

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

Анатолій ОРЛОВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р.

**Дипломна робота**  
на здобуття ступеня бакалавра  
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: Тонкоплівковий ємнісний сенсор тиску

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-62

Постнов Ян Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доц., к.ф.-м.н., доц. Родіонов М.К.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВІЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2020 року

## Завдання на дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 мікро- та наносистемна техніка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

Анатолій ОРЛОВ  
(ініціали, прізвище)

(підпис)

«   »                      2020 р.

### ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Постнов Ян Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Тонкоплівковий ємнісний сенсор тиску»

керівник роботи Родіонов М.К. доц., к.ф.-м.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від «   »                      20    р. №       

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 4 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) Розглянути загальні характеристики та типи мікроелектронних сенсорів тиску. Детальний аналіз конструкції та процесу виготовлення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску з використанням методів нанесення тонких плівок. Розгляд переваг та аналіз перспективності використання тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 18 рисунків, 1 таблиця

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики.	01.03.2020	
	Аналіз структурної схеми сучасного тонкоплівкового ємнісного датчика.	15.03.2020	
	Аналіз метрологічних характеристик обкладок з тонких плівок.	15.04.2020	
	Аналіз та обґрунтування використання тонкоплівкових обкладок в ємнісних датчиках тиску.	15.05.2020	
	Оформлення звіту, формулювання висновків, перевірка, захист.	01.06.2020	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Постнов Я. О.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Родіонов М. К.

(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена аналізу тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску та методів зменшення масогабаритних розмірів ємнісних сенсорів тиску та підвищення їх механічних та фізико-електричних характеристик.

У роботі проведено детальний аналіз сучасних сенсорів тиску. Представлені способи використані у тонкоплівкоплівковому ємнісному сенорі тиску для зменшення розмірів та покращення характеристик. Проаналізована перспективність використання обраного сенсора у сферах діяльності з урахуванням особливостей та переваг даного типу датчиків тиску.

Ключові слова: тонкоплівкий, тонкі плівки, ємнісний сенсор тиску, датчик тиску, зменшення розмірів.

## ABSTRACT

This thesis is devoted to the analysis of thin-film pressurized pressure sensor and methods of reducing the mass and size of capacitive pressure sensors and increasing their mechanical and physical-electrical characteristics.

The detailed analysis of modern pressure sensors is carried out in the work. The methods used in the thin - film capacitive pressure sensor for reduction of the sizes and improvement of characteristics are presented. The prospects of using the selected sensor in the field of activity are analyzed, taking into account the features and advantages of this type of pressure sensors.

Keywords: thin-film sensors, thin films, capacitive pressure sensor, pressure sensor, size reduction.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ТИСКУ .....	9
1.1. Класифікація та принцип роботи сенсорів тиску .....	11
1.2. Огляд та порівняння існуючих сенсорів тиску.....	15
1.2.1. Ємнісні датчики тиску .....	15
1.2.2. П'єзоелектричні сенсори тиску.....	19
1.2.3. П'єзорезистивні сенсори тиску.....	25
1.3. Висновки.....	31
2 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ТИСКУ.....	32
2.1. Конструкція ємнісного сенсору тиску.....	32
2.2. Тонкоплівкова технологія та процес виготовлення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску.....	36
2.2.1. Термо-вакуумне напилення.....	38
2.2.2. Електронно-променеве напилення .....	39
2.2.3. Імпульсне лазерне осадження .....	42
2.2.4. Золь-гелевий метод .....	43
2.2.5. Покриття зануренням.....	45
2.2.7. Метод хімічного осадження у ванні.....	46
2.3. Технологія виготовлення тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску з використанням поліїмідних плівок.....	47
3 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБРАНОГО ДАТЧИКА ТА АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТАКОГО СЕНСОРА .....	51

3.1. Переваги та основні особливості тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску .....	51
3.2. Сфери та перспективність використання обраного сенсора. ....	55
3.3. Висновки.....	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	61

## ВСТУП

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 та способи виготовлення сенсора, характеристики та переваги щодо інших типів датчиків, а також сфери використання тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску.



## 1 МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ ТИСКУ

Тиск необхідно враховувати при проектуванні багатьох хімічних процесів. Тиск визначається як сила діюча на одиницю площі і вимірюється в англійських одиницях – пси або в СІ одиницях - Па.

Існують три типи вимірюваного тиску:

- абсолютний тиск - атмосферний тиск плюс надлишковий тиск;
- надмірний тиск - абсолютний тиск мінус атмосферний тиск;
- диференціальне тиск (різниця тисків між двома точками).

Існують різні типи датчиків тиску, які сьогодні доступні на ринку для використання в промисловості. Кожен з них має переваги в певних ситуаціях.

Для того щоб контрольована тиском система працювала правильно і ефективно, важливо, щоб використовуваний датчик тиску міг давати точні свідчення в міру необхідності і протягом тривалого періоду часу без необхідності ремонту або заміни в умовах роботи системи. Існує кілька факторів, що впливають на придатність конкретного датчика тиску для конкретного процесу. Основні це:

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

Чутливий елемент (пружний елемент) буде піддаватися впливу речовин, що використовуються в процесі, тому матеріали датчика, які можуть реагувати з цими речовинами або зазнавати впливу агресивних середовищ - непридатні для використання. Мембрани (діафрагми) є оптимальними навіть для дуже суворих умов використання.

Навколишнє середовище (в технологічному процесі - це середовище створюване речовиною, вібрація, температура і т.д.), в якій проводиться технологічний процес, також повинне бути враховане при виборі датчика тиску.

В агресивних середовищах, при сильних вібраціях в трубопроводі, або при екстремальних температурах, датчики повинні мати додатковий рівень захисту. Герметичні, міцні корпуси з заповненням матеріалом, що містить гліцерин або силікон - часто використовуються для того, щоб захистити внутрішні компоненти датчика (крім чутливого елемента) від дуже жорстких, агресивних середовищ і коливань.

Більшість процесів працюють в певному діапазоні тисків. Оскільки конкретні датчики тиску працюють оптимально в конкретних діапазонах тиску, існує необхідність вибрати пристрої, здатні функціонувати в діапазоні, встановленому процесом.

Різні процеси вимагають різних рівнів точності. Загалом, чим точніше датчик, тим він дорожчий, таким чином, буде економічно вигідно вибрати датчики, які здатні максимально задовольнити необхідну точність. Існує також компроміс між точністю і здатністю швидко виявляти зміни тиску. Отже, в процесах, в яких тиск сильно змінюється протягом коротких періодів часу - недоцільно використовувати датчики, яким потрібно більше часу, щоб дати точні свідчення тиску, хоча вони і могли б дати більш точні значення.

За останні роки технології мікроелектроніки зробили значний крок. Проте, такі галузі як автомобілебудування, космо- та авіабудування та інші мають потребу у постійній мініатюризації та підвищенні характеристик використовуваних сенсорів. Тому постає задача зменшення масо-габаритних розмірів, підвищення опору середовищу, підвищення чутливості та характеристик в цілому[1].

### 1.1. Класифікація та принцип роботи сенсорів тиску

Для вимірювання механічних величин сенсори поділяють на сенсори ємнісного, п'єзорезистивного, магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного, піроелектричного та акустоелектронних типів.

За конструктивними та технологічними ознаками мікроелектронні сенсори механічних величин поділяються на напівпровідникові, тонкоплівкові та товстоплівкові, а за типом конструкції – на об'ємні та плоскі[1].

Принцип дії ємнісних сенсорів оснований на зміні ємності чутливого елемента – діафрагми внаслідок дії сили, тиску або прискорення. У більшості випадків ємнісні сенсори включаються в мостову схему. На виході сенсора у вигляді сигналу електричної напруги виходить перетворена за допомогою модулятора несучої частоти і підсилювача величини неузгодженості моста, яка спричинена зміною реактивного опору сенсора. Через ці особливості, цей спосіб обробки сигналів вимагає дорогої електроніки та елементів узгодження мостової схеми, ускладнюється можливість інтегрування. Також, при великих значеннях несучої частоти можлива нестабільність ємнісної мостової схеми.

Існує інший метод узгодження ємнісного сенсора з зовнішньою схемою – метод резонансної частоти. Таким чином, ємнісний сенсор входить до складу коливального контуру, а рівень вихідного сигналу визначається величиною резонансної частоти та періодом синусоїдальних коливань. Цей метод має недолік, пов'язаний з нелінійним співвідношенням резонансної частоти та ємності сенсора. виправити цей недолік можна за допомогою диференціальних конденсаторів.

Ємнісні сенсори статичних деформацій включають у мостові схеми змінного струму, а ємнісні сенсори динамічних деформацій – від джерела постійного струму. Для досягнення високої чутливості в ємнісних сенсорах використовуються джерела поляризації з великими напругами (більше 100 В) і вибираються відносно малі значення сумарної ємності. Завдяки конструкції на основні конденсатора, мають гарну надійність та стійкість до вібрацій. Час відповіді - це порядку мілісекунд, а у випадку пристроїв MEMS - ще швидше. Ємнісні датчики демонструють низький

гістерезис і хорошу повторюваність вимірювань. Вони також мають низьку температурну чутливість і можуть вимірювати широкий спектр пульсацій тиску. Основним недоліком ємнісних сенсорів є велика чутливість до струмів витоку, тому широке застосування отримали ємнісні сенсори з електронною схемою перетворення на виході ємності в частоту[1-3].

Тензометричні сенсори мають просту і надійну конструкцію, вимірюють тиск у широкому частотному і температурному діапазоні. Принцип дії оснований на використанні п'єзрезистивного ефекту. На основі цього ефекту розроблено цілий клас перспективних і сучасних сенсорів тиску для застосування в різних галузях. Конструкція тензометричних датчиків складається із тензочутливого елемента (тензорезистора або тензочутливої плівки), який має контакт з діафрагмою, яка в свою чергу контактує з вимірюваним тілом. Живлення здійснюється змінною і постійною електричною напругою. Недоліками тензометричних сенсорів є високі вимоги до чистоти вихідних матеріалів, складність технології виготовлення, висока температурна залежність тензочутливості та висока вартість.

Індуктивні сенсори зі змінним повітряним зазором є надійними через свою просту конструкцію. Такі сенсори мають невеликий вихідний електричний опір, проте їх механічна міцність на кілька порядків нижча ніж у магнітопружних аналогів. Простий індуктивний датчик (однотактний) складається з котушки індуктивності із сердечником і рухомим якорем, відділеним від сердечника повітряним зазором. Вимірювальним колом може служити будь-яка мостова схема, придатна для індуктивних сенсорів. Зручно використовувати в диференційних схемах[4]. У порівнянні із напівпровідниковими та ємнісними аналогами індуктивні сенсори є більш громіздкими, мають менший робочий діапазон частот(до 5кГц) та низьку чутливість. Диференційні індуктивні сенсори частково позбавлені цих недоліків. Однак їхніми перевагами є висока надійність, опір до зовнішніх впливів та високу зносостійкість.

П'єзоелектричні датчики тиску використовують п'єзоелектричний ефект – виникнення ЕРС під дією тиску. Серед матеріалів застосовують кварц, сегнетову сіль, дигідрофосфат амонію, сульфат літію, титанат барію, а також

п'єзоелектричні композиційні матеріали (електрети): полівінілделфторид, полівінілфторид та інші. Основними типами деформації, що використовуються в конструкції п'єзоелектричних датчиків є деформація по довжині, товщині і об'єму (об'ємна деформація). П'єзоелектричні сенсори чутливі до зовнішніх впливів, їх чутливі елементи повинні бути захищені від вібрацій та ударів. П'єзоелектричний датчик слід використовувати для вимірювання швидкозмінних тисків. У разі, якщо тиск змінюється повільно – зростає похибка перетворення через “стікання” електричного заряду з пластин на корпус. Вирішити цю проблему можна за допомогою паралельно включеного конденсатора, проте при цьому зменшиться напруга на виходах датчика. Сенсори на основі п'єзоелектричних плівок, незважаючи на малий об'єм і розміри, не знайшли широкого застосування. Крім високої віброчутливості, їм притаманний піроелектричний ефект. Через вплив явища піроелектричного ефекту важко відрізнити вихідні значення сенсора від зміни амплітуди колювання чи тиску від періодичних змін індукованої температури газу[4].

Принцип роботи піроелектричного сенсора оснований на піроелектричному ефекті – реєстрації періодичних змін температури газу, зумовлених адіабатним характером поширення тиску. Матеріалом є напівкристалічна орієнтована плівка, яка в складі сенсора з чутливою площадкою, забезпечує високу інтегральну чутливість близько 120 В/Вт на  $1\text{мм}^2$  та ємність не менше 40 пФ на  $1\text{м}^2$ . Сенсори виконуються на підкладці з поліамідної плівки, для чутливого елемента використовується тетраамінодифеніл. Основним методом виготовлення таких датчиків є метод термічного випаровування.

Таблиця 1.1 – Короткі відомості основних типів сенсорів тиску

Тип	Принцип роботи	Діапазон вимірювання	Похибка	Переваги	Недоліки
Ємнісний	Відхилення діафрагми, що є однією з пластин конденсатора, під дією сили викликає зміну ємності	7011а-1.4 МПа	0.05	Висока точність та чутливість; міцність; висока термостабільність робочих характеристик	Висока вартість; непридатність при високому тиску
Індуктивний	Відхилення діафрагми під дією тиску зумовлює зміну індуктивності моста або диференційного трансформатора	280Па - 70 МПа	0.5	Великі вихідні сигнали; широкий діапазон вимірювання	Температурна нестабільність; чутливість до ударів та вібрацій
П'єзорезистивний	Зміна опору чутливого елемента під дією тиску	3.5кПа-70 МПа	0.025-0.5	Висока чутливість; малий гістерезис; міцність; широкий температурний діапазон	Низькі вихідні сигнали; чутливість до зміни температури
П'єзоелектричний	Поява електростатичної напруги на кристалі кварцу або сегнетової солі під дією тиску	0.7 кПа-70 МПа	1	Не потрібне джерело збуджуючої напруги; широкий діапазон вимірювання тиску; широкий температурний діапазон	Низькі вихідні напруги; низька точність; недостатня стабільність

## 1.2. Огляд та порівняння існуючих сенсорів тиску

Перші манометри були чисто механічними. Вони використовували такі механізми, як діафрагма або «трубка Бурдона», які змінювали форму під тиском для переміщення вказівника на циферблат.

Сучасний розвиток промисловості та техніки потребує датчики, які б могли задовольнити галузь не лише малими розмірами, а й високою чутливістю, точністю і можливістю працювати у складних агресивних умовах.

З тих пір були розроблені різні методи перетворення механічних переміщень в електричні сигнали. Тут ми розглянемо відносні переваги п'єзорезистивних, ємнісних та п'єзоелектричних датчиків тиску.

### 1.2.1. Ємнісні датчики тиску

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

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

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

де  $\varepsilon_r$  - діелектрична константа матеріалу між пластинами (це 1 для вакууму);

$\varepsilon_0$  - електрична константа (дорівнює  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ );

$A$  - площа пластин;

$d$  - відстань між пластинами.

Зміна будь-якої зі змінних призведе до відповідної зміни ємності. Найпростіше керувати відстанню між пластинами. Це можна зробити, зробивши одну або обидві пластини діафрагмою, яка відхиляється змінами тиску.

Зазвичай один електрод - це діафрагма, чутлива до тиску, а другий – фіксована пластина. Приклад ємнісного датчика тиску показано на рисунку 1.2.1.1.

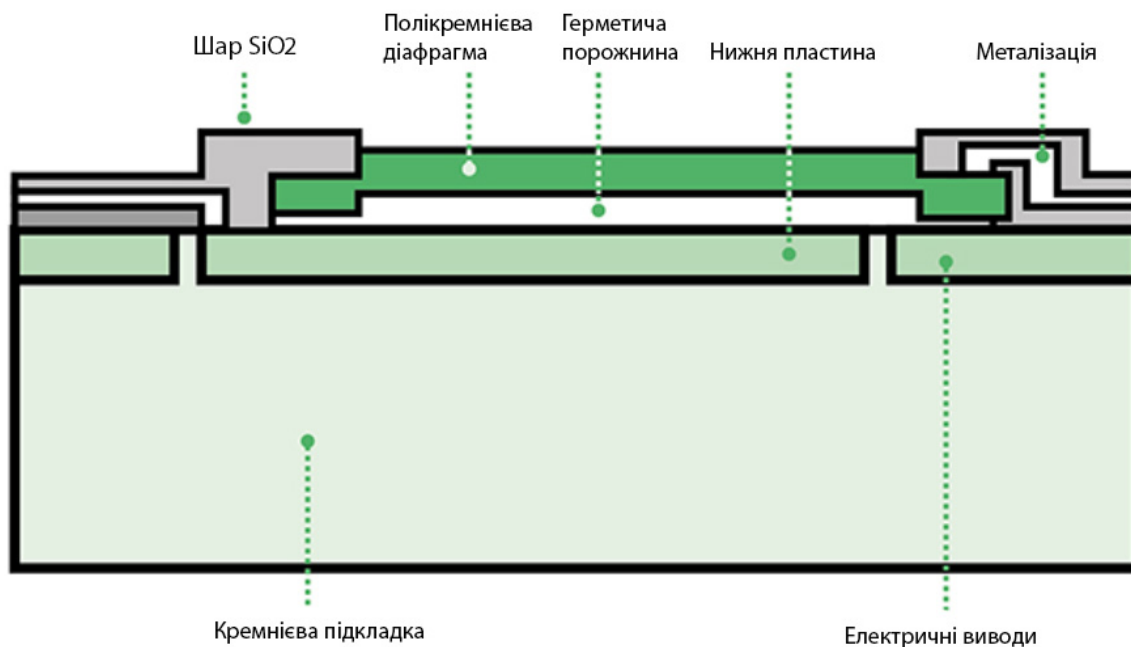


Рисунок 1.2.1.1 - Конструкція ємнісного сенсора тиску

Найпростіший спосіб вимірювання зміни ємності - це зробити його частиною відрегульованої схеми, яка зазвичай складається з ємнісного датчика та індуктора. Це може змінити частоту генератора або змінний струм резонансного кола. Діафрагма може бути побудована з різноманітних матеріалів, таких як пластик, скло, кремній або кераміка, щоб задовольнити різні види застосування. Ємність датчика зазвичай становить від 50 до 100 пФ, при цьому зміна становить кілька пікофарадів[5].

Жорсткість і міцність матеріалу можна вибрати для забезпечення діапазону чутливості та робочого тиску. Для отримання великого сигналу, можливо, датчик повинен бути досить великим, що може обмежувати частотний діапазон роботи. Однак менші діафрагми більш чутливі та мають швидший час реакції. Тонка діафрагма може бути чутливою до шуму від вібрації (адже цей же принцип



використовується для виготовлення конденсаторних мікрофонів), особливо при низькому тиску.

Більш товста діафрагма використовується в датчиках високого тиску і для забезпечення механічної міцності. Датчики з повномасштабним тиском до 5000 фунт / кв.дюйм легко можна побудувати, контролюючи товщину діафрагми.

Вибираючи матеріали для пластин конденсаторів, які мають низький коефіцієнт теплового розширення, можна зробити датчики з дуже низькою чутливістю до зміни температури. Структура також повинна мати низький гістерезис, щоб забезпечити точність і повторюваність вимірювань. Оскільки сама діафрагма є чутливим елементом, не виникає проблем з прив'язкою додаткових компонентів до діафрагми, тому ємнісні датчики здатні працювати при більш високих температурах, ніж деякі інші типи датчиків[5].

Ємнісні датчики тиску також можуть бути побудовані безпосередньо на кремнієвій мікросхемі з тими ж методами виготовлення, які застосовуються при виробництві напівпровідникових електронних пристроїв. Це дозволяє будувати дуже невеликі зондуючі елементи та поєднувати їх з електронікою для кондиціонування сигналу та відклику[5].

Зміна ємності може бути виміряна за допомогою підключення датчика в частотно-залежному ланцюзі, наприклад, генераторі або контурі ємності. В обох випадках резонансна частота ланцюга буде змінюватися у міру зміни ємності з тиском.

Осцилятору потрібні додаткові електронні компоненти та джерело живлення. Резонансний контур може використовуватися як пасивний датчик, без власного джерела живлення.

Діелектрична константа матеріалу між пластинами може змінюватися в залежності від тиску або температури, і це також може бути джерелом помилок. Відносна проникність повітря та більшості інших газів збільшується з тиском, тому це трохи збільшить зміну ємності з тиском. У цьому відношенні ідеально діють абсолютні датчики тиску, які мають вакуум між пластинами.

Більш лінійний датчик може бути побудований за допомогою "сенсорного режиму", коли діафрагма контактує з протилежною пластиною (з тонким ізоляційним шаром посередині) протягом нормального робочого діапазону. Геометрія цієї структури призводить до отримання більш лінійного вихідного сигналу.

Цей тип датчиків також більш надійний і здатний впоратися з більшим перенапруженням. Це робить його більш придатним для промислових умов. Однак ця структура більш схильна до гістерезису через тертя між двома поверхнями. Схематично ємнісний сенсор у сенсорному режимі показано на рис. 1.2.1.2.

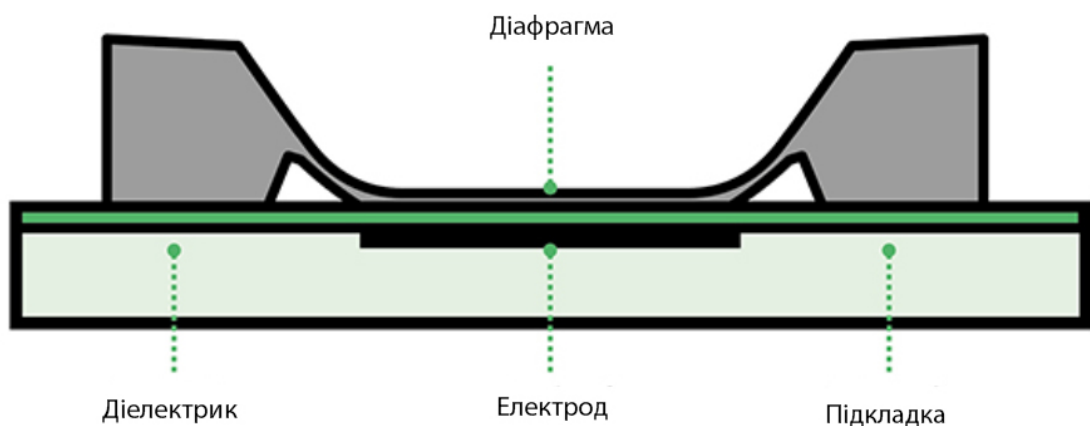


Рисунок 1.2.1.2 - Ємнісний сенсор у сенсорному режимі

Електроніка для вимірювання та кондиціонування сигналу потрібно розміщувати близько до чутливого елемента, щоб мінімізувати вплив на ємність. Оскільки вони можуть бути включені як компоненти в високочастотні налаштовані схеми, ємнісні датчики цілком підходять для бездротового вимірювання.

У випадку пасивних датчиків зовнішня антена може використовуватися для подачі сигналу для стимулювання налаштованої схеми і таким чином вимірює зміну резонансної частоти. Це робить їх придатними для медичних пристроїв, які

потребують імплантації. Як варіант, для активного датчика, частота, що генерується генератором, може підбиратися антеною.

Ємнісні датчики тиску часто використовуються для вимірювання тиску газу або рідини в реактивних двигунах, автомобільних шинах, тілі людини та багатьох інших місцях. Але вони також можуть бути використані як тактильні датчики в носячих пристроях або для вимірювання тиску, що застосовується на комутаторах або клавіатурах. Вони особливо універсальні, частково завдяки механічній простоті, тому можуть використовуватися в складних умовах. Ємнісні датчики можна використовувати для вимірювання абсолютного, калібрувального, відносного або диференціального тиску[5].

Ємнісні датчики тиску мають ряд переваг перед іншими типами датчиків тиску.

Вони можуть мати дуже низьке енергоспоживання, оскільки через елемент датчика немає постійного струму. Струм тече лише тоді, коли сигнал проходить через ланцюг для вимірювання ємності. Пасивні датчики, де зовнішній зчитувач подає сигнал до ланцюга, не потребують джерела живлення - ці атрибути роблять їх ідеальними для додатків малої потужності, таких як віддалені або IoT-датчики.

Датчики механічно прості, тому їх можна зробити міцними з стабільним виходом, що робить їх придатними для використання в суворих умовах. Ємнісні датчики зазвичай толерантні до тимчасових умов надмірного тиску.

Вони мають низький гістерезис з хорошою повторюваністю і не дуже чутливі до змін температури.

З іншого боку, ємнісні датчики мають нелінійний вихід, хоча це може бути зменшено в пристроях із сенсорним режимом. Однак це може привести до більшого гістерезису.

### 1.2.2. П'єзоелектричні сенсори тиску

П'єзоелектричність - це заряд, що створюється в певних матеріалах при застосуванні механічного напруження. П'єзоелектричні датчики тиску

використовують цей ефект, вимірюючи напругу в п'єзоелектричному елементі, що генерується при прикладеному тиску. Вони дуже надійні і застосовуються в широкому спектрі промислових застосувань.

Коли сила накладається на п'єзоелектричний матеріал, по гранях кристала утворюється електричний заряд. Це можна виміряти як напругу, пропорційну тиску.

Існує також зворотний п'єзоелектричний ефект, коли прикладання напруги до матеріалу призведе до зміни форми матеріалу.

Дана статична сила призводить до відповідного заряду на датчику. Однак це з часом просочиться через недосконалу ізоляцію, опір внутрішнього датчика, приєднану електроніку, тощо.

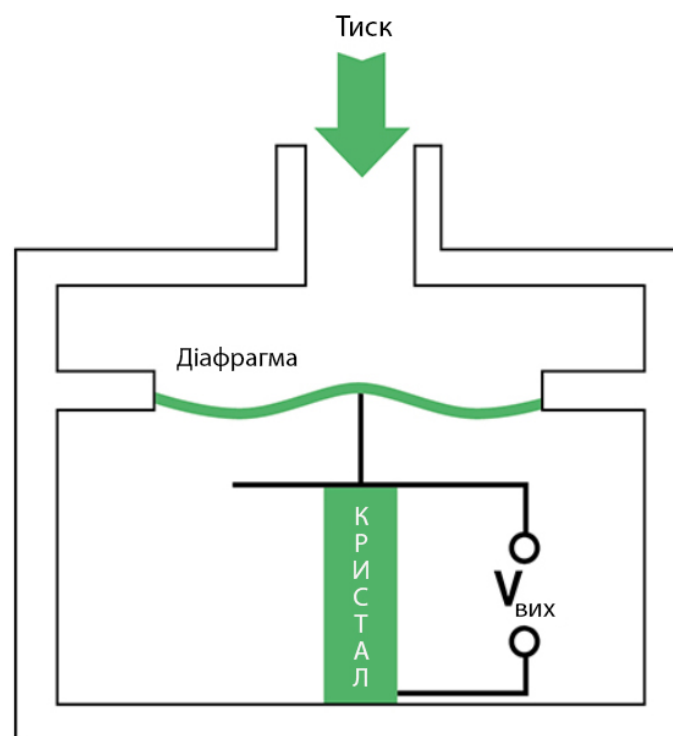


Рисунок 1.2.2.1 – Схема роботи п'єзоелектричного датчика

Як результат, п'єзоелектричні датчики зазвичай не підходять для вимірювання статичного тиску. Вихідний сигнал поступово знизиться до нуля,

навіть за наявності постійного тиску. Однак вони чутливі до динамічних змін тиску в широкому діапазоні частот і тиску.

Ця динамічна чутливість означає, що вони добре вимірюють невеликі зміни тиску, навіть в умовах дуже високого тиску.

На відміну від п'єзорезистивних та ємнісних перетворювачів, п'єзоелектричні сенсори не потребують зовнішньої напруги чи джерела струму. Вони генерують вихідний сигнал безпосередньо від прикладеного зусилля. Вихід з п'єзоелектричного елемента - це заряд, пропорційний тиску. Для зняття вихідного сигналу потрібен підсилювач заряду для перетворення сигналу в напругу. Деякі датчики тиску п'єзоелектричного типу включають внутрішній підсилювач заряду для спрощення електричного інтерфейсу, забезпечуючи вихід напруги. Для цього потрібно подавати живлення на датчик.

Внутрішній підсилювач робить сенсор простішим у використанні. Наприклад, це дозволяє використовувати довгі сигнальні кабелі для підключення до датчика. Підсилювач може також включати схеми кондиціонування сигналу для фільтрації виходу, регулювання температури та компенсації зміни чутливості чутливого елемента[6].

Наявність електронних компонентів, однак, обмежує робочу температуру не набагато більше 120 °С. Для середовищ з більш високою температурою можна використовувати датчик в режимі заряду. Це забезпечує генерований заряд безпосередньо як вихідний сигнал. Тому потрібен зовнішній підсилювач заряду, щоб перетворити це на напругу.

Необхідна обережність при розробці та впровадженні зовнішньої електроніки. Високий вихідний імпеданс датчика означає, що ланцюг чутливий до шуму, спричиненого поганими з'єднаннями, рухом кабелю, електромагнітним та радіочастотним перешкодами[6]. Низькочастотна характеристика датчика визначається часом розряду підсилювача.

П'єзоелектричний ефект потребує матеріалів із специфічною асиметрією в кристалічній структурі. Сюди входять деякі природні кристали, такі як кварц або турмалін. Крім того, спеціально сформульована кераміка може бути створена з

відповідною поляризацією, щоб надати їй п'єзоелектричні властивості. Ці кераміки мають більш високу чутливість, ніж природні кристали. Вихідний сигнал може бути отриманий з деформацією всього в 0,1%.

Оскільки п'єзоелектричні матеріали жорсткі, для отримання вихідного сигналу потрібен дуже невеликий прогин матеріалу. Це робить датчики дуже надійними та толерантними до умов надмірного тиску. Це також означає, що вони швидко реагують на зміни тиску.

На датчик тиску може впливати будь-яка зовнішня сила на п'єзоелектричний елемент, наприклад, сили, викликані прискоренням або шумом. Мікросенсори можна побудувати за допомогою тонких плівок. Оксид цинку був одним з перших використаних матеріалів. Це значною мірою було замінено керамікою, виготовленою з таких матеріалів, як титанат цирконату свинцю через їх більший п'єзоелектричний ефект[6].

П'єзоелектричні матеріали також використовуються в деяких інших типах мікроелектронних датчиків. Наприклад, зворотній п'єзоелектричний ефект використовується для генерації поверхневих акустичних хвиль через діафрагму. Викривлення поверхні під тиском може бути зафіксовано за допомогою змін, які він викликає у хвилях, які приймає інший п'єзоелектричний елемент.

П'єзоелектричні датчики тиску часто вбудовуються в різьбову трубку як показано на рисунку 1.2.2.2, щоб полегшити їх монтаж в обладнанні, де слід контролювати тиск. Необхідно бути обережним при їх установці, оскільки надмірне затягування може вплинути на вихідну чутливість.

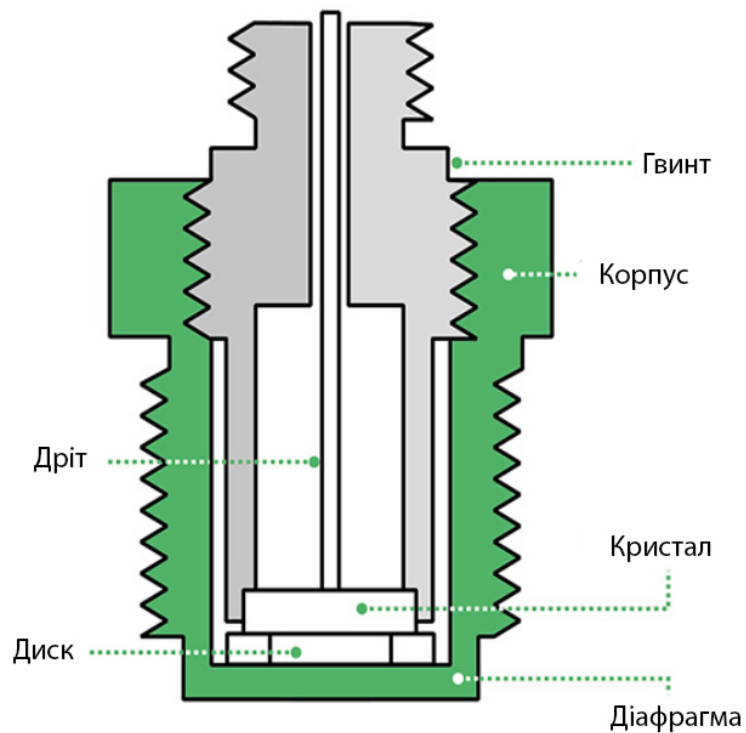


Рисунок 1.2.2.2 – Схема п'єзоелектричного датчика вбудованого у трубку

У деяких випадках п'єзоелектричні датчики можуть піддаватися дії теплового шоку (раптової зміни температури), викликаного випромінювальним теплом або потоком гарячих газів або рідин повз датчик. Це може спричинити зміни на виході через нагрівання кристала, діафрагми або кожуха датчика. Слід зауважити, що це не те саме, що чутливість до статичної температури датчика.

Вплив теплового шоку можна мінімізувати конструкцією корпусу та кріпленням датчика для забезпечення ізоляції.

Вихідний сигнал є лінійним в широкому діапазоні, як правило, від 0,7 КПа до 70 МПа (0,1...10000 фунт / кв.дюйм) з точністю близько 1%. Керамічні датчики з часом втрачають чутливість. Але зазвичай це незначні втрати, менше 1% на рік. Також, можуть бути невеликі втрати чутливості при першому впливі на високий тиск і температуру. Цих ефектів можна уникнути, перемикаючи датчик через максимально очікуваний тиск і температуру перед їх установкою[6-7].

Частотна характеристика п'єзоелектричного датчика спадає на низьких частотах, оскільки згенерований заряд не може утримуватися. На високих частотах спостерігається пік, що відповідає резонансній частоті п'єзоелектричного елемента. Датчик зазвичай використовується в плоскій області кривої як показано на рисунку 1.2.2.3.

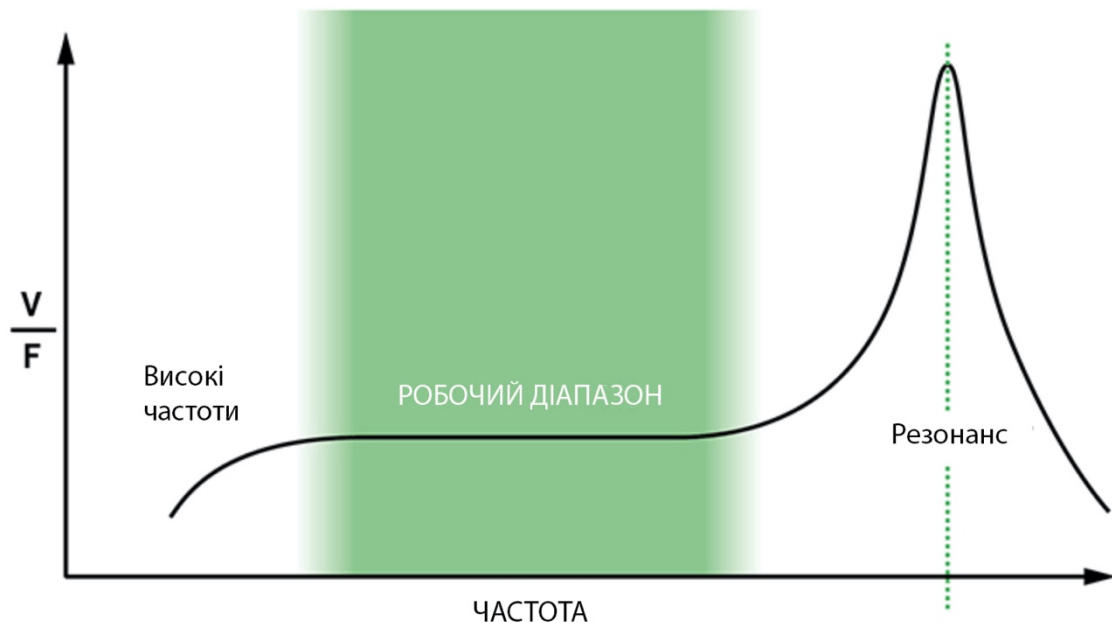


Рисунок 1.2.2.3 – Частотна характеристика п'єзоелектричного датчика

Міцність, висока частота та швидкий час реакції п'єзоелектричних датчиків тиску означає, що їх можна використовувати в широкому діапазоні промислових застосувань, де вони будуть піддаватися впливу високих температур і тиску.

Вони часто використовуються для вимірювання динамічного тиску, наприклад, у турбулентності, вибухах та двигунах. Всі ці ситуації вимагають високої швидкодії, міцності та широкого діапазону експлуатації.

Чутливість і низьке енергоспоживання також робить п'єзоелектричні датчики корисними для деяких медичних застосувань. Наприклад, тонкоплівковий пластиковий датчик можна прикріпити до шкіри та використовувати для моніторингу артеріального пульсу в реальному часі.



Однією з головних переваг п'єзоелектричних датчиків тиску є їх міцність. Це робить їх придатними для використання в різних суворих умовах.

Не беручи до уваги пов'язану електроніку, п'єзоелектричні датчики можуть використовуватися при високих температурах. Деякі матеріали працюватимуть при температурі до 1000 °С. Чутливість може змінюватися в залежності від температури, але це можна звести до мінімуму за допомогою відповідного вибору матеріалів.

Вихідний сигнал генерується самим п'єзоелектричним елементом, тому вони по суті є пристроями малої потужності.

Сам чутливий елемент нечутливий до електромагнітних перешкод та випромінювання. Підсилювач заряду та інша електроніка повинні бути ретельно спроектовані та розміщені якомога ближче до датчика, щоб зменшити шум та інші помилки сигналу. П'єзоелектричні датчики можна легко виготовити, використовуючи недорогі матеріали (наприклад, кварц або турмалін), тому вони можуть забезпечити дешеве рішення для промислового вимірювання тиску.

Основне обмеження п'єзоелектричних датчиків полягає в тому, що їх можна використовувати лише для динамічного вимірювання тиску. Датчики чутливі до вібрації або прискорення, що може бути поширеним у додатках, де вони використовуються. Це можна звести до мінімуму за допомогою додаткового «компенсаційного» датчика, прикріпленого до макету. Вихід з нього використовується для корекції прискорення, яке відчуває датчик.

### 1.2.3. П'єзорезистивні сенсори тиску.

П'єзорезистивні манометри є одними з найпоширеніших типів датчиків тиску. Вони використовують зміну електричного опору матеріалу при розтягуванні для вимірювання тиску.

Ці датчики підходять для різноманітних застосувань через їх простоту та надійність. Вони можуть використовуватися для вимірювання абсолютного, калібрувального, відносного та диференціального тиску, високих і низьких тисків.

Основний принцип п'єзорезистивного датчика тиску полягає у використанні тензодатчика, виготовленого з електропровідного матеріалу, який змінює його електричний опір при його розтягуванні. Тензодатчик може бути прикріплений до діафрагми, яка розпізнає зміну опору при деформації чутливого елемента. Зміна опору перетворюється на вихідний сигнал.

Є три окремі ефекти, які сприяють зміні опору провідника. Це:

- опір провідника пропорційно його довжині, тому розтягування збільшує опір;
- у міру розтягування провідника площа його поперечного перерізу зменшується, що також збільшує опір;
- притаманний опір деяких матеріалів збільшується при його розтягуванні;

Останній із них, п'єзорезистивний ефект, сильно різниться між матеріалами. Чутливість визначається коефіцієнтом калібрування, який визначається як відносна зміна опору, поділена на деформацію:

$$GF = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\epsilon}, \quad (1.2)$$

Де деформація визначається як відносна зміна довжини:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1.3)$$

Чутливі елементи можуть бути виготовлені з металу або напівпровідного матеріалу.

Зміна опору металевих тензодатчиків переважно пов'язана зі зміною геометрії (довжини та площі перерізу) матеріалу. У деяких металах, наприклад платинових сплавах, п'єзорезистивний ефект може підвищити чутливість в два рази і більше.

У напівпровідникових матеріалах домінує п'єзорезистивний ефект, як правило, на порядок більший, ніж внесок з геометрії.

Зміна опору в датчику зазвичай вимірюється за допомогою мостової схеми Уїтстона, як показано на рисунку 1.2.3.1. Це дозволяє перетворити невеликі зміни опору датчика на вихідну напругу[8].

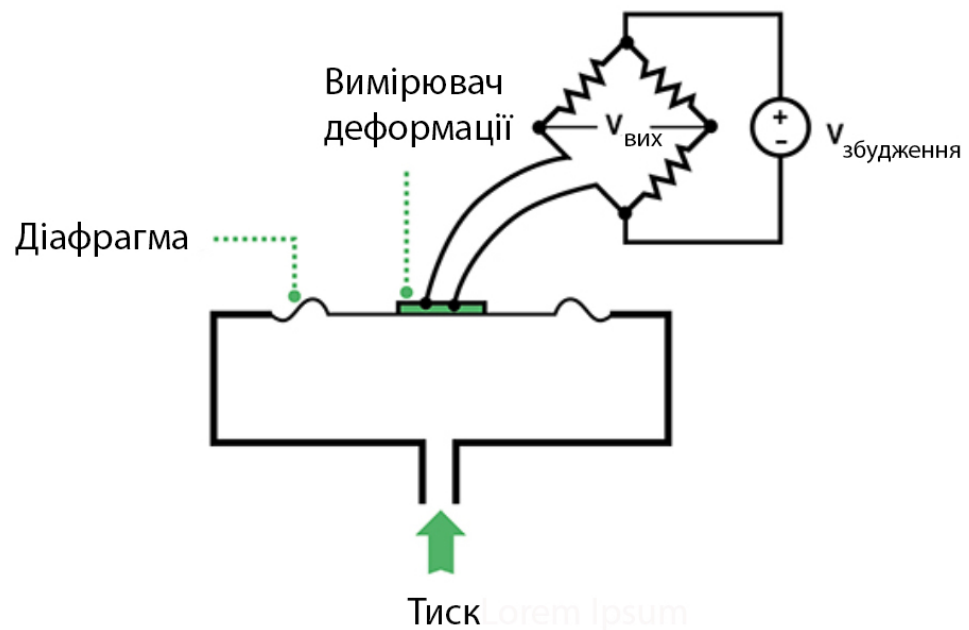


Рисунок 1.2.3.1 – Схема Уїтстона для п'єзорезистивних вимірювань.

На місток потрібно подати напругу збудження. Коли немає напруги і всі резистори в мості збалансовані, то вихід буде нульовим. Зміна тиску призведе до зміни опорів на мосту, що призведе до відповідної вихідної напруги або струму. Як це обчислюється, показано у наступній формулі нижче.

$$V_0 = \left[ \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right] \times V_{зб}, \quad (1.4)$$

де  $R_1, R_2, R_3, R_4$  - номінали резисторів;

$V_{зб}$  – напруга збудження.

Чутливість може бути покращена використанням двох або чотирьох чутливих елементів в мосту, причому елементи кожної пари піддаються рівним і

протилежним деформаціям. Це збільшує вихідний сигнал і дозволяє мінімізувати вплив температури на сенсорні елементи.

Один або кілька датчиків деформації, виготовлені з дроту, можуть бути прикріплені до поверхні діафрагми[8].

Тиск на діафрагму розтягне дроти і тим самим змінить опір. Елементи датчика можуть бути прикріплені до поверхні за допомогою клею або провідник може бути безпосередньо нанесений на діафрагму за допомогою розпилення. Останній метод усуває потенційні проблеми клеїв при високих температурах, а також полегшує конструювання невеликих пристроїв.

Датчик з металевого дроту також може бути виготовлений, обмотавши дріт між стовпами, які зміщуються зі зміною тиску. Ця конструкція також може працювати при більш високих температурах, оскільки для кріплення дроту до стовпів не потрібен клей.

Напівпровідні матеріали, найчастіше кремній, також можуть використовуватися для виготовлення манометрів. Характеристики чутливого елемента, зокрема розмір п'єзореzистивного ефекту, можна регулювати допінгом; іншими словами, додаючи до напівпровідника ретельно контрольовані кількості домішок.

Більш слабо легований кремній призводить до більш високого опору і більшого коефіцієнта калібрування. Однак це також збільшує теплову чутливість як опору, так і коефіцієнта розтягування.

Напівпровідникові датчики можуть бути сконструйовані аналогічно датчикам з металевого дроту, накладаючи на діафрагму чутливі елементи з кремнію. Вони також можуть бути побудовані безпосередньо на поверхні кремнію, використовуючи ті самі методи виготовлення, які використовуються для виготовлення електронних напівпровідникових пристроїв. Це дозволяє дешево виготовляти дуже малі датчики з точно керованими властивостями, такими як чутливість, лінійність та температурний режим. Електронні компоненти також можуть бути виготовлені на тій самій кремнієвій мікросхемі для забезпечення фільтрації сигналу та спрощення електричного інтерфейсу.

Щоб забезпечити максимальну точність, потрібно врахувати кілька факторів, які можуть вплинути на вихідний сигнал. Будь-яка зміна або шуми напруги збудження призведе до відповідної зміни на виході датчика. Необхідно буде переконатися, що ці шуми менші за необхідну точність вимірювання.

Є можливість використання регульованого калібрувального резистора у мостовій схемі, щоб встановити вихідну напругу до нуля, коли немає тиску.

Необхідно тримати опір проводів на датчику невеликим, щоб уникнути зміщення вимірювання та зменшення чутливості. Також, температурний коефіцієнт мідних дротів може бути більшим, ніж у датчика, що може ввести небажану теплочутливість.

Більш довгі дроти також частіше сприймають шуми. Це можна звести до мінімуму, використовуючи кручені пари та екранування.

Використання більш високої напруги збудження збільшує вихідний сигнал датчика та покращує співвідношення сигнал / шум. Однак більший струм може спричинити нагрівання чутливого елемента, що змінить опір і чутливість датчика.

Таке самонагрівання також може впливати на склеювання клею тензометричного датчика з діафрагмою, що може ввести помилки та призвести до погіршення точності з часом. Ефекти самонагрівання можна зменшити, використовуючи чутливий елемент з більш високим опором[8].

Оптимальна напруга живлення - це баланс між мінімізацією самонагрівання та отриманням хорошого сигналу. Визначити це можна експериментальним шляхом. Наприклад, без тиску і нульового виходу датчика можна збільшувати напругу збудження до тих пір, поки вихідний сигнал не зміниться (через самонагрівання). Потім напругу збудження слід зменшувати, поки не зникне похибка вихідного сигналу.

Слід використовувати схему підсилювача, близьку до датчика, щоб мінімізувати довжину з'єднання, посилити вихідний сигнал та покращити співвідношення сигнал / шум. Це також може виконати деяку фільтрацію вихідного сигналу датчика для видалення зовнішнього шуму.

Можна мінімізувати наслідки будь-яких змін напруги збудження, наприклад, падіння напруги, викликаних довгими проводами, контролюючи напругу збудження на датчику або віднімаючи його від вихідного сигналу датчика або використовуючи його як опорну напругу для аналогового цифрового перетворювача.

Типові металеві тензодатчики мають коефіцієнт вимірювання приблизно від 2 до 4. При максимальному напруженні в декілька одиниць на тисячу означає зміну вихідного сигналу близько 1 мВ для кожного вольту збудження.

Датчики на основі кремнію зазвичай легуються, щоб забезпечити коефіцієнт вимірювання приблизно від 100 до 200, що дає хороший компроміс між чутливістю та тепловими характеристиками. Вихідний сигнал від кремнієвого датчика може становити близько 10 мВ / В.

П'єзорезистивні датчики тиску мають перевагу в надійності. Їх продуктивність та калібрування також стабільні з часом.

Одним з недоліків цих датчиків є те, що вони споживають більше енергії, ніж деякі інші типи датчиків тиску. Це означає, що вони не підходять для акумуляторних батарей або портативних систем.

Металеві плівкові чутливі елементи мають перевагу у простоті конструкції та довговічності. Вони також мають більш високу максимальну робочу температуру (приблизно до 200 °С), ніж кремнієві датчики, які обмежені 100 °С.

Кремнієві тензодатчики забезпечують набагато більший вихідний сигнал, завдяки чому вони добре підходять для вимірювань низького тиску, приблизно до 2 кПа.

Мікроелектронні датчики можуть бути набагато меншими, ніж датчики металевого дроту і можуть бути інтегровані з електронікою для обробки сигналів, яка може контролювати нелінійність та залежність від температури.

### 1.3. Висновки

В даному розділі розглянуто у загальному вигляді методи та види вимірюваного тиску, приведена коротка класифікація та принцип роботи датчиків тиску.

Зроблено огляд та порівняльну характеристику найбільш перспективних сенсорів тиску: п'зоелектричного, п'езорезистивного та ємнісного. Ємнісні сенсори, завдяки своєму комплексу характеристик, можливості працювати з високою точністю у агресивних середовищах, а також завдяки конструкції, яка має потенціал до зменшення розмірів з використанням останніх технологій мікроелектроніки, є найбільш придатним для виконання поставленої у меті завдання.

## 2 КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ТИСКУ

Зменшення масогабаритних розмірів датчиків на даному етапі розвитку мікроелектроніки майже не добитись через створення якої небудь інноваційної конструкції. Натомість розвиток мікро- та наносистемної техніки дав поштовх у розробці методів нанесення матеріалів для отримання мінімальної товщини, тим самим давши змогу не тільки зменшити у багато разів існуючі датчики, а й покращити їх властивості.

### 2.1. Конструкція ємнісного сенсору тиску

Основу тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску складає поліімідна плівка, яка має високу механічну міцність та постійні характеристики в широкому температурному діапазоні. Як правило, використовується плівка типу ПМ-1Э або П аналоги товщиною 10...20 мкм. В сенсорах такого типу чутливий елемент 1 (рис. 2.1.1), виготовлений з поліімідної плівки, знаходиться між основою 2 та гнучкою мембраною 3. На поверхні основи та мембрани методом вакуумного напилення нанесені обкладки 4, а навколо них - захисні екрани 5. Елементи конструкції сенсора з'єднуються за допомогою клею 6 та кріпляться на профілі поверхні 7. З'єднувальні електропровідні виводи металізуються. Тонкоплівкові ємнісні сенсори тиску внаслідок великої їх гнучкості можна розміщати на тілах з великою кривизною, в важкодоступних місцях, на тонких профілях.



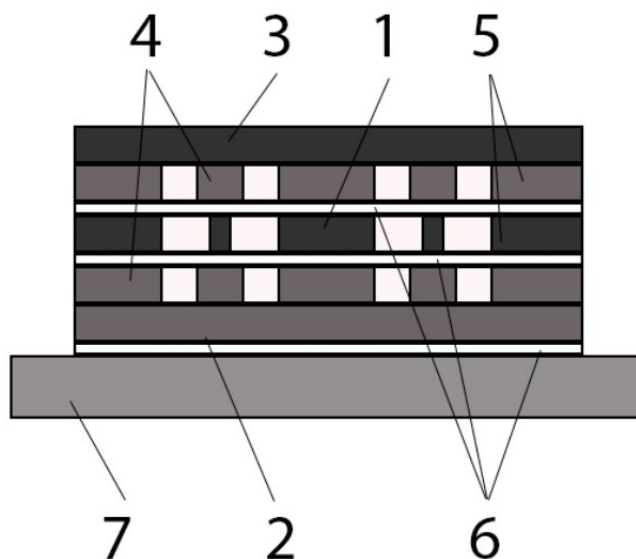


Рисунок 2.1.1 – Схематичне зображення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску: 1 – чутливий елемент, 2 – основа, 3 – мембрана, 4 – обкладки, 5 – захисні екрани, 6 – клей, 7 – профіль поверхні

Стінки перфорованої комірки під дією тиску працюють у режимі пружного стиску. Мембрана сенсора по периферії отвору (комірки) перфорації працює в режимі вигину. Поза межами зони чутливого елемента 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). Ві шорсткості, виступи шарів клею 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[9].

Сумарна відносна зміна ємності такого сенсора дорівнює:

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

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;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона;

n - кількість комірок.

При зміні тиску на величину  $\Delta p$  товщина чутливого елемента під обкладками змінюється на величину  $\Delta l$ , відповідно електрична ємність  $C$  змінюється пропорційно до тиску на величину  $\Delta C$ . При цьому вихідна напруга  $\Delta U$ , що знімається з сенсора, пропорційна до опорної напруги  $\Delta U_{оп}$ :

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

Заряд відповідно дорівнює:

$$Q_{оп} = C U_{оп}, \quad (2.3)$$

$$\Delta Q = \Delta C U_{оп}, \quad (2.4)$$

де  $Q_{оп}$  – опорний заряд.

На рис. 2.1.2 показані два можливі варіанти конструкції тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску: з суцільним та перфорованим діелектриком відповідно.

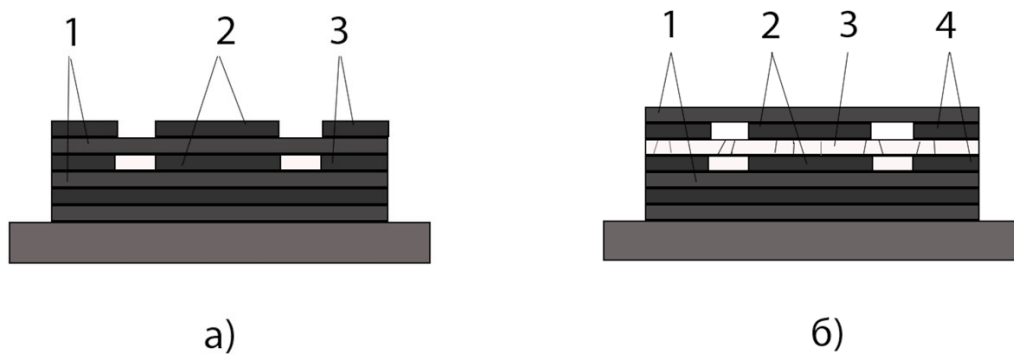


Рисунок 2.1.2 – Варіанти конструкції тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску: а) з суцільним діелектриком; б) з перфорованим діелектриком: 1 – суцільна поліімідна плівка, 2 – електроди, 3 – екрани, 4 – перфорована поліімідна плівка

Електроди виконуються з алюмінію або нікелю, діелектрик - з поліамідної плівки товщиною 12...18 мкм[9]. На рис. 2.1.3 наведена форма електродів тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску.

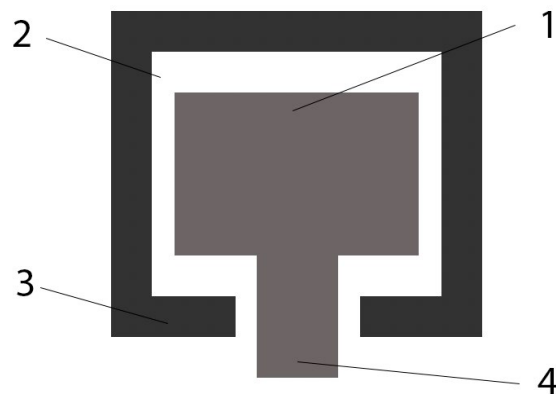


Рисунок 2.1.3 – Електроди тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску: 1 – електрод, 2 – поліімідна плівка, 3 – екран, 4 – вивід

## 2.2. Тонкоплівкова технологія та процес виготовлення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску

З огляду конструктивних особливостей тонкоплівкового ємнісного датчика тиску помітно, що його конструкція не сильно відрізняється від попередників, його принцип роботи залишається незмінним.

Тому, в цьому розділі буде розглянуто технологію виготовлення тонкоплівкового сенсора та саму технологію нанесення тонких плівок, тобто надзвичайно тонких шарів матеріалу, що і забезпечують те саме підвищення ряду важливих характеристик досліджуваного сенсора.

Для виготовлення сенсорів використовується металізована алюмінієм або нікелем поліімідна плівка, на якій методом фотолітографії формується задана конфігурація елементів, або поліімідна плівка товщиною 12...18 мкм, на яку методом випаровування та конденсації в вакуумі наносяться через маску шари металу (алюмінію або нікелю).

Наступним етапом є приварювання виводів до металевих шарів з алюмінію або нікелю які закріплюються зверху спеціальним струмопровідним клеєм. Клей використовується для спрощення та здешевлення процесу виготовлення. Щоб захистити чутливі елементи сенсора від впливу електричних завад використовують металеві екрани з тих самих матеріалів: нікелю або алюмінію.

Крім того, екран датчика можна також виготовити із фольгової поліімідної плівки замість металізованої плівки для зменшення зовнішнього електромагнітного шуму, що важливо для вимірювання низьких рівнів пульсацій тиску. Цей крок також підтримує вимірювання статичного тиску дуже низької частоти (до нуля) практично без залишкової деформації внаслідок дії навантаження.

Основним із етапів виготовлення сенсора якраз є нанесення тонкої поліімідної плівки. Для цього детальніше розглянемо що із себе представляє технологія тонких плівок та які способи використовуються для нанесення надзвичайно тонких шарів матеріалів.

В даний час велика кількість технологій використовуються для зменшення матеріалів до нанорозміру і до нано-товщини, що призводить до появи нових та унікальних форм поведінки таких матеріалів в оптичних, електричних, оптоелектронних, діелектричних застосуваннях. Нова галузь науки матеріалознавства називається тонкоплівковою. Означення технології можна визначити як тонкий шар матеріалу, де товщина варіюється від декількох нанометрів до кількох мікрометрів. Як і всі матеріали, структура тонких плівок поділяється на аморфну та полікристалічну структуру залежно від умов виготовлення, а також від характеру матеріалу. Тонкі плівки складаються з двох частин: шару і підкладки, на яку наносяться сама плівка. Також тонкі плівки можуть складатися з різних шарів, наприклад: тонкоплівкові сонячні батареї, електрохромні комірки, тощо.

До методів фізичного осадження належать:

- термічне осадження;
- катодне розпилення;
- трьохелектродна система розпилення;
- високочастотне розпилення;
- реактивне розпилення;
- магнетронне розпилення;
- молекулярно-променева епітаксія;
- лазерне розпилення.

До методів хімічного осадження належать:

- реактивне катодне розпилення;
- газофазна епітаксія з використанням металоорганічних сполук;
- рідкофазна епітаксія;
- електрохімічне осадження покриттів;
- хімічна металізація.

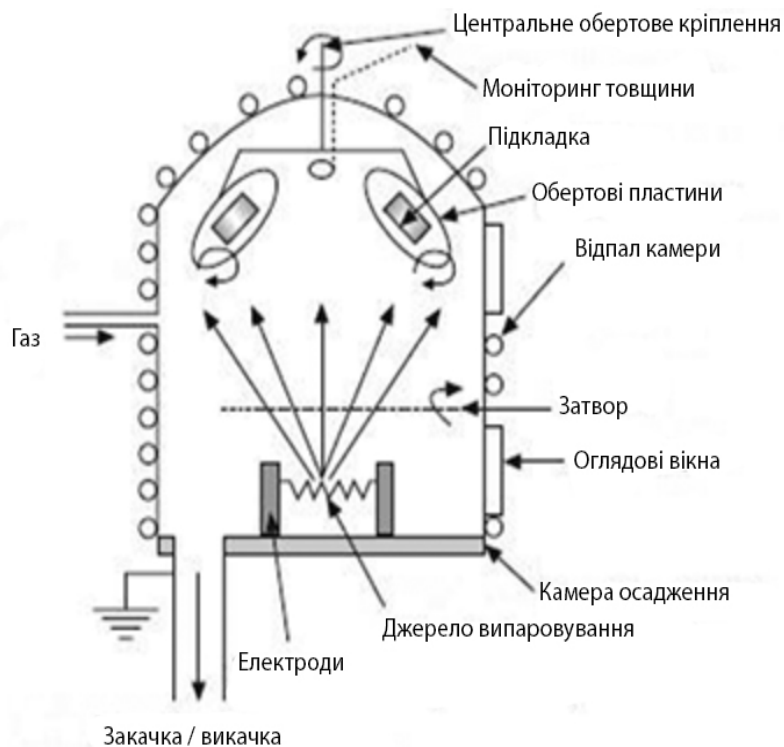
Далі буде більш докладно розглянуто деякі загальні методи нанесення тонких плівок, щоб дати певне розуміння щодо того, як можуть утворюватися тонкі плівки.

Способи випаровування розглядаються як звичайне осадження матеріалів у вигляді тонких плівок. Загальний механізм цих методів заключається у зміні фази матеріалу з твердої фази на парову фазу і перетворення знову в тверду фазу на конкретній підкладці у вакуумі.

### 2.2.1. Термо-вакуумне напилення

Термічне напилення у вакуумі - це найпростіша методика, яка використовується для виготовлення аморфних тонких плівок, особливо плівок халькогенідів, таких як CdSSe , MnS , Ge-Te-Ga, тощо. Як правило, халькогенідні матеріали можуть використовуватися для пристроїв перемикування пам'яті, матеріалів для зміни фази та сонячних панелей.

Техніка термічного напилення сильно залежить від двох параметрів: термічно випаровуваного матеріалу та нанесення різниці потенціалів на підкладку при середньому або більш високому тиску в межах від  $10^{-5}$  до  $10^{-9}$  мбар[10]. Принципова схема термічного випаровування показана на рисунку 2.2.1.1.



### Рисунок 2.2.1.1 - Схема системи термічного випаровування

Металевий або скляний ковпак знаходиться на опорній плиті. Між ними розташована прокладка, що забезпечує підтримання вакууму після відкачки під ковпаком. Підкладка, на яку проводиться напилення, кріпиться на тримачі. До тримача примикає нагрівач (напилення виконується на нагріту підкладку). Випаровувач включає в себе нагрівач та джерело напилюваного матеріалу. Поворотна заслінка перекриває потік пари від випаровувача до підкладки: напилення триває протягом часу, коли заслінка відкрита. Для отримання якісної плівки, температура підкладки повинна знаходитись в певних оптимальних межах (зазвичай 200...400 °С)[10]. Швидкість росту плівок, в залежності від ряду факторів (температура нагрівача, температура підкладки, відстань від випаровувача до підкладки, тип напилюваного матеріалу та ін.) лежить в межах від десятків частин до десятків нанометрів в секунду. Для того, щоб атоми газу, що летять від випаровувача до підкладки, зазнавали мінімальну кількість зіткнень з атомами решти газу і, тим самим, мінімального розсіювання, в подколпачному просторі потрібно забезпечувати досить високий вакуум. Критерієм необхідного вакууму може служити умова, щоб середня довжина вільного пробігу в кілька разів перевищувала відстань між випарником і підкладкою. Головними перевагами розглянутого методу є його простота і можливість отримання виключно чистих плівок (при високому вакуумі).

### 2.2.2. Електронно-променеве напилення

Для формування потоку електронів призначена електронна пушка (рис.2.2.2.1), що складається з вольфрамового термокатодоа і фокусуєчої системи. Емітуючі електрони проходять цю систему, прискорюються за рахунок різниці потенціалів до 10 кВ між катодом і анодом, і формуються в електронний промінь. Відхиляюча система створює магнітне поле, перпендикулярне напрямку руху вилітаючих із котра фокусуєчої системи електронів. Це поле направляє

електронний промінь в центральну частину водоохолоджуваного тигля, причому в місці падіння променя створюється локальна зона розігріву і випаровування речовини з рідкої фази. Потік випаровуваного матеріалу осідає у вигляді тонкої плівки на підкладці, яка зазвичай розташовується на певній відстані над випаровувачем. Змінюючи струм в котушці керуючої системи, що відхиляє електромагніт, можна сканувати променем уздовж тигля, що запобігає утворенню кратеру в випаровуваному матеріалі.



Рисунок 2.2.2.1 – Електронна пушка

В електронній гарматі з поверхні катода відбувається емісія вільних електронів і їх формування під дією прискорюючих і фокусуєчих електростатичних і магнітних полів в пучок, який подається в робочу камеру через вихідний отвір. Для підведення електронного пучка до тиглю з випаровуваним матеріалом і забезпечення його необхідних параметрів використовуються головним чином магнітні фокусуєчі лінзи і відхиляючі системи. Безперешкодне проходження такого пучка до об'єкта можливо тільки в високому вакуумі. Внаслідок бомбардування поверхні електронним пучком, матеріал нагрівається до температури, при якій відбувається його випаровування з необхідною швидкістю. В утворений потік поміщається підкладка, на яку конденсується випаровувана речовина. Випаровуючий пристрій доповнюється засобами вимірювання і контролю, які особливо важливі для управління електронним пучком в процесі напилення[11].



У найпростішому випадку електронний пучок направляється на випаровуваний матеріал прямо зверху або під нахилом до поверхні. Для фокусування пучка і отримання на поверхні матеріалу необхідної питомої потужності використовуються довгофокусні генератори електронних пучків. Істотні недоліки такого розташування - можливість утворення плівки на деталях електронно-оптичної системи, що призводить до зміни параметрів електронного променя, і обмеження корисної площі для розміщення підкладки через затінення частини технологічної камери гарматою. Зазначених недоліків можна уникнути, розміщуючи гармату горизонтально, а відхилення електронного пучка на випаровуваний матеріал здійснювати за допомогою систем, що забезпечують поворот пучка на кут до  $270^\circ$ .

Як правило, електронно-променеви випаровувач (рис. 2.2.2.2) складається з трьох основних частин: електронної гармати, відхиляючої системи і водоохолодженого тигля різної ємності. Це забезпечує безперервну роботу без додавання матеріалу, який випаровується, який, крім того, в розплавленому стані не контактує з мідними стінками тигля. У загальному випадку можливе використання сформованого за розміром тигля матеріалу (безтигельне випаровування) або застосування спільно зі спеціальними тиглями порошкового матеріалу[11].

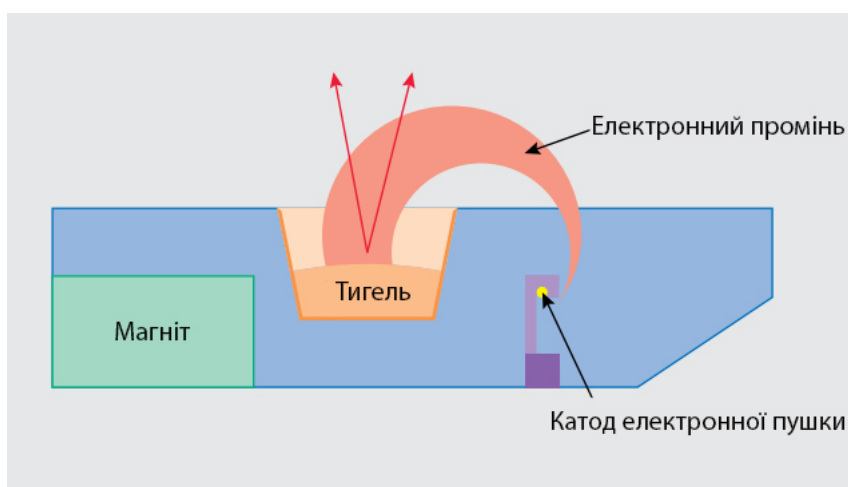


Рисунок 2.2.2.2 – Схема електронно-променевого випаровувача

У виробництві широко використовуються електроннопроменеві випаровувачі, що дають можливість отримання тонких плівок металів, сплавів і діелектриків. Хороше фокусування електронного пучка дає змогу отримувати більшу концентрацію потужності (до  $5 \cdot 10^8$  Вт / см<sup>2</sup>) і високу температуру, забезпечуючи можливість випаровування з великою швидкістю навіть найбільш тугоплавких матеріалів. Швидке переміщення нагрітої зони в результаті відхилення потоку електронів, регулювання і контроль потужності нагріву і швидкості осадження створюють передумови для автоматичного управління процесом. У методі ефективно реалізується автотигельне випаровування матеріалу, тому він забезпечує високу чистоту і однорідність напилення.

### 2.2.3. Імпульсне лазерне осадження

Імпульсно-лазерне осадження - інша техніка фізичного осадження для нанесення тонкоплівкового шару покриття. Під час процесу осадження тонкої плівки лазерний промінь використовується для нанесення матеріалу для осадження тонких плівок всередині вакуумної камери, як показано на малюнку 2.2.3.1.

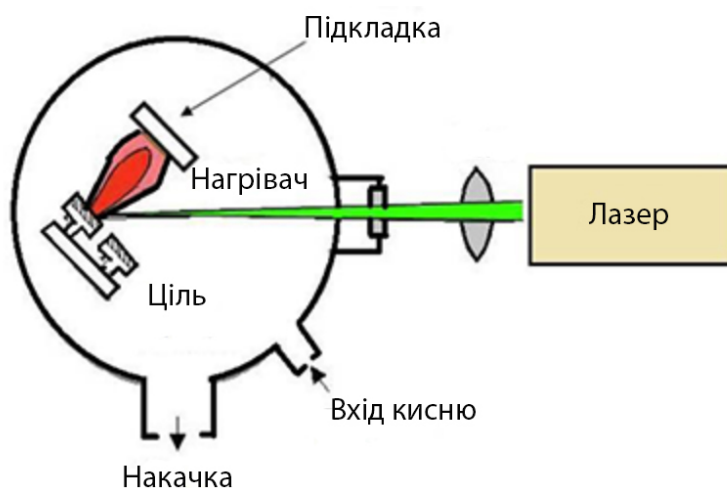


Рисунок 2.2.3.1 – Схема установки для імпульсного лазерного напилення

Для даного методу використовуються різні види лазерних джерел. Найпоширенішими лазерами є Nd-YAG, KrF (248 нм) та XeCl (308 нм). Коли

лазерний промінь вражає цільовий матеріал, він створює шлейф, який може осідати на різних підкладках. Створений шлейф може містити нейтронні, звичайні атоми та іонізовані частинки[12]. Що стосується тонких плівок оксиду металів, для осадження оксидів металів використовується кисень. Якість плівки залежить від різних параметрів, таких як довжина хвилі лазера, енергія, атмосферний тиск, тривалість імпульсу та відстань цілі до підкладки. Даний метод має деякі переваги перед іншими системами фізичного осадження через швидкий час осадження та сумісність з киснем та іншими інертними газами[12].

#### 2.2.4. Золь-гелевий метод

Хоча виробництво тонких плівок фізичними методами, як описано раніше, дає хорошу якість та функціональні властивості, воно є дуже дорогим і вимагає великої кількості цільового матеріалу. Оскільки є необхідність виготовлення високоякісних тонких плівок із низькою економічною вартістю, методи хімічного осадження широко застосовуються у всьому світі. Ці методи дозволяють виробляти дешеві тонкі плівки. Більшість із них не потребує дорогого обладнання. Хімічне осадження сильно залежить від хімії розчинів, значення рН, в'язкості тощо. Найбільш поширене хімічне осадження було отримано золь-гелевим способом, хімічним осадженням у ванні, електроосадженням, хімічним осадженням пари та методом розпилювального піролізу. Цей розділ стосується лише методів осадження оль-гелів та хімічних ванн, оскільки вони можуть утворювати хорошу якість плівки з низькими вимогами до обладнання.

Золь - це дисперсія твердих частинок у рідині, де лише броунівський рух впливає на частинки. Суспензія частинок лінійного розміру між 1нм та 1 мкм називаються колоїдами, які утворюються гідролізом і поліконденсацією реакції алкоксидів металів, таких як оксиди Si та Ti. Ці оксиди Si та Ti називають попередниками. Попередник - це сполука, яка бере участь у хімічній реакції для отримання іншого з'єднання. Численні металеві попередники, в тому числі алкоксиди, карбоксилати, дикетонати та різні органічні солеві розчини

використовуються для формування металевих комплексних сполук, але з комерційної точки зору, алкоксиди більшості металів можуть бути синтезованими та є зручними вихідними матеріалами завдяки розповсюдженості та вартості.

Гель - це стан, коли і рідина, і тверда речовина знаходяться в дисперсії між собою, який представляє собою міцне з'єднання, що містить рідкі компоненти. Гель - пориста дерево-подібна пов'язана між собою напівтверда сполука, яка стабільно розширюється протягом усього рідкого середовища і обмежується розміром ємності в якій знаходиться. Гель вважають колоїдним розчином, якщо тверда сполука готується з використанням колоїдних золевих частинок. Рідина присутня між сіткою твердої сполуки, з якої складається гель не витікає спонтанно і знаходиться в термодинамічній рівновазі з твердим тілом сполуки[13]. Метод золь-гелю складається з чотирьох наступних етапів:

1. Необхідні колоїдні частинки одночасно дисперсуються в рідині з утворенням золю.
2. Осадження розчину золю утворює покриття на підкладках шляхом розпилення або спринцювання або обертання. Частинки в золі полімеризуються через видалення загальнозміцнюючих компонентів і утворюється гель в стані нерозривної сполуки.
3. Кінцеві термічні обробки піролізують решту органічного або неорганічного компоненти і утворюють аморфний шар, який може перетворюватися на кристалічний методом відпалу.

Тонкі плівки з золя можна осаджувати наступними методами:

- покриття зануренням;
- покриття обертанням;
- обприскування.

Тонкі плівки готують шляхом нанесення розчинів-попередників на різні підкладки. Аморфні гелеві плівки піролізуються при відносно низьких температурах (300 °C...700 °C) з утворенням аморфних або кристалічних оксидів з подальшим відпалом при відносно високій температурі для забезпечення кристалізації[14].

## 2.2.5. Покриття зануренням

Техніка занурення застосовується для виготовлення прозорих шарів оксидів на прозорій підкладці з високим ступенем планарності та якості поверхні. Також можна використовувати інші підкладки. Можна чітко визначити товщину плівки до 1 мкм. Можна накладати кілька шарів.

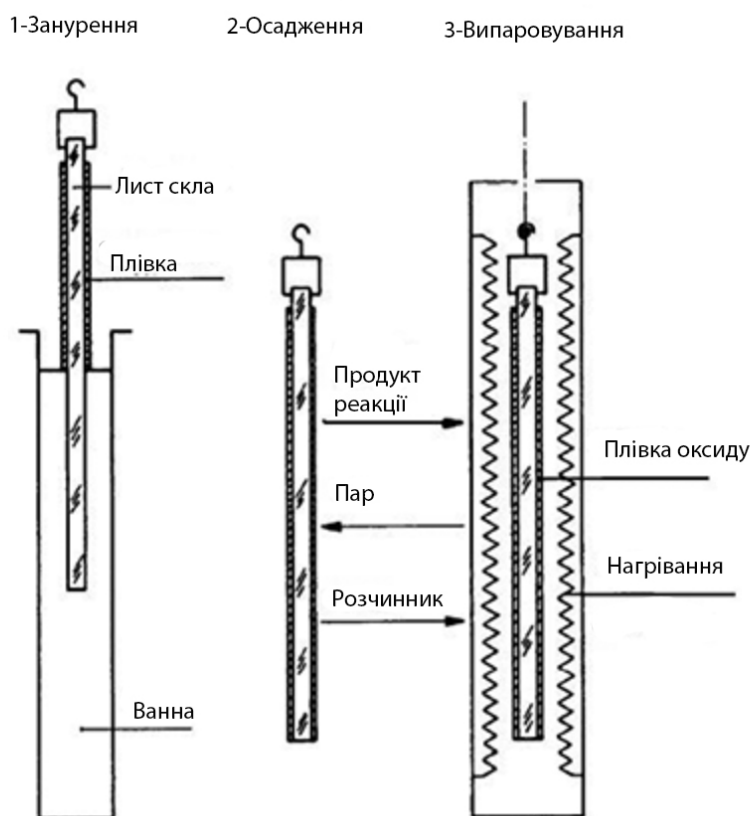


Рисунок 2.2.5.1 – Схема нанесення тонких плівок методом занурення

Скривен описав процес нанесення покриття зануренням на п'ять етапів: занурення, запуск реакції, осадження, дренаж та випаровування[15]. Отже, випаровування зазвичай супроводжує етапи пуску, осадження та осушення, як показано на рисунку 2.2.5.1.

### 2.2.7. Метод хімічного осадження у ванні

Метод хімічного осадження у ванні також відомий як техніка росту розчину або контрольованого осадження. Це найдавніший спосіб нанесення плівок на підкладку. Техніка росту розчинів в основному використовується для приготування плівок халькогенідів, а також плівок оксиду металу. Також осадження можна проводити при більш низьких температурах [16]. У даному способі росту затравний розчин іонів металів повинен бути насичений лігандами. Комплексний розчин одержують з розчином аміаку, триетаноламіну, етилендіамін-тетраоцтової кислоти, лимонної кислоти, тощо. Коли насичення закінчено, має відбуватися додавання аніонів. Ці аніони походять із розчинів тіомочевини, тіоацетаміду, тіосульфату та натрію, сульфід натрію як джерела аніонів сірки або селенуреї та селеносальфату натрію для аніонів селену для депонування халькогенідів. Підкладку кладуть у вертикальне, або горизонтальне положення всередині розчину і залишають до отримання бажаної товщини плівки. Осадження оксидних плівок зовсім інше, ніж халькогенідів. Після здійснення насичення, контролюючи значення рН, підкладку занурюють у розчин при бажаній температурі, що змінюється в межах 60...100 °С для осадження, в більшості випадків, плівок гідроксиду металу. Потім плівка гідроксиду може бути передана оксиду методом відпалу. На малюнку 2.2.7.1 представлений простий спосіб осадження хімічної ванни. Існує багато оглядів та літератури, де описано осадження хімічної ванни як для плівок халькогеніду, так і для оксидів [17].

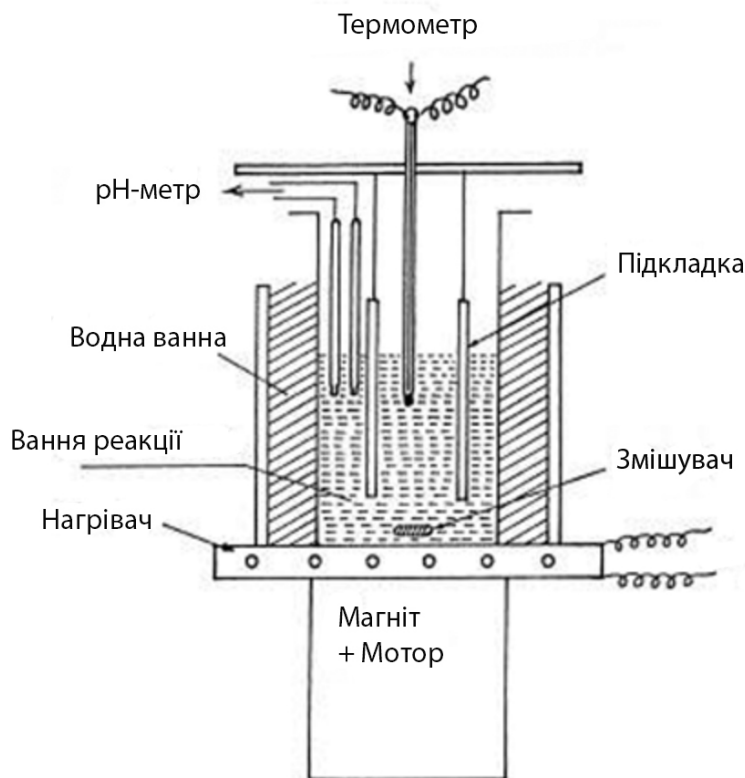


Рисунок 2.2.7.1 – Схема нанесення плівок методом занурення у хімічній ванні.

### 2.3. Технологія виготовлення тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску з використанням поліімідних плівок

Розглянувши що собою являє технологія тонких плівок, потрібно детальніше зупинитися на тому, з яких матеріалів складається обраний сенсор. Якщо з металами все зрозуміло, то далі буде більш широко розглянуто поліімідні плівки, які особливості має цей матеріал та чому використовується у ємнісних сенсорах тиску.

Каптон або поліімідна - приклад ізолюючого полімеру, який можна лазерно-карбонізувати, утворюючи провідні нитки. Ця підкладка гнучка, недорога, довговічна і проста у виготовленні. Хоча поліімід Каптона є хорошим ізолятором, дослідження показали, що лазерно-карбонізовані нитки є провідниками. Додаткові можливості для підвищення ефективності деяких конструкцій сенсорів полягають

у тому, що карбонізовані нитки є пористими та їх питомим опором можна легко керувати під час обробки[18].

Послідовність виготовлення ємнісного датчика тиску проілюстрована на рисунку 2.2.8.1. Процес починається з квадратних підкладок з нержавіючої сталі, які розташовані на кожній стороні по 5,7 см, товщиною 0,5 мм і мають шорсткість поверхні приблизно 6–8 мкм. Через підкладку з нержавіючої сталі робиться масив впускних отворів  $8 \times 8$  діаметром 2 мм з відстані від центру до центру 5 мм. Поліімідна плівка Каптона (Dupont, Kapton HN200, товщиною 50 мкм) ламінується на підкладку з нержавіючої сталі за допомогою гарячого преса з тиском 8,65 МПа і температурою 175 °С протягом 30 хв.

Діафрагми, чутливі до тиску, будуть поліімідною плівкою Каптона в областях, підвішених над отворами для впускання тиску (мал. 9а). Потрійний металевий шар Ti / Cu / Ti товщиною 100/2000/500 Å осаджується електронно-променевим випаровуванням, а потім наноситься, за допомогою процесу видалення для створення нижніх електродів, гальванічних шарів та приклеювання площадок на поверхню поліімідної плівки Каптона. Кілька шарів поліімиду PI2611 (Дюпон) накручують на візерунковий шар зі швидкістю обертання 1200 об / хв протягом 60 с і твердіють у суцільний N<sub>2</sub> шар при 200 °С протягом 120 хв, отримуючи остаточну товщину поліімиду приблизно 44...48 мкм. Поліімідний шар анізотропно протравлюють за допомогою реактивного іонного травлення для створення форм для гальванічного покриття для опорних стовпів нерухомих заготовок та для видалення верхнього титанового шару затравного шару. Нікелеві опори потім гальванізують через поліімідні форми. Металевий потрійний шар Ti / Cu / Ti товщиною 300/2000/300 Å наноситься за допомогою напилення постійним струмом, щоб діяти як затравний шар для осадження основи. Товстий фоторезист (ShIPLEY SJR 5740) розкручується на затравному шарі зі швидкістю 1100 об / хв протягом 30 с (даючи остаточну товщину приблизно 15 мкм) і структурується, щоб діяти в якості гальванічних форм для пластин. Після видалення верхнього шару Ti нікель гальванізується через товсті фоторезистові гальванічні форми для створення задніх пластин. Видаляються товсті фоторезистові форми для гальванічного



покриття та шар, що залишився. Нарешті, поліімідні форми для опорних стовпців, а також поліімідні жертвенні шари ізотропно протравлюються, щоб створити повітряні зазори між нерухомими пластинами та гнучкими діафрагмами з поліімиду. Ізотропне сухе травлення проводиться в баррель-плазмовому травнику з використанням плазми  $CF_4 / O_2$  з потужністю ВЧ 120 Вт. Рис. 2.3.1 ілюструє фотографії виготовленого масиву датчиків тиску, де (б) показаний вид збоку і (в) вид крупним планом зазору, визначеного між нерухомою задньою панеллю та діафрагмою. Зауважимо, що ці датчики працюють у диференційованому режимі, при цьому сторона, що містить задню панель, утримується під тиском 1 атм[19].

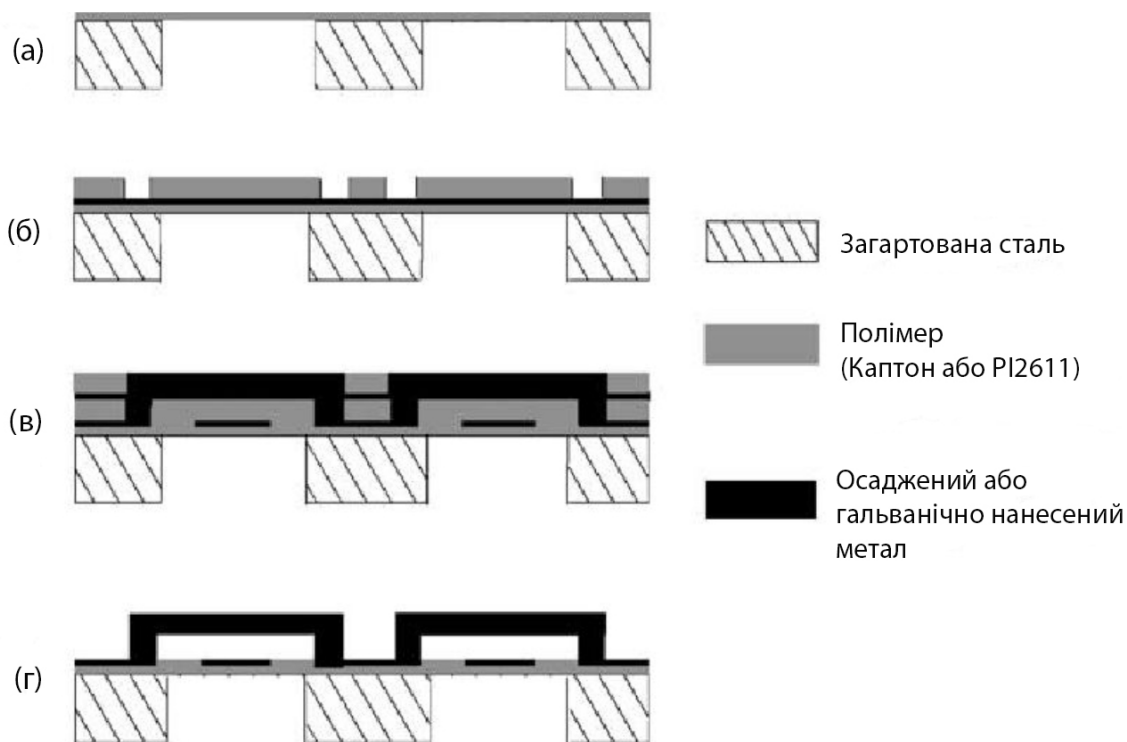


Рисунок 2.3.1 - Послідовність виготовлення датчика тиску на основі мембрани з поліімідної плівки(пояснення в тексті)

Поліімідни мають відмінну термостабільність, стійкість до розчинників, радіаційну стійкість, зносостійкість, гідролітичну стабільність, низьку діелектричну сталу, високі механічні властивості, хорошу хімічну стійкість.

Завдяки цим чудовим властивостям поле застосування полііміду, як правило, було збільшено від друкованих плат та електроізоляційних шарів в мікроелектроніці до функціональних шарів датчиків вологості, захисних шарів для сенсорних поверхонь та нових платформ для теплових сенсорних пристроїв, масивів датчиків температури, мікро-нагрівальні елементи, інтегровані в газові датчики та біосенсори.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБРАНОГО ДАТЧИКА ТА АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТАКОГО СЕНСОРА

#### 3.1. Переваги та основні особливості тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску

Розглянутий тонкоплівковий варіант ємнісного датчика тиску має свої переваги і недоліки. У цьому розділі буде зосереджено увагу на головних перевагах тонкоплівкового ємнісного сенсора та яким чином досягнуто ці переваги. Також у розділі буде представлено варіанти використання та обґрунтування використання даного типу датчика у придатних областях та сферах діяльності.

Перед тим як розглядати метрологічні та фізичні особливості тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску, потрібно згадати конструкцію датчика. Вона являється дуже важливою особливістю і перевагою перед іншими датчиками. Ємнісні сенсори мають дуже просту та ефективну конструкцію. Чутливий елемент розташовується між мембраною та основою. На поверхні основи та мембрани наносяться обкладки, а поверх обкладок наносяться захисні екрани. Із такої конструкції датчика випливає ціла низка переваг.

Така конструкція здешевлює технологію виробництва, адже не потрібно утворювати складні за формою малюнки на підкладці. Весь процес зводиться до покрокового нанесення шарів матеріалу простої форми – прямокутної або круглої. Крім того елементи конструкції з'єднуються за допомогою клею та, за допомогою нього, кріпляться на поверхні профілю. Схематично конструкцію даного датчика показано на рис. 3.1.

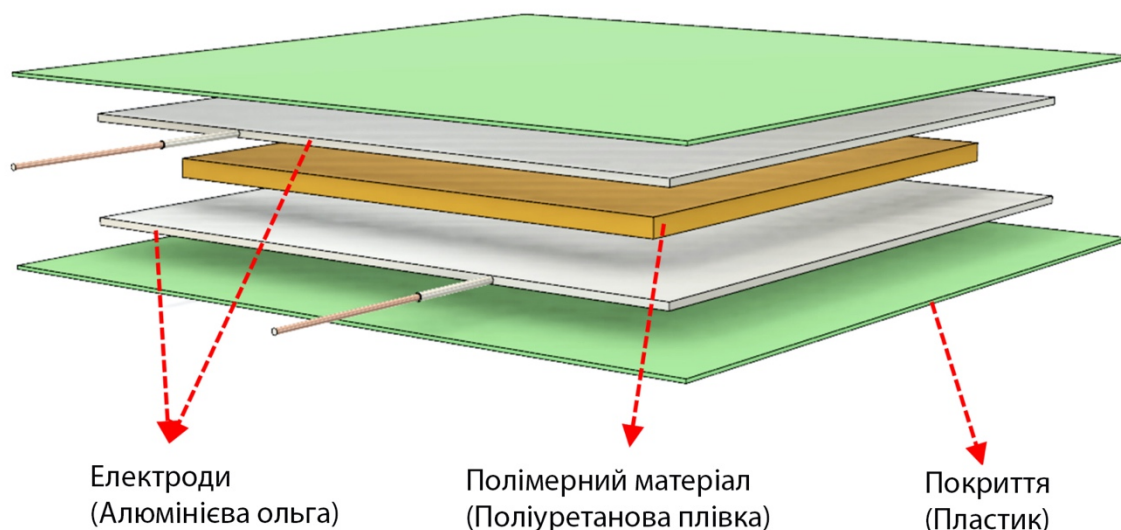


Рис. 3.1. Конструкція тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску

Отриманий прилад має високу надійність. Залежно від використаних матеріалів таку конструкцію можна підігнати під різного роду застосування. Наприклад, зробити її гнучкою, використавши у якості чутливого елемента полімерну плівку, або кераміку і поліамідні плівки в якості обкладок для високотемпературних застосувань. Така конструкція також дозволяє розміщати датчик на кривих поверхнях із застосуванням клею і забезпечує толерантність до вібрацій короткочасного надлишкового тиску використанням чутливого елемента між мембраною та підкладкою.

Ємнісні сенсори тиску можуть мати дуже низьке енергоспоживання і низьку потужність, оскільки через елемент датчика немає постійного струму. Струм тече лише тоді, коли сигнал проходить через ланцюг для вимірювання ємності. Пасивні пристрої можуть взагалі не потребувати джерела живлення. Пасивні датчики, де зовнішній зчитувач подає сигнал до ланцюга, не потребують джерела живлення - ці атрибути роблять їх ідеальними для додатків малої потужності, таких як віддалені або розумні датчики. Оскільки вони наслідують пристрої змінного струму, ємнісні датчики підходять для бездротового використання. Вони можуть бути використані в ланцюзі генераторів для генерації сигналу з частотою пропорційною тиску, який можна приймати бездротовим шляхом. Альтернативно,

зчитувач може використовувати індуктивний зв'язок для вимірювання зміни резонансної частоти.

Звісно, плівковий ємнісний сенсор має і деякі недоліки. Одним з таких, є нелінійність, що проявляється, оскільки вихід обернено пропорційний зазору між паралельними електродами. Це можна покращити за допомогою датчика в сенсорному режимі, коли діафрагма контактує з ізоляційним шаром на нижньому електроді. Однак це може знизити чутливість і посилити гістерезис. Цю особливість потрібно враховувати при проектуванні сенсора під певне застосування[20].

У попередньому розділі було розглянуто технологію нанесення надзвичайно тонких шарів матеріалу – технологію тонких плівок. Її використання дозволяє отримати товщину плівки менше 2.5 мкм. Ця технологія знайшла широке застосування у датчиках тиску і дала змогу зменшити у їх розміри у багато разів. Повністю сформований тонкоплівковий ємнісний датчик тиску з урахуванням підбраної товщини матеріалів для різних застосувань може мати товщину від 50 до 90 мкм.

Таке зменшення розмірів вплинуло не лише на сфери застосування пристрою. Обраний тип сенсора тиску отримав поліпшення своїх фізико-механічних та електрофізичних властивостей. Особливо важливим покращенням є збільшення чутливості досліджуваного сенсору. Оскільки ємнісний сенсор базується на вимірюванні ємності між двома обкладками, зменшення товщини рухомої діафрагми дає їй змогу реєструвати дуже зміни тиску. Разом з цим, значною мірою підвищується точність та швидкодія датчика. Таким чином, даний тип датчиків може бути використаний для вимірювання широкого діапазон тиску від вакууму (2.5 мБар або 250 Па) до високого тиску приблизно 10000 фунтів на дюйм (70 МПа) і тим самим стає ідеальним варіантом як для застосувань низького тиску, так для досить агресивних умов високого і надвисокого тисків[20].

Спектр матеріалів використовуваних у тонкоплівкових ємнісних сенсорах досить широкий. Використання того чи іншого матеріалу зумовлено його як перевагами і недоліками, так і сферою застосування готового приладу.

У даній роботі було приділено увагу поліамідним плівкам. Цей тип плівок має відмінну термостабільність, стійкість до розчинників, радіаційну стійкість, зносостійкість, гідролітичну стабільність, низьку діелектричну сталу, високі механічні властивості, хорошу хімічну стійкість. Цей комплекс характеристик позитивно вплинув на можливість тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску працювати у агресивних середовищах, наприклад високотемпературних або радіаційних.

Також, важливим буде зазначити, що за останні роки технологія нанесення тонкоплівкових матеріалів значно продвинулась. Розроблені багато способів нанесення тонких плівок, серед яких: електронно-променеве напилювання, іонно-плазмове напилювання, вакуумне термічне випаровування, реактивне катодне розпилення та інші. Наявність такої кількості методів дала змогу не лише отримати якомога меншу товщину, а здешевити виробництво тонкоплівкових приладів, і тим самим розширити сфери використання готової продукції.

Тонкоплівковий ємнісний сенсор тиску на базі поліамідних плівкових структур на даний момент являється одним із найперспективніших приладів для вимірювання широкого діапазону тисків через баланс отриманих характеристик та дешевій технології виготовлення. Для типових тонкоплівкових ємнісних сенсорів характерні такі основні параметри:

- товщина мембрани, мкм : 12...18;
- розміри чутливих елементів мм: 4...9;
- діаметр перфорації мм: 0,6...0,8;
- коефіцієнт перетворення чутливого елемента:  $3 \cdot 10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-8}$ ;
- межі вимірювання пульсації тиску, Па: 10...8000;
- робочий діапазон температури, °C : 0...150;
- товщина сенсора, мкм : 70...80;
- ємність сенсора, ПФ: 15...40;
- похибка вимірювання, %: 1,0;
- діаметр комірки, мм: 4...5;
- температурний коефіцієнт нестабільності вихідного сигналу,  $1 / ^\circ\text{C}$ :  $10^{-3}$ .

### 3.2. Сфери та перспективність використання обраного сенсора.

Завдяки комплексу характеристик ємнісного сенсора тиску, покращених з використанням технологій одержання тонких плівок, датчик має високий потенціал використання в галузях виробництва, методах контролю й автоматизації, автомобільній галузі, авіа- та космічній галузях, а також в медицині.

Отриманий датчик може витіснити п'єзоелектричні та п'єзорезистивні аналоги завдяки своїй простоті та малим розмірам.

Перш за все, отриманий датчик є невід'ємною частиною побутової електроніки, яка з кожним роком все більше збільшує свою технологічність та прямує у напрямку зменшення розмірів. Мікрофони в мобільних телефон в останні роки були основані на ємнісних сенсорах, а покращення цих сенсорів в плані мініатюризації та співвідношення продуктивність / ціна лише збільшило популярність плівкових сенсорів на ринку мобільної електроніки. Національна лабораторія Sandia повідомила про розробки подвійного конденсаторного мікрофону виготовленого з ультрапланарною багаторівневою технологією мікроелектроніки. Крім того, з популяризацією переносної електроніки (смартфони, розумні годинники та інше), плівкові сенсори ще більше закріпилися на цьому ринку. Як один з основних компонентів, гнучкий переносний сенсор тиску має бути легким, портативним, мати гарні електричні характеристики та високий ступінь інтеграції. Всі ці вимоги повною мірою задовольняє тонкоплівковий ємнісний сенсор тиску.

В автомобільній та авіаційній галузях тонкоплівкові ємнісні сенсори тиску використовуються не лише як датчики тиску масла в двигуні, палива або тиску у покриттях. Розглянуті датчики знайшли свою нішу у аеродинаміці.

Проблема вивчення особливостей обтікання моделей (визначення зон відриву, скачків ущільнення, перехід ламінарного граничного шару у турбулентний) завжди являється актуальною в експериментальній аеродинаміці. В останні роки активно ведуться експерименти з використанням тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску, які уже спробували у використанні в аеродинамічних

експериментах для вивчення нестационарних процесів. Їх використання базується на їх можливості вимірювати у широкому діапазоні частот пульсацій тиску, рівні яких значною мірою відрізняються в безвідривній та відривній зоні, до скачка ущільнення і після, ламінарному граничному шарі і турбулентності.

Основною перевагою використання таких тонкоплівкових датчиків в аеродинамічних дослідженнях – їх порівняно нескладний монтаж на експериментальну, і в тому числі на поверхню натурального літального апарату за допомогою клею, можливість автоматизації процесу зчитування показників вимірювань і виводу їх на комп'ютерну техніку, відсутність спотворення картини обтікання (виміряне розподілення статичного тиску на вихідній моделі і після обклеювання її плівкою з вмонтованими плівковими датчиками було однаковим)[21].

Тонкоплівкові ємнісні сенсори є надзвичайно перспективними у сфері аеродинамічних випробувань як в автомобільній, так і авіаційній галузях, стандарти та умови проведення експерименту яких схожі. Це пов'язано з їх плоскою конструкцією та можливістю монтажу на криві поверхні. До числа труднощів виявлених в результаті використання тонкоплівкових сенсорів в аеродинамічних застосуваннях, слідє віднести недостатню захищеність датчиків від впливу потоку газу у випадку їх неякісного наклеювання (наявність повітряних пустот в клеєвих шарах); особливо гостро ця проблема встає при обклеюванні поверхонь з високими просторовими зазорами. Проте ця проблема не є критичною, оскільки можна використовувати плівкові датчики на основі більш гнучких полімерних матеріалів та клею з більшою надійністю.

Окрім того, такі датчики використовуються ще й для контролю втомленості та довговічності конструкції або матеріалу. Було доведено, що датчики на основі тонких металевих плівок є чутливими до числа циклів перевантажень матеріалу. Щільність мікросмужок корелюється з досягнутим рівнем втомлюваності. Для обраного матеріалу, його товщини та рівня навантаження є можливість визначити число циклів навантаження, прикладеного до нього, а також оцінити залишковий час служби конструкції[22].



Плівкові ємнісні сенсори, завдяки своїй мініатюризації та характеристикам, мають високий потенціал використання у сфері медицини. Раніше ємнісні сенсори використовувалися для вимірювання кров'яного артеріального тиску у рослої худоби (корів або коней). З розвитком мікроелектроніки, наразі є можливість впроваджувати дуже малі ємнісні сенсори на базі тонких плівок для артеріального тиску людини, внутрішнього загального тиску, внутрішньочерепного тиску.

В даний час найбільш поширені захворювання судин викликані закупоркою судин, наприклад – коронарна хвороба серця. У сучасній медицині, артерографія є звичайним способом діагностики для діагностування ішемічних хвороб серця та гіпертонії. Тому, мініатюрні датчики тиску можна було б використовувати з імплантованими медичними катеторами у судини з підозрою на ураження для проведення внутрішніх операцій або для довготривалого моніторингу тиску. Тонкі судини та складні настінні ураження ставлять високі вимоги до розмірів датчика. Зокрема, датчики були обмежені як по довжині, так і по товщині відповідно до характеристик довгих та тонких кров'яних судин. Уже були проведені експерименти з розробки датчиків тиску для медичних застосувань[23].

Був розроблений ультра-малий ємнісний сенсор тиску (рис. 3.2.1) з відстанню між електродами в 3 мкм. Крайова область датчика товщиною 12 мкм отримувалася за допомогою глибокого легування бором. Потім, менша дифузія бору була використана для отримання діафрагми товщиною 1.5 мкм. Потім був нанесений діелектрик з малюнком для забезпечення необхідного захисту. Кремнієві пластини були прикріплені до пластини з боросилікатного скла Corning 7740 з нанесеним металевим малюнком. Нарешті, пристрій був занурений у анізотропний травник кремнію в якому було частково розчинено кремній і залишено лише леговану бором частину. Розмір діафрагми становив 290 x 550 x 1,5 мкм. Весь пристрій можна було встановити в 0,5 мм діаметром катетер, який підходив для вимірювання мульти-точкового тиску з коронарної артерії серця. Пізніше, експеримент було повторено і отримано ще менший розмір мікросхема, який становив 350 x 100 x 1,4 мкм. На відміну від герметизації при атмосферному тиску, прилад,

сформований у вакуумі, стає захищеним від газового демпфування та покращує чутливість.

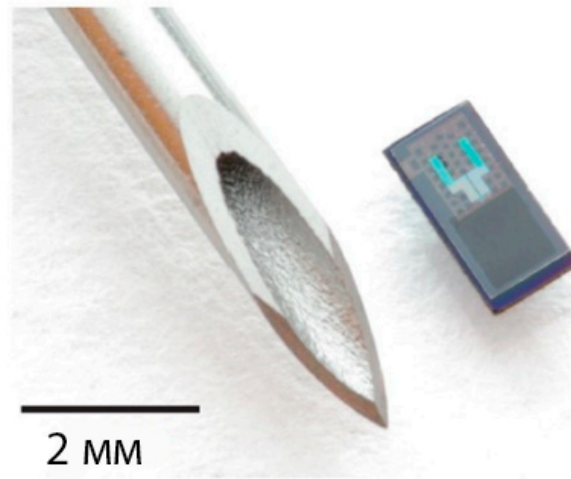


Рисунок 3.2.1 – Ультра-малий ємнісний сенсор тиску для введення вимірювань артеріального тиску

Також цікаві розробки ведуться у сферах розробки роботизованих кінцівок. Якщо точніше – для створення штучної шкіри яка б могла відчувати дотики. Плівкові ємнісні сенсори якомога краще підходять для виконання поставленої задачі. Протез може бути безперешкодно покритий плівковими сенсорами на базі гнучких полімерних матеріалів та відкалібровано відповідно до необхідної чутливості. В медицині уже існують процеси, які дозволяють керувати і “відчувати” штучну кінцівку як за допомогою прямого підключення до нервів, так і завдяки електромагнітним імпульсам. Створення протезу, який би давав можливість відчувати дотики є першочерговою метою для покращення біомеханічних протезів та покращення життя людей з втраченими кінцівками[23].

### 3.3. Висновки

В даному розділі були детально описано головні переваги та особливості тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску, такі як: малі розміри, висока

чутливість, широкий діапазон вимірюваного тиску, низьку температурну чутливість, надійність та інші. На основі конструктивних та фізико-електричних характеристик, було проаналізовано перспективність використання даного типу датчиків тиску у різних сферах та наведені приклади. До перспективних сфер відносяться: побутова техніка, системи контролю та автоматизації, автомобільна та авіа-космічна сфери, а також медицина.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломної роботи було розглянуто конструкцію та технологію виготовлення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску та проаналізовано його переваги та перспективність використання у різних галузях.

В першому розділі було розглянуто в загальному вигляді поняття методи вимірювання тиску, які вимоги ставляться до датчиків тиску і принципи їх роботи. Також зроблено огляд та порівняльну характеристику поширених типів датчиків тиску та визначено кращий варіант із них.

У другому розділі було детально розглянуто загальну конструкцію тонкоплівкових ємнісних сенсорів тиску, їх конструктивні особливості. Також було детальніше розглянуто технологію та методи нанесення тонких плівок, які можуть бути використані для виготовлення обраного датчика. Було розглянуто процес виробництва ємнісного сенсора з використанням поліміїдних плівок як перспективного та дешевого матеріалу.

У третьому розділі детально описано характеристики тонкоплівкових ємнісних сенсорів. Їх основні переваги перед аналогами. Було проаналізовано та представлено області використання розглянутого датчика тиску.

Результуючий прилад має широкий спектр використання. Він може використовуватись у системах автоматизації та контролю навколишнього середовища, у компактних переносних пристроях. Завдяки малим розмірам, а також високій супротив впливу агресивних середовищ може використовуватись у літако- та автомобілебудуванні, аеродинамічних випробуваннях та медицині. Завдяки простій конструкції та розвитку мікроелектроніки має високий потенціал для подальшого зменшення розмірів та покращення характеристик.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Казарян, А. А. Измерительная техника / А. А. Казарян – М.: Ліга-Прес, 2013. – 27-30 с.
2. Готри, З. Ю. Элементы теории микроэлектронной техники / З.Ю. Готри. – М.: Ліга-Прес, 2001. – 64-85 с.
3. White, N. Sensors and Actuators / N. White, J. Brignell. – 1991. – Vol. 6, №4 – P. 189-201.
4. Готри, З. Ю. Микроэлектронні сенсори фізичних величин / З. Ю. Готри. – М.: Ліга-Прес, 2003. – 256-310 с.
5. Форейт, И. Емкостные датчики неэлектрических величин / И. Форейт – М.: Энергия, 1991. – 67-76 с.
6. Портрат М. Пленочные датчики давления и их применение / М. Портрат – М.: ВИНТИ, 1995. – 78-90 с.
7. Puers, B. Sensor and Actuators / B. Puers, W. Sansen, S. Pazczyncky. – 1986. – 145-150 p. – DOI: ?
8. White, N. Sensor and Actuators / N. White, J. Brignell. – 1991. – 112-113 p. – DOI: ?
9. Готри, З. Ю. Микроэлектронні сенсори фізичних величин / З. Ю. Готри. – М.: Ліга-Прес, 2003. – 265-270 с.
10. Lokhande, A. C. Development of Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> (CTS) thin film solar cells by physical techniques: A status review. Sol. Ener. Mater. Sol. Cells / A. C. Lokhande, R. V. Chalapathy, M. He, E. Jo, M. Gang, S. A. Pawar, C. D. Lokhande, J. H. Kim.: 2016. – 84-107 p. – DOI: 10.1016/j.solmat.2016.04.003.
11. Lorenz, M. 25 years of pulsed laser deposition. J. Phys. D. Appl. Phys / M. Lorenz, Rao MSR.: 2014. – DOI: 10.1088/0022-3727/47/3/030301.
12. High temperature superconducting thin films: The physics of pulsed laser ablation. Physica C / Lynds L, Weinberger BR, Potrepka DM, Peterson GG, Lindsay MP.: 1989. –61-69 p. – DOI: 10.1016/0921-4534(89)90104-4.

13. Piegari, A. Recent developments in deposition techniques for optical thin films and coatings / A. Piegari, F. Flory. // *Angusmacleod H: Oxford: Woodhead Publishing Series*, 2013. – 3-25 p. – DOI: 10.1533/9780857097316.1.3.
14. Dumitru, V. Optical and structural differences between RF and DC AlxNy magnetron sputtered films. *Thin Solid Films* / V. Dumitru, C. Morosanu, V. Sandu, A. Stoica.: 2000. – 17-20 p. – DOI: 10.1016/S0040-6090(99)00726-9
15. *Sol-Gel Science* / Brinker CJ, Scherer GW: San Diego: Academic Press, 1990. – DOI: ?
16. Scriven, L. E. Physics and applications of dip coating and spin coating / L. E. Scriven, editors: C. J. Brinker, D. E. Clark, D. R. Ulrich // *Better Ceramics Through Chemistry*. 3rd ed. Pittsburgh, PA: Materials Research Society, 1988. – 712–729 p.
17. Mane, R.S. Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films / R. S. Mane, C. D. Lokhande. // *Mater. Chem. Phys*, 2000. – 1-31 p. – DOI: 10.1016/S0254-0584(00)00217-0.
18. Ingram, J. Polymeric humidity sensor based on laser carbonized polyimide substrate *Sensors and Actuators* / J. Ingram, M. Grep, J. Nicholson, A. Fountain. – 2003. – ISBN: 96283289
19. 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.
20. White, N. *Sensors and Actuators* / N. White, J. Brignell. – 2015. – Vol. 187, №6 – 120-128 p.
21. Казарян, А. А. Экспериментальное исследование особенностей обтекания моделей с помощью тонкопленочных емкостных датчиков давления / А. А. Казарян, Н. И. Моркович, Г. К. Шаповалов. – М.: Наука, 1998. – 135-138 с.
22. Казарян, А. А. Тонкопленочные емкостные датчики для измерения пульсаций давления / А. А. Казарян, А. В. Игнатов, И. И. Фалько. – М.: Наука, 1988. – 46-74 с.

23. Peishuai, Song. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors / Peishuai Song, Zhe Ma, Jing Ma, Liangliang Yang, Jiangtao Wei, Yongmei Zhao, Mingliang Zhang, Fuhua Yang and Xiaodong Wang.: 2018. – 2-38 p. – DOI: ?