

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

«До захисту допущено»  
Завідувачка кафедри

\_\_\_\_\_ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ  
\_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

за спеціальністю 171 «Електроніка» освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **«ТОНКОПЛІВКОВІ ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ СЕНСОРІВ  
НАНОЕЛЕКТРОНІКИ»**

Здобувача групи ЕП.м-21н Сагури Андрія Руслановича

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

Андрій САГУРА

Керівник доцент кафедри електроніки,  
загальної та прикладної фізики,  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«01» травня 2024 року

## ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Сагури Андрія Руслановича

Тема роботи: ТОНКОПЛІВКОВІ ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ СЕНСОРІВ  
НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

затверджена наказом по університету від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

В останні роки швидко розвиваються напрямки науки, що займаються дослідженням тонких металевих та напівпровідникових плівок, так як вони мають унікальні в своєму роді властивості, що відкриває для них перспективи для застосування в багатьох галузях науки та техніки. Використання тонких плівок у техніці стало можливим після освоєння методів їх одержання з попередньо заданими фізичними властивостями. Це відкрило можливість їх широкого застосування в оптиці, у техніці надвисоких частот як захисних покриттів, елементів мікроелектронних схем, тензодатчиків, у кріогенній та обчислювальній техніці. За рахунок технологій нанорозмірного напилення та використання гнучких підкладок є можливість створення тонких і надгнучких систем, які можна складати або скручувати без зміни їх функціональності, а також додатково отримати такі переваги, як легка вага, портативність, чудові електричні властивості тощо. Спостерігається значний інтерес до матеріалів з точки зору їх практичного застосування як функціональних чутливих елементів сенсорів наноелектроніки.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні та аналізі функціональних та конструктивних особливостей тонкоплівкових сенсорів та їх чутливих елементів, а також моделюванні параметрів ємнісних датчиків, використовуючи середовище COMSOL Multiphysics.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)  
1. Характеристика чутливих елементів для сенсорів наноелектроніки.

Літературний огляд

2. Процес виготовлення чутливих сенсорів наноелектроніки  
3. Моделювання параметрів та аналіз результатів.  
4. Висновки.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 3-6. Характеристика чутливих елементів для сенсорів наноелектроніки. Літературний огляд.

Слайди № 7 Процес виготовлення чутливих сенсорів наноелектроніки.

Слайди № 9-11. Моделювання параметрів та аналіз результатів.

Слайд № 12. Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.05.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 16.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	23.05.2024 р., 11-40 онлайн	

Здобувач

Керівник

Андрій САГУРА

Юрій ШАБЕЛЬНИК

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 32 сторінках, зокрема, містить 14 рисунків, список використаних джерел із 20 найменувань.

У сучасному світі нанотехнології відіграють критичну роль у розвитку новітніх електронних пристроїв, зокрема у сфері сенсорної техніки. Тонкоплівкові чутливі елементи є одним із ключових компонентів у виробництві високочутливих та високоточних сенсорів, які застосовуються у наноелектроніці. Ці елементи забезпечують інтеграцію функціональних матеріалів з мікро- та нанорозмірними структурами, що дозволяє значно підвищити ефективність та функціональність сенсорних систем.

Розробка та впровадження тонкоплівкових чутливих елементів у промисловість вимагає вирішення ряду складних наукових та технічних задач. Основними з них є: вибір оптимальних матеріалів для плівок, розробка методів їхнього нанесення та інтеграції з електронними схемами, а також створення надійних та довговічних сенсорів, здатних працювати у широкому діапазоні умов. Крім того, існує потреба у створенні стандартів та протоколів тестування таких сенсорів, що дозволить забезпечити їх високу якість і надійність.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні та аналізі функціональних та конструктивних особливостей тонкоплівкових сенсорів та їх чутливих елементів, а також моделюванні параметрів ємнісних датчиків, використовуючи середовище COMSOL Multiphysics.

Для моделювання використовували параметричний метод розрахунку параметрів ємнісного тонкоплівкового датчика. У результаті проведених наукових досліджень та розрахунків встановлено основні конструктивні та фізичні параметри датчика.

Результати кваліфікаційної роботи магістра можна використати при розробці лабораторних та розрахункових робіт з дисципліни «Прилади та пристрої оптоелектроніки та спінтроніки».

**Ключові слова:** МОДЕЛЮВАННЯ, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ, СЕНСОР, ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ.

# ЗМІСТ

<b>РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ СЕНСОРІВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....</b>	<b>6</b>
1.1. Огляд та порівняння існуючих сенсорів тиску та магнітного поля для наноелектроніки .....	6
1.2. Конструкційні особливості тонкоплівкових чутливих елементів для сенсорів .....	12
<b>РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ СЕНСОРІВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ .....</b>	<b>15</b>
2.1. Тонкоплівкова технологія та процес виготовлення тонкоплівкового ємнісного сенсора тиску.....	15
2.2. Імпульсно-лазерне осадження .....	16
2.3. Золь-гелевий метод.....	17
2.4. Електронно-променеве напилення.....	19
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....</b>	<b>21</b>
3.1. Параметрична модель датчика тиску.....	21
3.2. Математична модель ємнісного датчика тиску з прямокутною та квадратною мембраною.....	24
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>29</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>30</b>

## **РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ СЕНСОРІВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД**

### **1.1. Огляд та порівняння існуючих сенсорів тиску та магнітного поля для наноелектроніки**

Сенсори тиску та магнітного поля є невід'ємною частиною сучасної наноелектроніки, знаходячи застосування у різноманітних областях від медицини до автомобілебудування. Ефективність і точність цих сенсорів безпосередньо впливає на продуктивність та надійність кінцевих продуктів. У цьому розділі буде проведено детальний аналіз і порівняння сучасних технологій сенсорів тиску та магнітного поля, їх характеристики, принципи роботи, а також переваги і недоліки [1].

Сенсори тиску у наноелектроніці використовуються для вимірювання сили, яка діє на певну площу. Найпопулярнішими типами сенсорів є п'єзорезистивні, ємнісні та оптичні сенсори.

- П'єзорезистивні сенсори тиску

П'єзорезистивні сенсори використовують зміну електричного опору матеріалу під дією механічного навантаження. Вони прості у виробництві і мають низьку вартість, що робить їх популярними для комерційного використання. Недоліки включають обмежену діапазон дії та чутливість до температурних змін [2]. Схематичне зображення даного сенсору на рисунках 1.1 та 1.2.

- Ємнісні сенсори тиску

Ємнісні сенсори вимірюють зміну ємності між двома провідними пластинами, які змінюють своє відносне положення під впливом тиску. Ці сенсори характеризуються високою чутливістю та стабільністю, але їх виготовлення може бути складнішим і дорожчим. На рисунках 1.3 та 1.4 зображено принцип роботи датчику та конструкція сенсору відповідно.

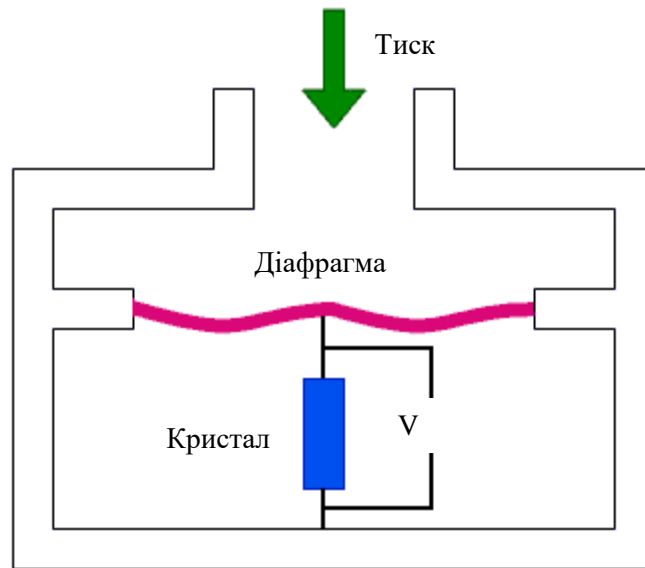


Рисунок 1.1 – Схема побудови п'єзоелектричного датчику тиску.

Адаптовано із роботи [3]

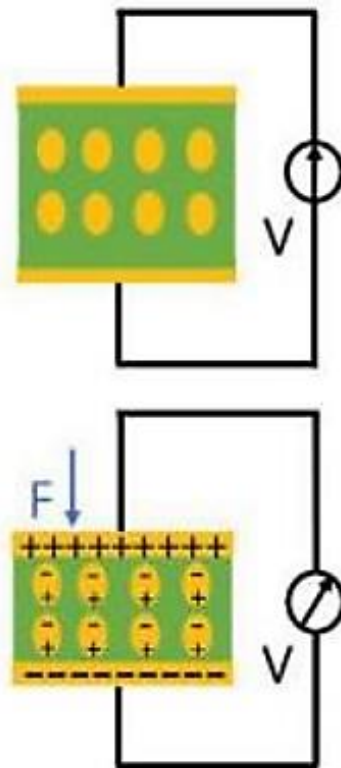


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення принципу роботи п'єзоелектричного сенсору тиску. Адаптовано із роботи [4]

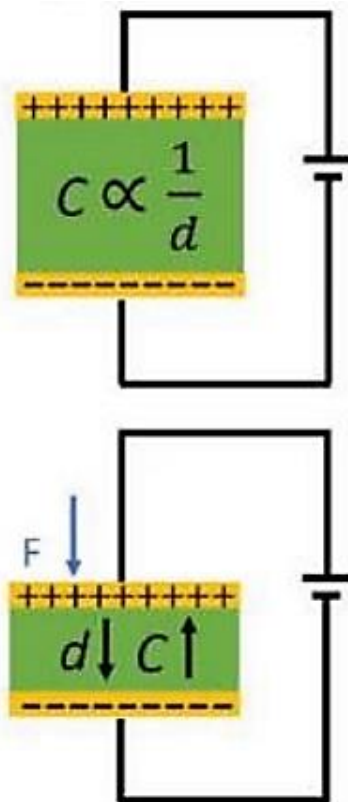


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення принципу роботи ємнісного датчику Із роботи [4]

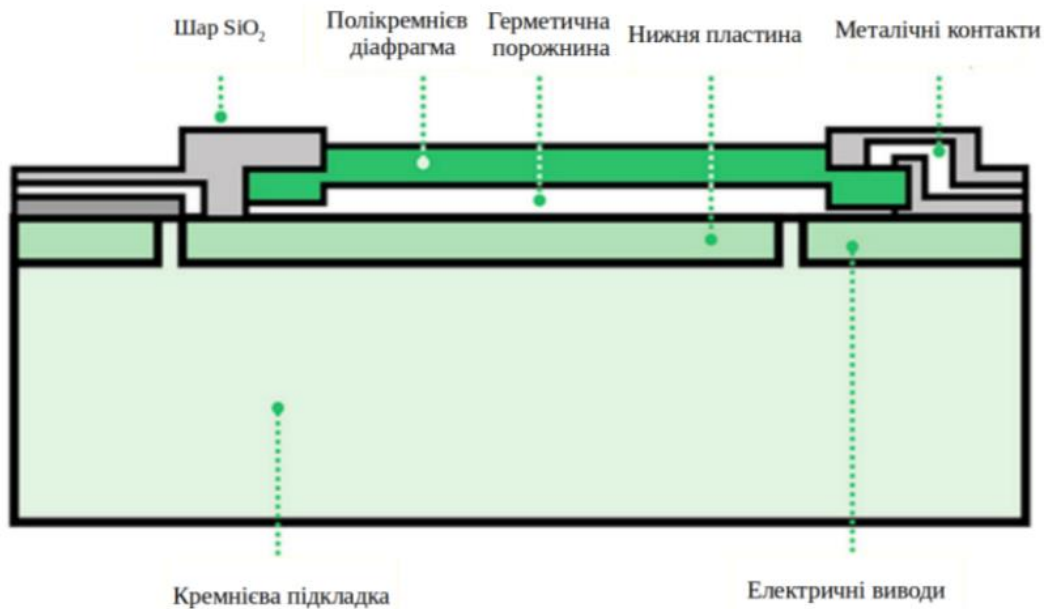


Рисунок 1.4 – Зображення конструкції ємнісного сенсору тиску. Із роботи [5]



- Оптичні сенсори тиску

Оптичні сенсори використовують зміну властивостей світла (наприклад, інтенсивності, поляризації або фази) для вимірювання тиску. Вони не чутливі до електромагнітних перешкод і можуть працювати у важких умовах. Однак, їх вартість і складність у використанні можуть бути значними.

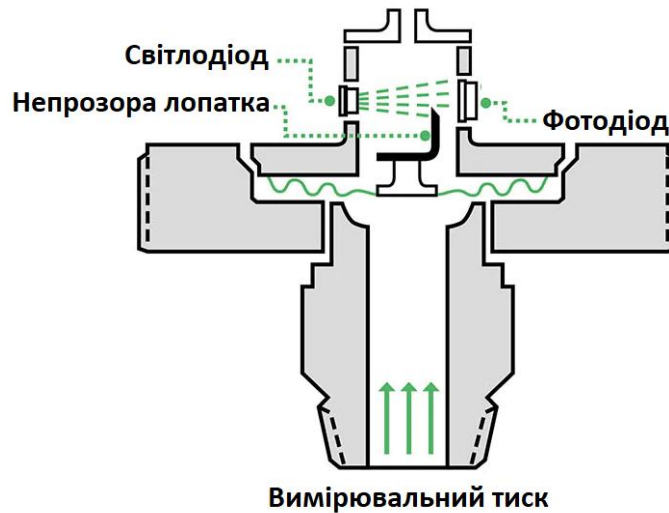


Рисунок 1.5 – Схема оптичного датчика тиску.

Адаптовано із роботи [5]

- Сенсори магнітного поля для наноелектроніки

Сенсори магнітного поля вимірюють зміни в магнітному полі Землі або створеному штучно магнітному полі. Сенсори на основі ефекту Холла та магніторезистивні сенсори є двома основними типами, що використовуються у наноелектроніці [6].

- Сенсори на основі ефекту Холла

Ці сенсори використовують ефект Холла для вимірювання магнітного поля. Вони прості у виготовленні і можуть вимірювати широкий діапазон магнітних полів. Втім, вони можуть бути чутливими до температурних змін.

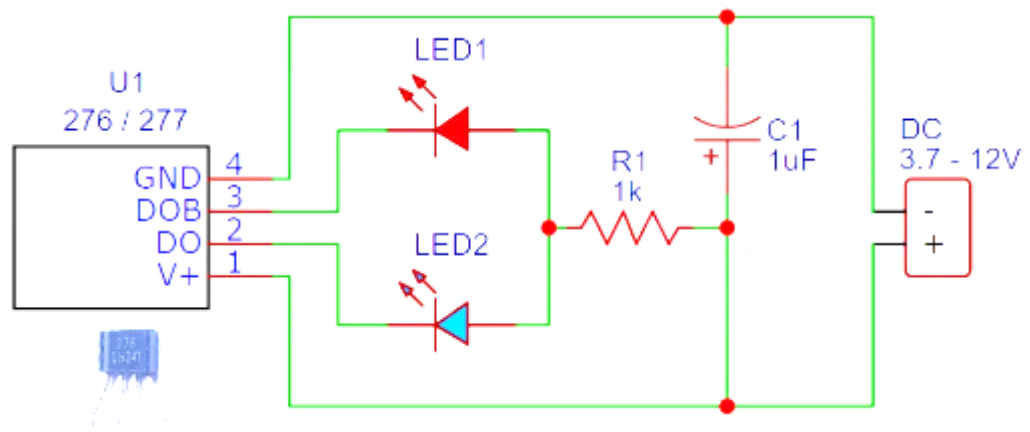


Рисунок 1.6 – Схема електричного кола, що використовується в сенсорі на основі ефекту Холла. Адаптовано із роботи [7]

- Магніторезистивні сенсори

Магніторезистивні сенсори використовують зміну електричного опору під впливом магнітного поля. Вони забезпечують високу точність і чутливість, особливо у низьких магнітних полях, але їх вартість вища в порівнянні з Hall Effect сенсорами.

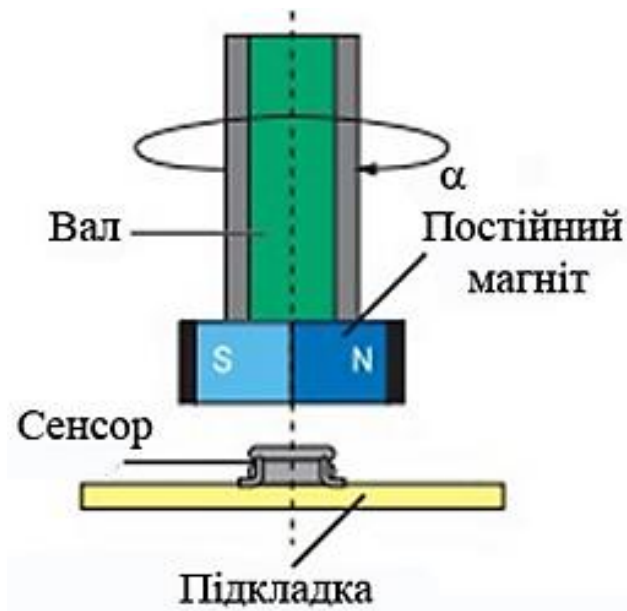


Рисунок 1.7 – Приклад застосування магніторезистивного датчику з кутом повороту. Адаптовано із роботи [8]

## Порівняння сенсорів тиску та магнітного поля

При виборі сенсора для конкретних застосувань в наноелектроніці важливо розглянути ряд критеріїв, зокрема чутливість, діапазон робочих температур, вартість, стабільність та простоту інтеграції в системи. Ось докладний аналіз порівняльних характеристик між сенсорами тиску та магнітного поля:

### Чутливість і точність

- П'єзорезистивні сенсори тиску характеризуються достатньою чутливістю для багатьох практичних застосувань, але їх точність може бути обмеженою в умовах високого тиску або при значних температурних коливаннях [9-12].

- Ємнісні сенсори тиску забезпечують вищу точність і чутливість, особливо в низькому діапазоні тиску. Це робить їх ідеальними для застосувань, де необхідні висока точність і надійність, наприклад, в медичних приладах.

- Магніторезистивні сенсори вирізняються високою чутливістю до низьких магнітних полів і високою точністю, що робить їх придатними для застосувань в прецизійних вимірюваннях [13].

### Стійкість до навколишніх умов

- Оптичні сенсори тиску не впливають на електромагнітні перешкоди, що робить їх ідеальними для використання в умовах високої електромагнітної активності. Вони також стійкі до корозії і хімічного впливу.

- Hall Effect сенсори демонструють добру стійкість до температурних змін, але їх чутливість може знижуватися з підвищенням температури.

### Вартість виробництва та інтеграції

- П'єзорезистивні сенсори зазвичай дешевші у виробництві порівняно з іншими типами сенсорів, що робить їх привабливими для масового виробництва.

– Ємнісні сенсори вимагають більш складних технологій виробництва, що підвищує їхню вартість, але їх висока точність та надійність часто виправдовують ці витрати в критично важливих застосуваннях.

– Магніторезистивні сенсори також є дорожчими за Hall Effect сенсори, але їх вища точність і чутливість можуть бути вирішальними для застосувань, де це

критично важливо.

Придатність для специфічних застосувань

– Сенсори з високою стійкістю до хімічного впливу та температур є ідеальними для використання в харшових умовах, наприклад, в нафтохімічній промисловості або в геологічних дослідженнях.

– Чутливі сенсори із низькою вартістю виробництва краще підходять для споживчої електроніки та автомобільної промисловості, де важливі масове виробництво та зниження витрат.

При виборі сенсорів для наноелектроніки важливо враховувати баланс між вартістю, чутливістю, точністю та стійкістю до навколишніх умов. Рішення повинно базуватися на конкретних вимогах застосування, що забезпечує оптимальну продуктивність і надійність у відповідних умовах експлуатації [14]. Сучасні технології в області сенсорів тиску і магнітного поля в наноелектроніці продовжують розвиватися, пропонуючи все більшу точність і надійність. Важливо продовжувати дослідження для оптимізації цих технологій, щоб вони могли відповідати зростаючим вимогам різних застосувань.

## **1.2. Конструкційні особливості тонкоплівкових чутливих елементів для сенсорів**

Тонкоплівкові чутливі елементи є фундаментальною складовою сучасних сенсорних систем, які використовуються у широкому спектрі прикладних наук і технологій. Основна перевага тонкоплівкових чутливих елементів полягає у їх високій чутливості, малих габаритах, гнучкості конструкції та здатності інтегруватися у комплексні мікроелектронні пристрої. Цей розділ надає огляд конструкційних особливостей тонкоплівкових чутливих елементів, аналізуючи різні матеріали, методи виготовлення та конструкційні стратегії, які забезпечують їх ефективність і надійність [14].

1. Активний шар: Це тонкий шар матеріалу, який реагує на зовнішні впливи та генерує сигнал. Для різних типів сенсорів можуть використовуватися

різні матеріали. Наприклад, п'єзоелектричні матеріали для сенсорів тиску або магнітно-чутливі матеріали для сенсорів магнітного поля.

2. Електроди: Електроди використовуються для подачі зовнішнього збудження або для вимірювання сигналу, який генерується активним шаром. Зазвичай вони виготовляються з провідних матеріалів, таких як золото, срібло або діелектричні матеріали.

3. Субстрат: Це базова підкладка, на яку виконується депонування активного шару та електродів. Він може бути виготовлений з різних матеріалів, таких як кремній, скло або пластик, в залежності від вимог до сенсора.

4. Захисний шар: У деяких випадках, особливо коли сенсор планується використовувати у складних умовах, захисний шар може бути доданий для захисту активного шару та електродів від впливу зовнішнього середовища.

Матеріали, що використовуються для тонкоплівкових чутливих елементів, можуть значно варіюватися залежно від призначення сенсора. Вони включають [15]:

- Напівпровідникові матеріали (наприклад, силіцій, германій, кадмій телурід), які є вибором для термоелектричних та фотоелектричних сенсорів.

- Метали (золото, платина, нікель), які часто використовуються для створення резистивних та п'єзорезистивних елементів через їхню високу провідність та стабільність.

- Оксидні матеріали (наприклад, оксид цинку, діоксид титану), які застосовуються в газових сенсорах та сенсорах для вимірювання якості повітря через їхню чутливість до змін хімічного складу оточення.

Методи виготовлення тонкоплівкових елементів

Технології нанесення тонких плівок розвивалися з метою оптимізації товщини, однорідності та адгезії плівок. Найпоширеніші методи включають:

- Фізичне випаровування у вакуумі (PVD): метод дозволяє контрольовано наносити матеріали на субстрат, формуючи плівки з високою чистотою і однорідністю.

- Хімічне осадження з парової фази (CVD): застосовується для створення

плівок на основі силіцію або металів, які мають високу адгезію до різних субстратів.

– Нанесення з розчинів (наприклад, спін-коатинг, дип-коатинг), яке є ефективним для створення органічних плівок та композитних матеріалів.

Конструкційні рішення для підвищення функціональності

Для оптимізації властивостей сенсорів розроблено ряд конструкційних підходів, серед яких:

– Багат шарові структури: використовують комбінацію різних матеріалів для досягнення бажаних електричних та механічних властивостей.

– Мікро- та наноструктуризація поверхонь: дозволяє збільшити чутливість сенсорів за рахунок збільшення площі поверхні взаємодії з аналітичним середовищем.

– Гнучкі субстрати: забезпечують можливість інтеграції сенсорів у складні або динамічні системи, такі як текстиль або носимі пристрої.

Незважаючи на значний прогрес у розробці тонкоплівкових чутливих елементів, залишаються виклики, такі як забезпечення довготривалої стабільності та надійності у складних умовах експлуатації. Розвиток нових матеріалів, краще розуміння механізмів старіння та корозії, а також удосконалення методів виготовлення можуть вирішити ці проблеми.

## РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ СЕНСОРІВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

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

Якщо детально розглянути особливості ємнісного тонкоплівкового датчика тиску можна зробити висновок, що конструкція не зазнала відчутних змін на відміну від попередників, принцип роботи лишаються сталими. Виходячи з цього, в розділі буде розглянуто способи виготовлення тонкоплівкового сенсора та технологію нанесення тонких плівок, або надзвичайно тонких шарів матеріалу, що і відіграють ключову роль в підвищенні низки характеристик сенсора що розглядається.

Аби виготовити сенсор треба використати металізовану алюмінієм або нікелем поліімідну плівку, яка в свою чергу є основою для фотолітографії де формується задана конфігурація елементів, інакше поліімідна плівка завтовки 12...18 мкм, на яку у вакуумі методом випаровування та конденсації через маску наносяться шари алюмінію або нікелю [4].

Наступний крок у виготовленні датчика включає зварювання виводів до металевих шарів з алюмінію або нікелю, які закріплюються за допомогою спеціального струмопровідного клею. Використання такого клею дозволяє спростити та здешевити процес виробництва. Для захисту чутливих елементів сенсора від електричних завад використовують металеві екрани з алюмінію або нікелю. Також можна застосовувати екрани з фольгованої поліімідної плівки замість металізованої для зниження зовнішніх електромагнітних шумів, що є критично важливим при вимірюванні низьких рівнів пульсацій тиску. Цей етап також сприяє точному вимірюванню статичного тиску на дуже низьких частотах (до нуля) без значних залишкових деформацій від навантажень. Основним етапом є застосування тонкої поліімідної плівки, що передбачає застосування технологій тонких плівок для нанесення екстремально тонких шарів матеріалу. [6].

Сьогодні багато технологій призначені для зменшення розмірів матеріалів до нанорозмірів та нанотовщин, що відкриває нові та унікальні властивості цих матеріалів у сферах оптики, електроніки, оптоелектроніки та діелектрики. Це напрямок у науці про матеріали отримало назву тонкоплівкове матеріалознавство. Технологію можна описати як застосування тонкого шару матеріалу, товщина якого варіюється від декількох нанометрів до кількох мікрометрів. Залежно від умов виробництва та типу матеріалу, структура тонких плівок може бути аморфною або полікристалічною. Тонкі плівки складаються з основного шару та підкладки, на яку вони наносяться. Додатково, тонкі плівки можуть містити кілька шарів, які використовуються, наприклад, у тонкоплівкових сонячних батареях або електрохромних комірках.

Існують наступні методи фізичного осадження [2]:

- термічне осадження;
- катодне розпилення;
- високочастотне розпилення;
- реактивне розпилення;
- магнетронне розпилення;
- молекулярно-променева епітаксія;

Методи хімічного осадження:

- 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.

## **2.2. Імпульсно-лазерне осадження**

Імпульсно-лазерне осадження представляє собою одну з технік фізичного



випаровування, використовувану для нанесення тонкоплівкового покриття. В процесі створення тонкої плівки лазерний промінь застосовується для нанесення матеріалу на поверхню всередині вакуумної камери, як показано на рисунку 2.1.

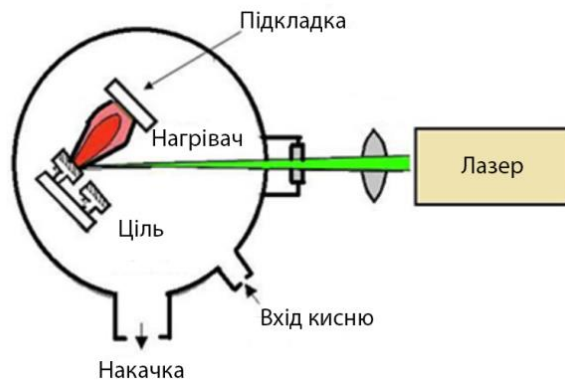


Рисунок 2.1 – Схема установки для імпульсного лазерного напилення. Адаптовано із роботи [15]

Цей метод використання різних типів лазерів, включаючи Nd-YAG, KrF (248 нм) та XeCl (308 нм), є стандартним для імпульсно-лазерного осадження. Коли лазерний промінь впливає на цільовий матеріал, він утворює плазмовий шлейф, який осідає на різних основах. Цей шлейф може містити нейтральні, атомні та іонізовані частки [15]. Для осадження металевих оксидів використовується кисень, а якість плівки залежить від таких факторів, як довжина хвилі лазера, його енергія, атмосферний тиск, тривалість імпульсу, та відстань від цілі до підкладки. Цей метод має переваги перед іншими методами фізичного осадження завдяки швидкому часу осадження та сумісності з киснем та іншими інертними газами. [12].

### 2.3. Золь-гелевий метод

Хоча виробництво тонких плівок за допомогою фізичних методів, які були описані раніше, забезпечує високу якість та функціональність плівок, цей процес є досить коштовним і потребує значної кількості матеріалу. З огляду на

необхідність виготовлення якісних тонких плівок з мінімальними витратами, методи хімічного осадження стали широко популярними по всьому світу. Ці методи дозволяють виробляти економічно вигідні тонкі плівки без використання дорогого обладнання. Хімічне осадження значною мірою залежить від складу хімічних розчинів, рН, в'язкості та інших факторів. [2].

Найпоширеніші методи хімічного осадження включають золь-гелевий процес, осадження у хімічній ванні, електроосадження, осадження парою та розпилювальний піроліз. Однак цей розділ зосереджений лише на методах золь-гелю та хімічних ванн, оскільки ці техніки дозволяють отримувати високоякісні плівки з мінімальними вимогами до обладнання. Золь представляє собою дисперсію твердих частинок у рідині, де частинки рухаються завдяки броунівському руху. Суспензії частинок, розміром від 1 нм до 1 мкм, відомі як колоїди, утворюються шляхом гідролізу та поліконденсації реакцій з алкоксидами металів, такими як оксиди Si та Ti, які є попередниками. Попередник визначається як хімічна сполука, що бере участь у реакції для створення іншого з'єднання. Для формування металічних комплексних сполук використовуються різні металеві попередники, включно з алкоксидами, карбоксилатами, дикетонатами та різними органічними соляними розчинами, але з комерційної точки зору алкоксиди є переважним вибором через їх доступність та вартість. [6].

Гель представляє собою стан, де рідина і тверда речовина співіснують у дисперсії, утворюючи міцну структуру, що містить рідкі компоненти. Гель є пористою, древоподібно з'єднаною напівтвердою сполукою, яка стабільно заповнює весь об'єм рідкого середовища і обмежується обсягом ємності, в якій він знаходиться. Гель вважається колоїдним розчином, коли тверда сполука формується з використанням колоїдних зольових частинок. Рідина, що знаходиться між мережею твердої сполуки, не витікає спонтанно і перебуває в термодинамічній рівновазі з твердою фазою сполуки. Процес золь-гелю включає наступні чотири етапи:

1. Необхідні колоїдні частинки одночасно диспергуються в рідині, утворюючи золь.

2. Зольний розчин осаджується на підкладках, утворюючи покриття методами розпилення, обертання або спринцювання. Частинки в золі полімеризуються шляхом видалення загальнозміцнюючих компонентів, утворюючи гель як неперервну сполуку.

3. Завершальні термічні обробки піролізують залишки органічних або неорганічних компонентів, утворюючи аморфний шар, який може перетворюватися на кристалічний при відпалі.

Методи осадження тонких плівок з золя включають покриття зануренням, обертанням і обприскуванням. Тонкі плівки готують, наносячи розчини-попередники на різні підкладки, а аморфні гелеві плівки піролізуються при відносно низьких температурах (300 °С до 700 °С), утворюючи аморфні або кристалічні оксиди, з подальшим відпалом при високій температурі для забезпечення кристалізації. [14].

#### 2.4. Електронно-променеве напилення

Електронно-променевий випаровувач (рис. 2.2) складається з трьох ключових компонентів: електронної гармати, системи відхилення та водоохолодженого тигля різної ємності. Це обладнання дозволяє вести безперервну роботу без необхідності додавання матеріалу, який випаровується. Важливою особливістю є те, що розплавлений матеріал не вступає в контакт із мідними стінками тигля. Загалом, можливе використання тигля, спеціально сформованого під розмір матеріалу (безтигельне випаровування), або ж використання разом із спеціальними тиглями для порошкових матеріалів. [2].

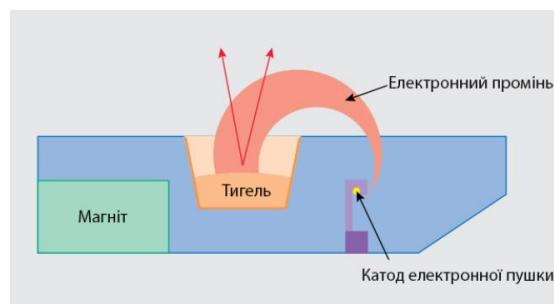


Рисунок 2.2 – Схема електронно-променевого випаровувача

Електроннопроменеві випаровувачі широко застосовуються у виробництві для створення тонких плівок металів, сплавів та діелектриків. Завдяки точному фокусуванню електронного пучка можна досягати високої концентрації енергії (до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) та температури, що дозволяє швидко випаровувати навіть найбільш високотемпературні матеріали. Швидке переміщення нагрітої зони через відхилення електронного потоку, а також здатність регулювати та контролювати потужність нагріву та швидкість осадження, сприяють автоматизації процесу. Метод автотигельного випаровування, що застосовується у цих системах, забезпечує високу чистоту та однорідність осаджених плівок [16].

## РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 3.1. Параметрична модель датчика тиску

Згідно з описаними етапами життєвого циклу та визначеною проблемою, параметри датчика тиску можна класифікувати на конструкційні, функціональні та технологічні. Далі представлено параметри, які впливають на вимірювану датчиком ємність. Це включає параметри, що стають актуальними на етапі пакування, як це відображено у формулюванні:

$$Par = \{Par_{konstr}, Par_{funct}, Par_{ftech}\}, \quad (3.1)$$

де  $Par$  – загальна множина параметрів датчику;

$Par_{konstr}$  – конструкційні параметри;

$Par_{funct}$  – функціональні параметри;

$Par_{ftech}$  – технологічні параметри.

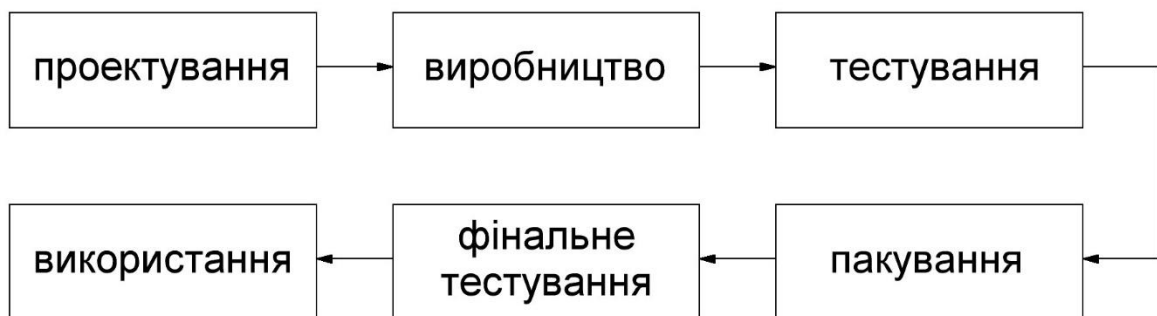


Рисунок 3.1 – Життєвий цикл ємнісних датчиків тиску

Конструктивні параметри описані виразом:

$$Par_{konstr} = \langle a, b, h, l, M_m, M_k \rangle, \quad (3.2)$$

де  $a$  – довжина мембрани;

$b$  – ширина мембрани;

$h$  – товщина мембрани;

$l$  – відстань між пластинами (між мембраною та діелектричним шаром);

$M_m$  – матеріал мембрани;

$M_k$  – матеріал корпусу.

Пластини зі структурами

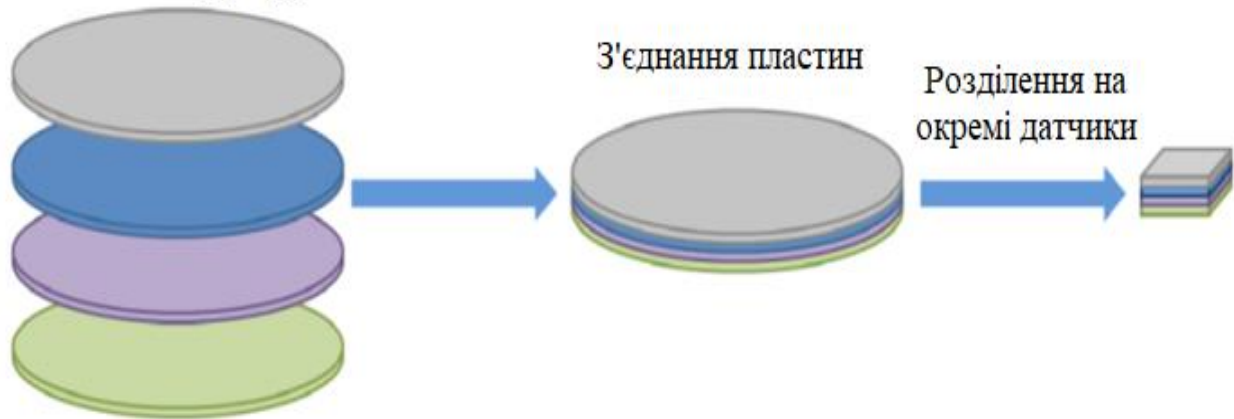


Рисунок 3.2 – Метод пакування датчиків. Адаптовано із роботи [17]

Зазвичай геометричні конструкції діафрагми ємнісного датчика тиску включають квадратні, прямокутні та круглі форми. Для круглої мембрани, замість параметрів ширини  $a$  та висоти  $b$ , використовується діаметр  $d$  для опису її розмірів. В усіх випадках максимальний прогин мембрани спостерігається у її центрі. Відстань між мембраною та діелектричним шаром визначає максимальний можливий прогин мембрани і таким чином обмежує максимальний тиск, який може виміряти датчик. [18].

Функціональні параметри описані виразом:

$$Par_{funct} = \langle T, P, t, \lambda \rangle, \quad (3.3)$$

де  $T$  – діапазон робочих температур датчика;

$P$  – діапазон вимірюємого тиску;

$t$  – час, протягом якого вимірювання тиску є доцільним;

$\lambda$  – допустима похибка.

Наявність параметра  $t$  у моделі пояснюється необхідністю стабілізації тиску у вакуумній порожнині датчика для забезпечення його точного вимірювання. Стабілізація тиску здійснюється з часом без застосування додаткових технічних рішень. Це означає, що часовий параметр  $t$  є критичним для досягнення необхідної точності вимірювань, дозволяючи тиску в порожнині вирівнюватися до стабільного стану. Функціонально цю залежність приведено на рис. 3.3 [19].

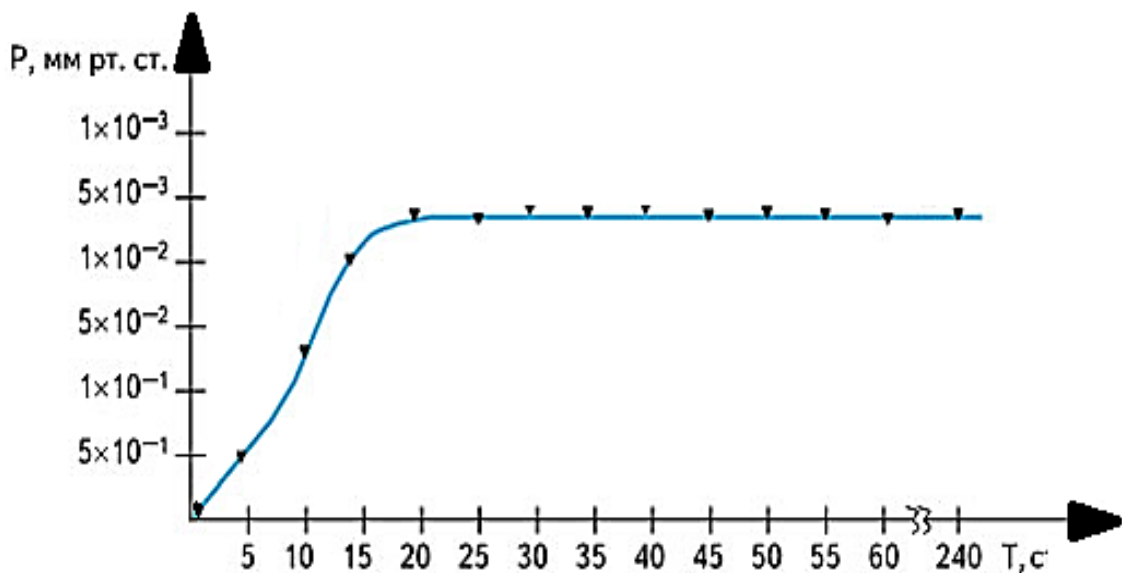


Рисунок 3.3 – Залежність тиску у порожнині датчика від часу. Із роботи [19]

Граничні показники цих параметрів описані інтервальними моделями (3.4)-(3.7), а їх кінцеві значення залежать від окремої моделі датчику:

$$T = [T_{\min} \dots T_{\max}], \quad (3.4)$$

$$P = [P_{\min} \dots P_{\max}], \quad (3.5)$$

$$t = [t_{\min} \dots t_{\max}], \quad (3.6)$$

$$\lambda = [0 \dots \lambda_{\max}]. \quad (3.7)$$

Оскільки ми розглядаємо датчик абсолютного тиску, параметр

максимальної частоти тиску, що притаманний тільки для датчиків змінного тиску, відсутній у моделі.

Технологічні параметри, що доцільно розглядати в рамках наших умов, описані виразом:

$$Par_{funct} = \langle T_k, t \rangle, \quad (3.8)$$

де  $T_k$  – температура, за якою виконується корпусування (відповідатиме температурі плавлення матеріалу корпусу);

$t_k$  – час, протягом якого діє температурний вплив на датчик.

### 3.2. Математична модель ємнісного датчика тиску з прямокутною та квадратною мембраною

Математична модель ємнісних датчиків тиску з прямокутною та квадратною мембраною є еквівалентними лише з однією відмінною – для квадратної мембрани параметри її довжини та ширини є однаковими.

Відповідно до теорії пластин [17, 18] за Кріггером рівняння, що регулює відхилення мембрани з тиском, який діє нормально на її поверхню, задається формулою для випадку прямокутної форми пластини:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{P}{D}, \quad (3.9)$$

де  $W$  – відхилення мембрани за  $(x, y)$  координатами;



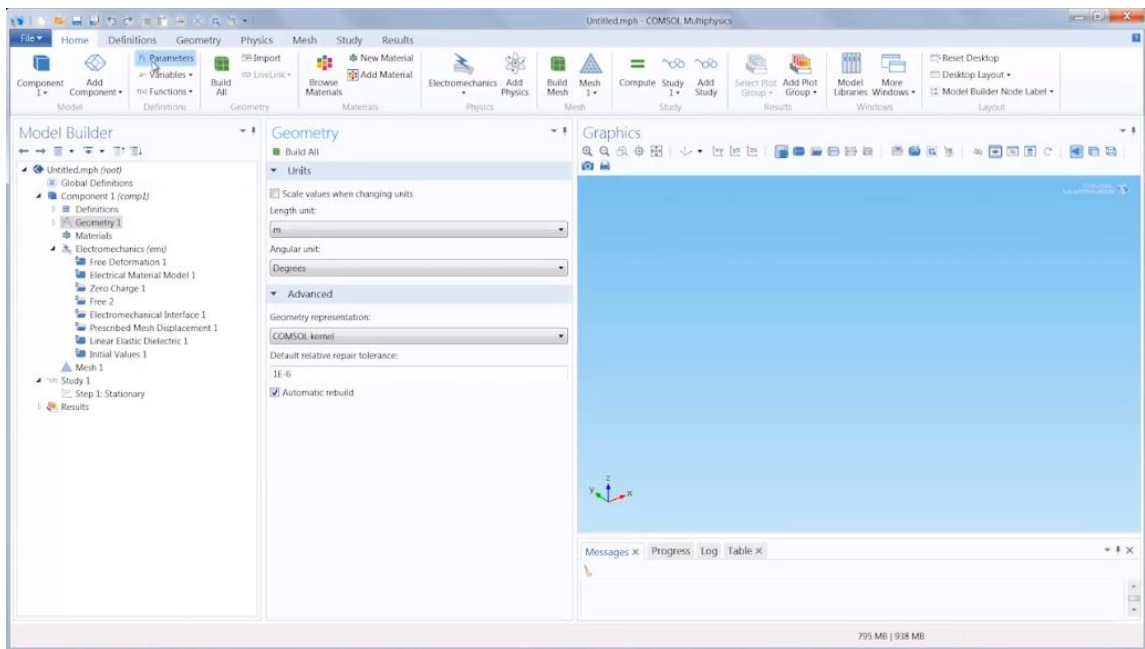


Рисунок 3.4 – Робоче вікно режиму «Stationary» програми COMSOL Multiphysics. Із роботи [20]

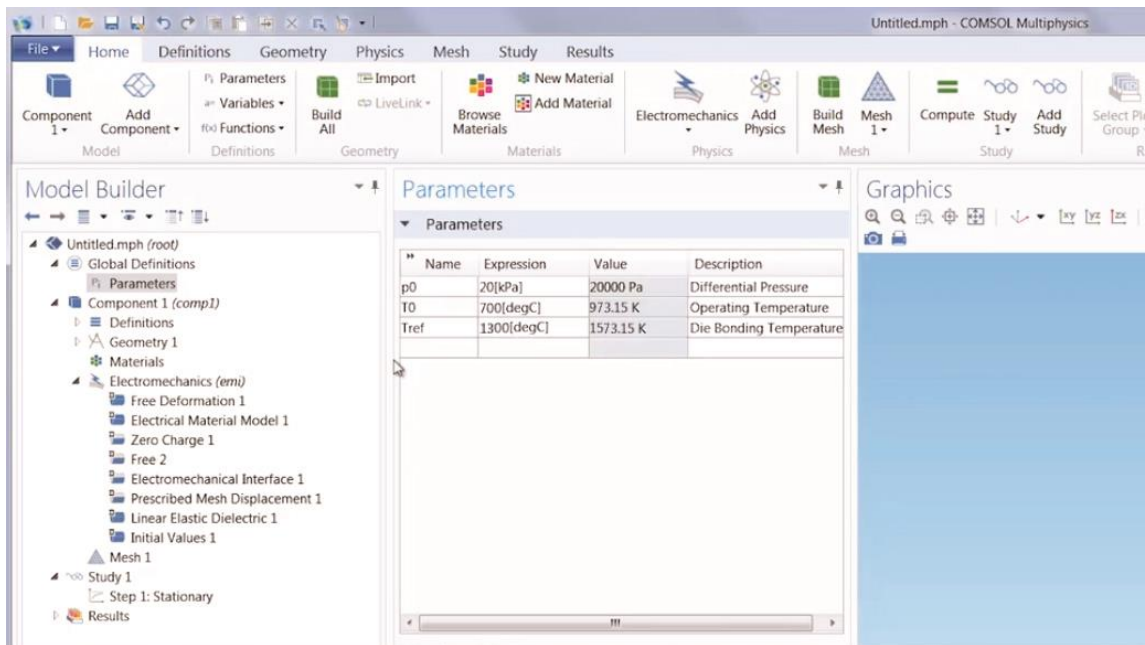


Рисунок 3.5 – Робоче вікно режиму задавання параметрів моделювання. Із роботи [20]

$\alpha$  – числовий коефіцієнт, що характеризується відношенням сторін мембрани одна до одної;  $P$  – тиск, що прикладається на пластину;  $D$  – жорсткість пластини, що визначається за виразом:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3.10)$$

де  $E$  – модуль Юнга;

$h$  – товщина діафрагми;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Максимальне відхилення за нормальних умов відбуватиметься саме в центрі діафрагми, що можна описати виразом:

$$W_{\max} = 0,00674 \frac{Pa^3}{D}, \quad (3.11)$$

Де  $a$  – довжина діафрагми.

Під час термічного пливу на етапі пакування мембрана може зазнати змін у своїх розмірах, які потенційно можуть не повернутися до початкового стану через механічні напруження, що виникають внаслідок теплового розширення. Коефіцієнт теплового лінійного розширення є ключовим фактором, що впливає на точність і надійність датчика, особливо під час та після теплових обробок, які є частиною процесу пакування. Ці напруження в мембрані обумовлені її коефіцієнтом теплового лінійного розширення, який можна визначити за певним математичним виразом:

$$\alpha = \frac{1}{a_0} \cdot \frac{da}{dT}, \quad (3.12)$$

де  $a_0$  – початкове значення довжини мембрани;

$T$  – зміна температури, що викликала зміну розміру мембрани.

Згідно до цього, для оцінювання такої напруги доцільно використовувати вираз:

$$\sigma = E(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T, \quad (3.13)$$

де  $\sigma$  – механічна напруга у діафрагмі, що викликана різницею між коефіцієнтами теплового розширення;

$\alpha_1, \alpha_2$  – середні коефіцієнти теплового лінійного розширення мембрани та корпусу;

$\Delta T$  – різниця між температурою отримання, під якою виконується пакування, та робочою температурою датчика після охолодження.

Згідно до цього, рівняння, що регулює відхилення пластин з тиском, що діє нормально на її поверхню, з урахуванням можливих похибок, що виникають за рахунок механічних напружень, можливо описати виразом:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} - \Delta a = \frac{P}{D}, \quad (3.14)$$

де  $\Delta a$  – відхилення значення довжини мембрани, яке сталося внаслідок виникнення механічної напруги під час пакування датчика у корпус. Воно визначається за виразом:

$$\Delta a = a_\sigma - a, \quad (3.15)$$

де  $a_\sigma$  – значення довжини мембрани після виконання етапу корпусування та охолодження датчика до робочої температури.

Тоді, максимальне відхилення за нормальних умов, з урахуванням можливих похибок, що виникають за рахунок механічних напружень, можна

описати виразом:

$$W_{\max} = 0,00674 \frac{P(a - \Delta a)^3}{D}, \quad (3.16)$$

### Математична модель ємнісного датчика тиску з круглою мембраною

Аналогічно до математичної моделі для прямокутної та квадратної мембрани, рівняння, що описує відхилення круглої мембрани під дією нормального тиску на її поверхню, задається формулою(3.7). Ця формула враховує відхилення мембрани на радіальній відстані від її центру. Зміна рівня тиску в круглій мембрані характеризується цим відхиленням центра мембрани відносно її базової осі. Це відхилення кількісно визначається за допомогою математичної формули, яка дозволяє розрахувати зміну геометрії мембрани відповідно до зміни тиску, що діє на неї:

$$W_r = \frac{P r^4}{64 D} \left( 1 - \left( \frac{l_r}{r} \right)^2 \right), \quad (3.17)$$

де  $W_r$  – відхилення на радіальній відстані  $r$  від центру діафрагми (мається на увазі відхилення центра мембрани щодо її базової вісі);

$r$  – радіус діафрагми;

$l_r$  – радіальна відстань.

З урахуванням похибки, що виникає за рахунок механічних напружень, вираз (3.17) набуває вигляду виразу:

$$W_r = \frac{P r^4}{64 D} \left( 1 - \left( \frac{l_r}{r - \Delta r} \right)^2 \right), \quad (3.18)$$

де  $\Delta r$  – відхилення значення радіусу мембрани, яке сталося внаслідок виникнення механічної напруги під час пакування датчика у корпус. Воно визначається за виразом:

$$\Delta r = r_\sigma - r, \quad (3.19)$$

де  $r_\sigma$  – значення радіусу мембрани після виконання етапу корпусування та охолодження датчика до робочої температури.

## ВИСНОВКИ

1. Тонкоплівкові чутливі елементи є фундаментальною складовою сучасних сенсорних систем. Основна перевага тонкоплівкових чутливих елементів полягає у їх високій чутливості, малих габаритах, гнучкості конструкції та здатності інтегруватися у комплексні мікроелектронні пристрої.

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

3. Для прорахунку основних параметрів тонкоплівкових датчиків використовуються параметрична модель та математична модель. Точність таких моделей становить 95%. Моделювання зручно проводити в середовищі COMSOL Multiphysics.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Longquan Ma, Xuecheng Yu, Pengli Yang. Highly sensitive flexible capacitive pressure sensor with a broad linear response range and finite element analysis of micro-array electrode // China, 2019 – 9 с.
2. Готра З.Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково- навчальне видання. В 3 томах. Том 1/ За ред. З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
3. Yan Huang, Xiangyu Fan. Emerging Technologies of Flexible Pressure Sensor: Materials, Modeling, Devices and Manufacturing // Advanced Functional Materials – 2019 – 24 с.
4. Ghanbari Mina. Analyzing the effect of existing bubbles in the interface liquid on the dynamic response of the strain-gauge type pressure sensor / Mina Ghanbari, Ghader Rezazadeh, Mohammad Fathalilou // Measurement. – 2022. – V. 196. – ID 111255.
5. Linear piezoresistive strain sensor based on graphene/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PDMS heterostructure / Sk. Riyajuddin, Sushil Kumar, Surender P. Gaur // Nanotechnology. – 2020. – V. 31. – ID 295501.
6. Zhao Wenju. Continuous measurement of tire deformation using long-gauge strain sensors / Wenju Zhao, Cheng Zhang, Jian Zhang // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – V. 142. – ID 106782.
7. Peishuai Song, Zhe Ma, Jing Ma, Peishuai Song. Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors // Micromachines. – 2020. – V. 11. – ID 56.
8. 3D Printed Force Sensor with Inkjet Printed Piezoresistive Based Strain Gauge / Mingjie Liu, Yulong Zhao, Yiwei Shao [et al.] // IEEE Sensors. – 2018. – 18381672.
9. 3D-Printed Strain-Gauge Micro Force Sensors / Juntian Qu, Qiyang Wu, Tyler Clancy [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2020. – V. 20. – P. 6971-6978
10. Ємнісний передавач тиску. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.silverinstruments.com/product/pressure->

- [measurement/capacitancepressure-transmitter/](#) (Дата доступу: 20.04.2024 р.).
11. A Supersensitive, Multidimensional Flexible Strain Gauge Sensor Based on Ag/PDMS for Human Activities Monitoring / H. Li, J. Zhang, J. Chen, [et al.] Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – ID 4639.
  12. Pressure Mapping Sensors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tekscan.com/pressure-mapping-sensors> (Дата доступу: 22.04.2024 р.).
  13. Gold nanorods as a high-pressure sensor of phase transitions and refractive-index gauge / Marcin Runowski, Szymon Sobczak, Jędrzej Marciniak [et al.] // Nanoscale. – 2019. – V. 11. – P. 8718–8726.
  14. S. Masihi, M. Panahi, D. Maddipatla, A Novel Printed Fabric Based Porous Capacitive Pressure Sensor for Flexible Electronic Applications // IEEE Sensors. – 2019. – 9261607.
  15. Lopato Przemyslaw. A Circular Microstrip Antenna Sensor for Direction Sensitive Strain Evaluation / Przemyslaw Lopato, Michal Herbko // Sensors. – 2018. – V. 18. – P. 310.
  16. І.Ш. Невлюдов, І.В. Жарікова, С.І. Гресько, Дослідження термічного впливу етапів пакування на параметри функціонування МЕМС ємнісних датчиків тиску // НТЖ «Технологія приладобудування». – 2019. – № 2.
  17. Kaajakari V. Practical MEMS: Analysis and Design of Microsystems, MEMS Sensors, Electronics, Actuators, RF MEMS, Optical MEMS, and Microfluidic Systems / V. Kaajakari // Small Gear Publishing, Las Vegas, 2009. – 484 p.
  18. Eshwaran P., MEMS Capacitive Pressure sensors: A review on Recent Development and Prospective / P. Eshwaran, S. Malarvizhi // International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol. 5, No. 3, Jun.-Jul. 2013. – pp. 2734-2746.
  18. Balavalad B. Kirankumar. A Critical Review of MEMS Capacitive Pressure Sensors / Kirankumar B. Balavalad, B.G. Sheeparamatti // Sensors & Transducers, Vol. 187, Issue 4, April 2015. – pp. 120-128.

19. Zemen Y., The impact of yield strength of the interconnector on the internal stress of the solar cell within a module / Y. Zemen, T. Prewitz, T. Geipel // 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 2010. – pp. 4073–4078.
20. Comsol Multiphysics [Электронный ресурс]; Режим доступа: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (Дата доступа: 22.04.2024 г.).