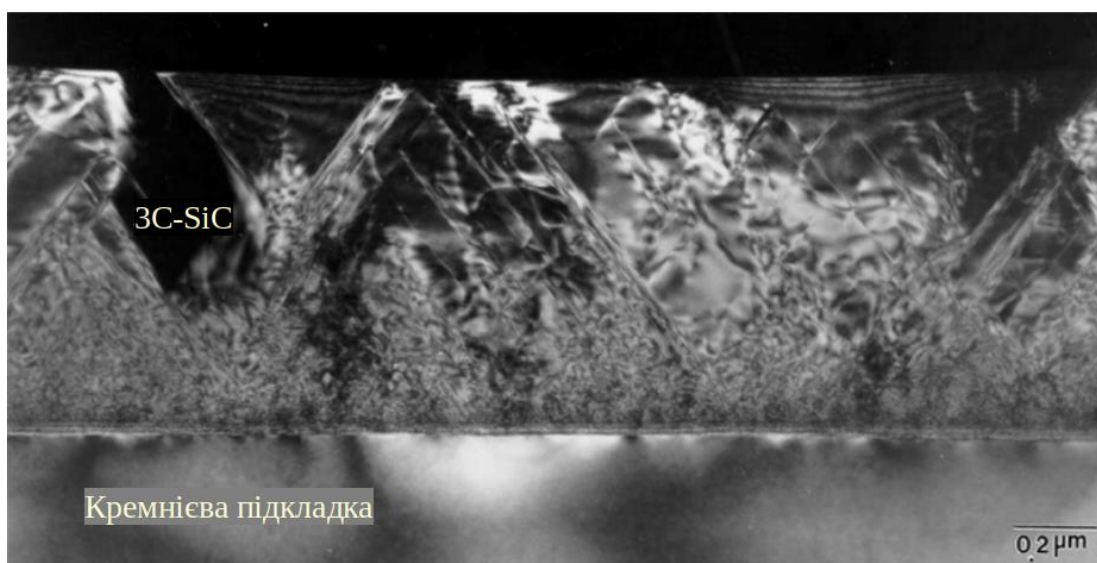


Рисунок 3.2 – Мікрофотографія ПЕМ поперечного перерізу плівки 3C-SiC на кремнієвій підкладці. Адаптовано з роботи [17]

Монокристалічний матеріал 3C-SiC вибрано, оскільки він доступний на поточному виробництві і може бути легко вирощений на поверхні 4 кремнієвих пластин з контрольованою якістю. Інші матеріали SiC, такі як тонкі плівки 4H-SiC і 6H-SiC, також можуть бути використані для виготовлення високотемпературних ємнісних датчиків тиску. Прототип пристрою демонструє здатність вимірювання температури до 400 °C [17], найвищу температуру серед напівпровідникових

ємнісних датчиків тиску на сьогоднішній день. Досягнута продуктивність підходить для різних застосувань високотемпературного датчика.

На рис. 3.3 представлений хід процесу виготовлення запропонованого ємнісного датчика тиску. Кремнієва пластина протравлюється за допомогою процесу реактивного іонного травлення з утворенням 2-мкм виїмки з подальшим нанесенням 2500 Å фосфор силікатного скла (PSG) як шару ізоляції, як показано на рис. 3.3а. Далі, 0,5-мкм монокристал 3С-SiC вирощують на поверхні кремнієвої пластини хімічним осадженням з парової фази при атмосферному тиску. Тонка плівка 3С-SiC має питомий опір приблизно 0,5 Ом*см і напругу на розтяг 200 МПа. Потім поверхня SiC полірується за допомогою етапу хімічно-механічного полірування, щоб мінімізувати шорсткість поверхні та дефекти. Потім на поверхню SiC наноситься 2500 Å плівка PSG, як показано на рис. 3.3б. Цей шар PSG покриває будь-які залишкові дефекти поверхні, що є важливим кроком для успіху на наступному етапі склеювання пластин. Дві пластини відпалюють при 1000 °С під атмосферним тиском протягом години, після чого виконується незначне полірування поверхні. Потім над пластиною проводять стандартний набір етапів очищення, які необхідно виконати перед етапами високотемпературної обробки для отримання гідрофільних поверхонь і з'єднуються разом під тиском приблизно 360 мм. рт. ст., як показано на рис. 3.3в. Потім проводять високотемпературний відпал при 1000 °С протягом 2 год для підвищення якості з'єднання. На наступному етапі кремнієва підкладка над шаром SiC видаляється за допомогою травлення гідроксид тетраметиламонієм (ТМАГ) для утворення діафрагми SiC товщиною 0,5 мкм.

Через перепад тиску діафрагма відхиляється в бік підкладки і може торкатися підкладки залежно від її структурних особливостей, як показано на рис. 3.3г. Далі, на обидві сторони пластини наносять шар нікелю розміром 5000 Å (рис. 3.3д). Потім пластину нарізають кубиками, з'єднують золотим дротом і наносять високотемпературну срібну епоксидну смолу для встановлення

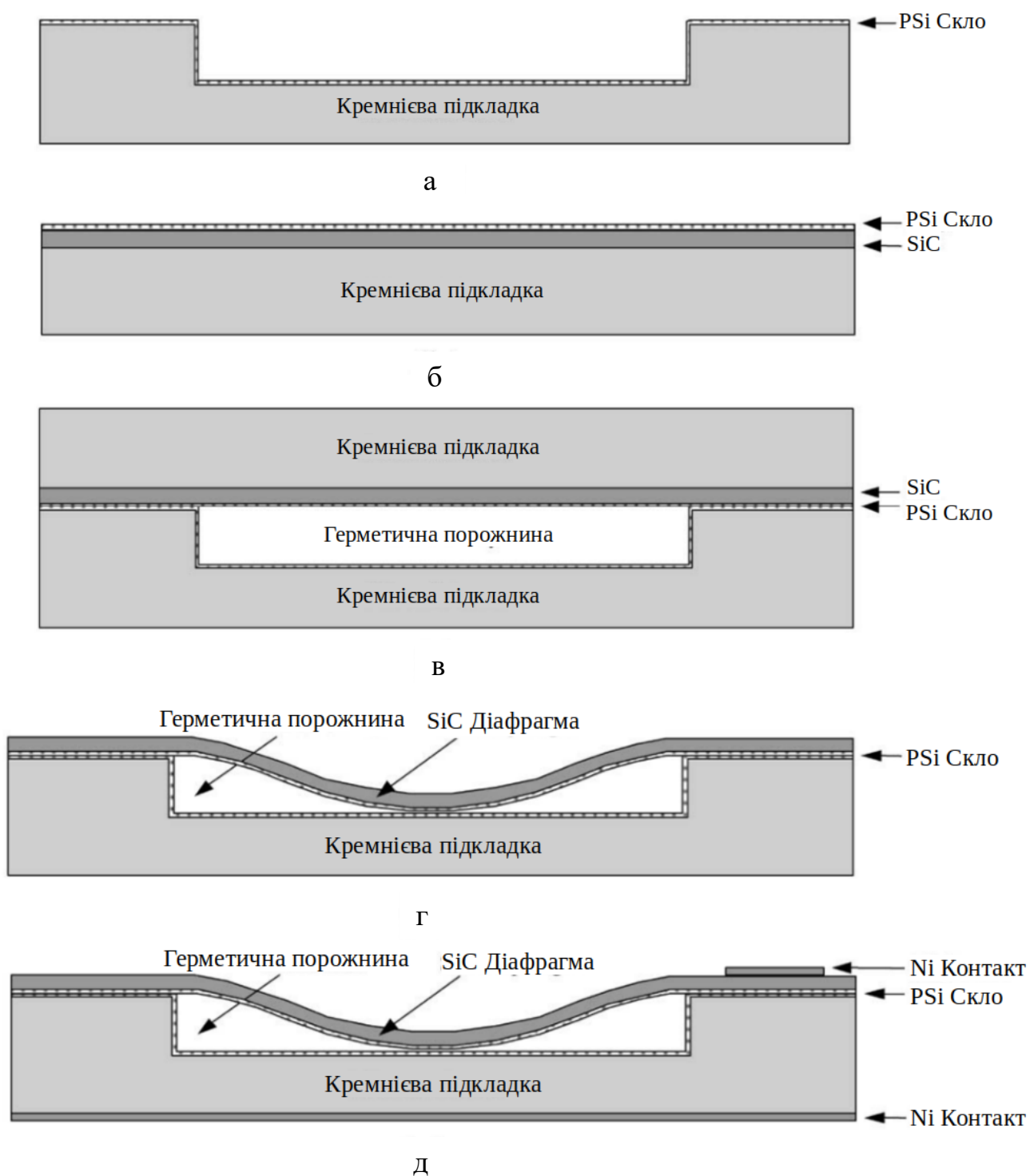


Рисунок 3.3 – Етапи виготовлення датчика. (а) витравлювання заглиблення, (б) нарощування 3С-SiC та осадження фосфор силікатного скла, (в) з'єднання пластин, (г) утворення діафрагми та (д) контактна металізація. Адаптовано із роботи [17]

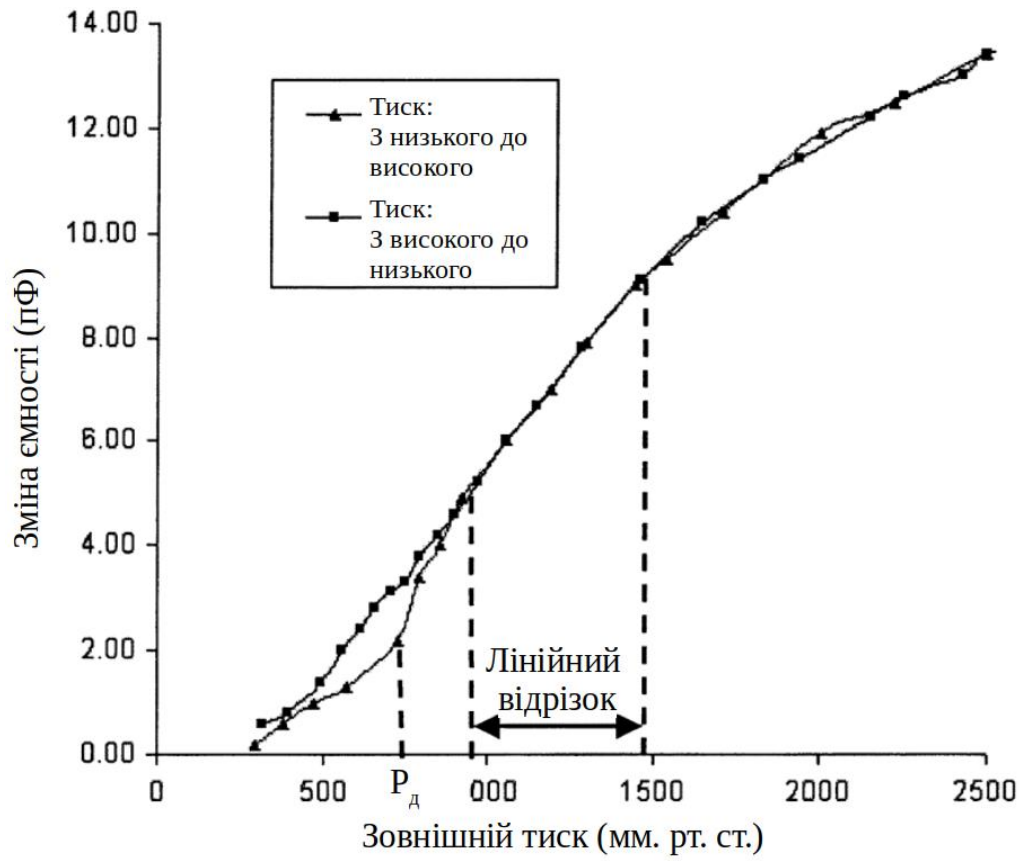


Рисунок 3.4 – Характеристика датчика при 200 °С (P_d – тиск при контакті).

Адаптовано із роботи [17]

електричних контактів до верхнього та нижнього електродів датчика, відповідно, для тестування пристрою [17].

Після створення датчик випробовують в спеціальній тестувальній камері, в якій можна змінювати тиск та температуру. На рис. 3.4 представлено виміряну зміну ємності датчика в порівнянні з зовнішнім тиском при 200 °С. Пристрій демонструє тиск у точці дотику приблизно 720 мм. рт. ст. із загальною зміною ємності 13,5 пФ в діапазоні тиску від 295 до 2500 мм. рт. ст. Датчик досягає лінійної характеристики від 900 до 1450 мм. рт. ст. з чутливістю 8,0 фФ(10^{-15} Ф)/мм. рт. ст. і входить в область насичення зі зниженою чутливістю понад 1500 мм. рт. ст. через геометрію пристрою. Правильно підібравши геометричні параметри приладу, можна отримати різні лінійні діапазони та чутливості. Пристрій демонструє лінійність 0,7% і гістеризис 0,5% в межах лінійного діапазону. Робоча температура досягала значення 400 °С. При температурі 400°C пристрій демонструє очікувану поведінку з тиском у точці дотику приблизно 1000 мм. рт. ст. і досягає лінійної характеристики від 1100 до 1760 торр з чутливістю 7,7 фФ/торр, лінійністю 2,1% і гістерис 3,7%. Результати вимірювань показують, що прототип ємнісного датчика тиску витримує зміни контактного опору при підвищених температурах [15-17].

Як можна побачити з числових даних при різних температурах характеристики дещо відрізняються. Зміна характеристик спричинена декількома факторами, і одним із них є розширення повітря від температури, яке знаходиться між діафрагмою та другим контактом [4]. Ця проблема усувається склеюванням у вакуумі. Але це не єдина проблема, існує також невідповідність температурного розширення карбіду кремнія (SiC) та кремнія (Si) які потрібно враховувати також.

ВИСНОВКИ

1. В ході виконання практики було розглянуто принцип роботи ємнісні датчики тиску, їх особливості технології та фізичний принцип дії. В першому пункті розглянуті загальні поняття, що використовуються у вимірюваннях тиску. Описані види тиску та їх коротка характеристика. Вдалося з'ясувати основні потреби, які висуваються до датчиків при роботі в різних умовах вимірювання.

2. Огляд сучасних літературних даних про особливості методик вимірювання та конструктивно-технологічні параметри плівкових датчиків сили та тиску дозволив встановити наступне:

– для виготовлення плівкових датчиків сил та тисків головним чином застосовують ємнісні та тензорезистивні чутливі елементи;

– тензодатчики функціонують при значних механічних навантаженнях, мають високу чутливість, термостійкість, лінійність вихідних сигналів та стабільність у часі;

– компенсація температурної нестабільності вихідного сигналу досягається застосуванням розв'язок мостовими схемами включення, коли в одному з плечей знаходиться вимірювальний елемент, а в іншому подібний компенсуючий елемент, або при використанні як компенсатора операційного підсилювача;

– ємнісні датчики мають перевагу над тензочутливими датчиками оскільки принцип роботи має меншу температурну залежність;

3. Проаналізовано процеси створення, перевірки та характеристики двох тонкоплівкових ємнісних датчиків. Інерційний датчик тиску має стабільні характеристики та чудово підходить для дослідження перехідних процесів в аеродинаміці та енергетиці а твердий поліїмід та технічні гума гарно показали себе як діелектрики (максимальний вимірювальний тиск 2×10^6 , температурний діапазон – 80 °C до 300 °C).

4. Ємнісні датчики тиску з використанням монокристалічних діафрагм 3C-SiC, вирощених за допомогою хімічного осадження з парової фази, продемонстрували чутливість до 400 °C, що підходить для різних високотемпературних застосувань. Виявлену температурну залежність пристрою можна істотно мінімізувати за допомогою склеювання пластин у вакуумі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Готри, З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / З. Ю. Готри. – М.: Ліга-Прес, 2003. – 256-310 с
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково- навчальне видання. В 3 томах. Том 1/ За ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475с.
3. Tandeske, Duane. Pressure Sensors : Selection and Application Mechanical Engineering – Marcel Dekker, Inc., 1991 – 291 p.
4. Puers B. Sensor and Actuators / B. Puers, W. Sansen, S. Pazczynsky. – 1995. – P. 145-150.
5. Готри, З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / З. Ю. Готри. – М.: Ліга-Прес, 2003. – 265-270 с.
6. Невлюдов І.Ш. Дослідження термічного впливу етапів пакування на параметри функціонування МЕМС ємнісних датчиків тиску / І.Ш. Невлюдов, І.В. Жарікова, С.І. Гресько // НТЖ «Технологія приладобудування». – 2019. – № 2.
7. Chang S. Demonstration for integrating capacitive pressure sensors with read-out circuitry on stainless steel substrate / S. Chang, M. Pallen // Sensors and Actuators A. – 2017. – V. 116. – P. 195–204.
8. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors / Peishuai Song, Zhe Ma, Jing Ma, et al. // Micromachines. – 2020. – V. 11, № 1. – ID 56.
9. Ємнісний передавач тиску. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.silverinstruments.com/product/pressure-measurement/capacitance-pressure-transmitter/> (Дата доступу: 15.05.2022 р.).
10. Ємнісні датчики Джерело. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uadepe.ru/interier/36806-емнісні-датчики.html> (Дата доступу: 19.05.2022 р.).
11. Pak Ch. G. Investigation of the influence of shock activation on main properties of piezoelectric ceramics / Ch. G. Pak, A. V. Pryshchak, G. A. Koshkin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th

- International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – P. 162–163.
12. Казарян А. А. Пленочные датчики давления / А. А. Казарян. – М. : Бумажная Галерея, 2006. – 320 с.
 13. Sander C. S. A monolithic capacitive pressure sensor with pulse-period output / C. S. Sander, J. W. Knutti, J. D. Meindl // IEEE Trans. Devices. – 1980. – V. ED-17. – P. 927–930.
 14. Surface micromachined capacitive absolute pressure sensor array on a glass substrate / M. Habibi, E. Lueder, T. Kallfass, et al. // Sensor. Actuat. A. – 1995. – V. 46. – P. 125–128.
 15. Chiang Chia-Chu. An implantable capacitive pressure sensor for biomedical applications // Chia-Chu Chiang, Chou-Ching K. Lin, Ming-Shuang Ju // Sensor. Actuat. A. – 2007. – V. 134, No 2. – P. 382–388.
 16. Recent Progress on Flexible Capacitive Pressure Sensors: From Design and Materials to Applications / Rishabh B. Mishra, Nazek El-Atab, Aftab M. Hussain, et al. // Adv. Mater. Tech. – 2021. – P. 34.
 17. High-Temperature Single-Crystal 3C-SiC Capacitive Pressure Sensor / Darrin J. Young, Jiangang Du, Christian A. Zorman, et al. // IEEE Sensor. J. 2004 – V. 4, № 4 – P. 464–470.
 18. Using the Piezoresistive Effect and Measuring Pressure. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18253> - 24.05.2022 г.
 19. What is a Piezoelectric Transducer? Circuit Diagram, Working and Applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elprocus.com/what-is-a-piezoelectric-transducer-circuit-diagram-working-and-applications/> (Дата доступа: 17.05.2022 г.).
 20. Electrical Instrumentation Signals. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/DC/DC_9.html (Дата доступа: 10.05.2022 г.).