

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

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри
_____ **Анатолій ОРЛОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2021 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: **МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ВЕКТОРНИЙ АКУСТИЧНИЙ
СЕНСОР НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ**

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ДП-72
(шифр групи)

Шмаровоз Сергій Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Керівник _____
проф., к.т.н. **Олександр БОРИСОВ**
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю _____
доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Георгій СВЄЧНИКОВ

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 – 2021 року

Завдання на дипломну роботу

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

Інститут/факультет _____
(повна назва)

Кафедра _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро- і наносистемна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри
_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Шмаровозу Сергію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): **МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ВЕКТОРНИЙ АКУСТИЧНИЙ СЕНСОР НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ.**

керівник проекту (роботи) проф., к.т.н. Олександр БОРИСОВ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

3.1. Фізичні параметри що підлягають вимірюванню: амплітудні, частотні та просторові характеристики акустичного поля. 3.2. Порівняльний аналіз первинних перетворювачів для аналізу акустичного поля і визначення напрямку на джерело сигналу. 3.3. Використання технології мікроелектромеханічних структур на монокристалічному кремнії для розробки акустичного сенсора. 3.4. Аналіз експериментальних методик дослідження акустичного сенсора низькочастотного діапазону.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): 4.1 Вивчення літературних джерел за темою роботи. 4.2 Ознайомлення з векторними методами аналізу акустичного поля. Порівняльний аналіз конструкцій акустичних сенсорів. 4.3 Використання технології мікроелектро-механічних систем на кремнії при проектуванні та виробництві акустичних сенсорів. 4.4 Аналіз експериментальних методик оцінки характеристики перетворення акустичних векторних сенсорів.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3	к.т.н., зав. лаб. Борис ЛУПИНА		

7. Дата видачі завдання 04.02.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1.	Огляд літературних джерел за темою.	лютий 2021 р.	
2.	Векторні методи аналізу акустичного поля.	березень 2021 р.	
3.	Порівняльний аналіз конструкцій акустичних сенсорів.	березень - квітень 2021 р.	
4.	Використання технології МЕМС при проектуванні та виробництві акустичних сенсорів.	квітень - травень 2021 р.	
5.	Експериментальні методи оцінки характеристик перетворення акустичних векторних сенсорів.	квітень- травень 2021	
6.	Остаточне оформлення роботи.	червень 2021	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

проф., к.т.н. Олександр БОРИСОВ

_____ (ініціали, прізвище)

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

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. МЕТОДИ ВЕКТОРНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ	9
1.1 Теоретичні засади методів аналізу акустичного поля.	9
1.2 Приймачі акустичних сигналів.	15
1.3 Порівняльний аналіз методів оцінки інтенсивності звуку.	17
2. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА КРЕМНІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ СЕНСОРНИХ ВЕКТОРНИХ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	20
2.1. Використання МЕМС-технології для виготовлення мікрофонів. Технологічна реалізація первинних перетворювачів диференціального тиску і швидкості середовища.	20
2.2 Порівняльний аналіз конструкцій сучасних мікрофонів.	28
2.3 Розробка акустичних сенсорів швидкості середовища на основі кремнієвих мікроелектромеханічних структур.	37
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНИХ СТРУКТУР ВЕКТОРНИХ СЕНСОРІВ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ	53
3.1 Акустичні векторні сенсори спеціального призначення.	53
3.2 Структурні схеми експериментальних досліджень.	57
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ та ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	61

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 66 сторінках, вона містить 3 розділи, 22 ілюстрацій, 2 таблиці і 45 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є мікромеханічний векторний акустичний сенсор низькочастотного діапазону.

Предмет роботи – акустичні, електричні, механічні характеристики акустичних сенсорів на основі кремнієвих структур.

Мета роботи – аналіз вимірювального перетворення та технології виготовлення і визначення характеристик векторного акустичного сенсора низькочастотного діапазону на основі кремнієвих мікромеханічних структур.

В першому розділі розглянуто параметри акустичного поля та його характеристик, описано сучасні приймачі акустичних сигналів, проведено аналіз методів визначення інтенсивності звуку в середовищі.

В другому розділі роботи розглядаються основи MEMC-технології та основні конструктивно-технологічні засади розробки акустичного сенсора. В розділі описано основні технологічні процеси – глибокого анізотропного хімічного травлення монокристалічного кремнію та іншого травлення, метод фотолітографії при створенні тривимірних сенсорних структур потрібної геометрії, первинні перетворювачі (ПП) на основі MEMC-технології, глибоко і детально проаналізовано векторний акустичний датчик Microflown.

В третьому розділі проаналізовано експериментальні методики визначення характеристик перетворення та наводяться приклади застосування мікромеханічного векторного акустичного сенсора низькочастотного діапазону на основі сенсорів AVS та приладів AVISA, V-AMMS.

ABSTRACT

The work is set out on 66 pages, it contains 3 sections, 22__ illustrations, __2__ tables and 45 sources in the list of references.

The object of the study is a micromechanical vector acoustic sensor in the low frequency range.

Subject of work - acoustic, electrical, mechanical characteristics of acoustic sensors based on silicon structures.

The purpose of the work is the analysis of measuring transformation and manufacturing technology and determination of characteristics of vector acoustic sensor of low frequency range based on silicon micromechanical structures.

In the first section the parameters of the acoustic field and its characteristics are considered, modern receivers of acoustic signals are described, the analysis of methods of determination of sound intensity in the environment is carried out.

The second section discusses the basics of MEMS technology and the basic design and technological principles of acoustic sensor development. The section describes the main technological processes - deep anisotropic chemical etching of monocrystalline silicon and other etching, photolithography method for creating three-dimensional sensor structures of the desired geometry, primary transducers (PP) based on MEMS technology, deeply and in detail analyzed microacoustic vector acoustic.

The third section analyzes the experimental methods for determining the conversion characteristics and provides examples of the use of micromechanical vector acoustic sensor of low frequency range based on AVS sensors and AVISA, V-AMMS devices.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ABC – акустичний векторний сенсор;
 ВАХ – вольт-амперна характеристика;
 ІС – інтегральна схема;
 МЕМС – мікро-електро-механічна система;
 МСТ – мікросистемна техніка;
 ТІС – теплоізолювана структура;
 ПП – первинний перетворювач (сенсор, engl. “sensor”, рос. “датчик”);
 РІТ - Реактивне Іонне Травлення (engl. RIE);
 AVS - акустичний векторний сенсор на основі потокового мікрофона
 Microflowн спеціального призначення;
 DOA - direction of arrival – напрямок на джерело акустичного сигналу;
 LPCVD - хімічне парове осадження при пониженому тиску (Low Pressure
 Chemical Vapor Deposition);
 Microflowн – мікрофлоун, мікромеханічний потоковий мікрофон -
 пеленгатор виробництва Microflowн;
 RIE – Reactive Ion Etching (укр. Реактивне Іонне Травлення, РІТ);
 WSN – Wireless Sensors Networks – бездротова сенсорна мережа;
 .

ВСТУП

Останні три десятиліття спостерігається швидке зростання ринку сенсорних приладів та пристроїв, спроектованих та виготовлених за груповою технологією Мікро-Електро-Механічних Систем (MEMS) на кремнії. Кремній (Si) є практично незамінним та найбільш широко використовуваним напівпровідниковим конструктивним матеріалом сучасної сенсорики. Він відіграє надзвичайну роль в сенсорній електроніці, в тому числі при реалізації вимірювальних перетворень для аналізу акустичного поля. Завдяки своїм винятковим властивостям саме мікроструктури з монокристалічного Si, отримані груповими технологічними методами мікроелектроніки, демонструють високу ефективність у багатьох застосуваннях та розширюють функціональність традиційних сенсорів. В результаті більшість сучасних сенсорних пристроїв проектується на основі монокристалічного кремнію. Швидкий розвиток сенсорної електроніки стимулює дослідників використовувати новітні вимірювальні технології, урізноманітнювати методи контрольованого створення, вивчення та застосування сенсорних мікроструктур на основі Si.

Відомі способи розширення функціональності та покращення чутливості первинних перетворювачів акустичного поля. Традиційний скалярний мікрофон у MEMS виконанні може набувати додаткової функціональності, реалізуючи можливість отримання інформації про просторовий напрямок на джерело акустичного збудження. Таким чином, мікрофон стає векторним первинним перетворювачем, що суттєво розширює сферу його застосування в область визначення просторових координат джерела акустичного сигналу.

1. МЕТОДИ ВЕКТОРНОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ

1.1 Теоретичні засади методів аналізу акустичного поля.

Теорія акустичного поля для визначення кутового напрямку на джерело акустичного сигналу дозволяє використати взаємозв'язок між вимірними параметрами акустичного сигналу, такими як просторовий розподіл амплітуди і фази акустичної хвилі, її частотні характеристики, швидкість звуку, акустичний імпеданс середовища (пов'язує амплітуду коливань тиску із коливальною швидкістю середовища в акустичному діапазоні частот), просторову картину загасання пружних коливань. Наведені взаємопов'язані параметри акустичного сигналу є найважливішими характеристиками для чисельної оцінки акустичними приладами. У найбільш простих випадках для опису полів користуються геометричній акустикою, однак часто цього підходу недостатньо для опису спостережуваних явищ. В такому випадку використовують поняття і математичний апарат хвильової акустики.

Акустичним полем називають область простору, пружні коливання в точках якого визначаються їх просторовим розташуванням відносно об'єкта, що породжує це поле: випромінювача, відбивача, межі розділу середовищ. Параметри акустичного поля залежать від наступних факторів:

- розміру перетворювача;
- конструкції перетворювача;
- типу перетворювача;
- робочої частоти коливань;
- тривалості імпульсу;
- властивостей пружного середовища, в якій створюється поле.

Відносною одиницею вимірювання амплітуди звукового тиску є dB_{SPL} - рівень звукового тиску P_{rms} , вимірний в децибелах відносно референтного значення $P_{ref} = 20$ мкПа, прийнятого за межу чутливості (поріг чутливості) людського вуха, який визначається як:

$$dB_{SPL} = 10 \log_{10} (P_{rms}/P_{ref})^2 = 20 \log_{10} (P_{rms}/P_{ref}) \quad (1.1)$$

Традиційно прийнято визначати також векторну характеристику акустичного поля, а саме інтенсивність звуку. Інтенсивність звуку (**I**) - це величина, яка характеризує потужність звукової хвилі в напрямку її розповсюдження. Також інтенсивність звуку характеризують як густину потоку звукової енергії, виміряну у [Вт/см²]:

$$I = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{dS} dt \quad (1.2)$$

В акустичних перетворювачах часто також використовують ефект зміни частоти акустичного сигналу при переміщенні джерела відносно приймача з певною швидкістю, що називається «ефект Доплера».

Оскільки атмосферний тиск становить 10⁵ Па (одна атмосфера, один бар), то атмосферний тиск на рівні моря складає 194 дБ відносно P_{ref}. Кілька інших приблизних цифр для довідки: рівень інтенсивності звуку на відстані 3 м від реактивного двигуна становить близько 140 дБ, на рок-концерті – порядку 120 дБ, працюючий пилосос - 100 дБ (поріг чутності на 1 кГц дорівнює 0 дБ).

Потік енергії в звуковому полі ізотропного точкового джерела зменшується приблизно за залежністю 1/d², так що зміна відстані до точки спостереження в десять разів призводить до втрати звукового тиску на 20 дБ. Рівні тиску, що представляють інтерес для інфразвукового моніторингу, зазвичай знаходяться на рівні мікробар, або близько 75 дБ.

Враховуючи ймовірну важливість енергетичних складових сигналу на частотах, що перевищують класичний режим інфразвуку, важливим було провести у даному звіті огляд сенсорної технології як існуючих на ринку перетворювачів, так і тих, що розробляються. Ця інформація буде важливою для оцінки компромісів

ціна/продуктивність в акустичних сенсорних масивах, які будуть в роботі описані далі. Однією з задач є створення тестового стенду звукового масиву, розміщеного спільно з "класичною" інфразвуковою решіткою, з метою полегшення оцінки різних технологій та моделей. Тут доцільно використовувати сучасну технологію «Інтернету речей» (IoT- Internet of Things) і комерційний прогрес у бездротових розподілених сенсорних мережах (WSN – Wireless Sensors Networks). Такі польові виміри матимуть важливе значення для розуміння системних алгоритмів обробки акустичних сигналів у майбутніх операційних звукових масивах.

Однією з актуальних задач розробки векторного акустичного сенсора спеціального призначення є виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Перспективним напрямком вирішення даної проблеми є використання інформації, що надходить каналами різної фізичної природи. Її специфіка пов'язана з низькою помітністю БПЛА як в електромагнітному, так і в акустичному полях і відповідних діапазонах довжин хвиль. Оскільки сигнали як в акустичному, так і в радіолокаційному діапазонах модулюються частотою обертання ротора (колінчастого вала) двигуна, то з'являється можливість сумісної обробки цих сигналів за ознаками взаємної кореляції. Метою досліджень в цьому напрямку може бути розробка методу виявлення акустичного джерела (напрямку на нього та відстані до точки спостереження) на основі аналізу його акустичного шуму в низькочастотному діапазоні. Для виявлення сигналів акустичного випромінювання джерела на значній відстані необхідно проводити векторний аналіз прийнятого сигналу, для чого необхідно побудувати належну схему виявлення або на масиві скалярних сенсорів, або – що значно перспективніше - на одиночних векторних сенсор-них пристроях, в якій доцільно використати характерні спотворення сигналу джерела, наприклад, «гвинтової» модуляції акустичного шуму БПЛА.

Оскільки акустичний сигнал можна представити у вигляді суми гармонік з кратними частотами і невідомими випадковими початковими фазами, а відбиті від лопатей гвинта радіосигнали через жорсткість структури елементів гвинта мають когерентну структуру, доцільно проводити їх кореляційну обробку. Шум, що надходить на вхід схеми обробки як по радіолокаційному, так і по акустичному

каналах, некорельований через різну природу. Це дає змогу виявляти з високим рівнем ймовірності БПЛА за наявності як пасивних перешкод, так і гармонічних акустичних сигналів, не пов'язаних з його шумом.

На відміну від скалярного первинного перетворювача (ПП), який дозволяє вимірювати лише скалярний сигнал звукового тиску, акустичний векторний сенсор (АВС, англ. AVS - acoustic vector sensor)[44], відомий також як векторний мікро- чи гідро-фон, може складатися з трьох подібних ортогонально орієнтованих локальних (точкових) векторних акустичних ПП швидкості часток середовища. При належному просторовому розташуванні (наприклад, взаємно-перпендикулярному) один відносно одного трьох таких ПП у точка-подібній геометрії можлива реалізація тривимірного векторного аналізатора акустичного поля. Таким чином, AVS дає можливість аналізувати акустичне хвильове поле як векторне поле; він може вимірювати звуковий тиск скалярним мікрофоном і додатково визначати векторну характеристику – векторну швидкість частинки середовища (або прискорення) в локальній точці простору. AVS має низку переваг, таких як частотно-незалежна просторова дипольна діаграма направленості в чутливості - істотна перевага, що надає можливість подавлення ізотропного шуму, та відсутність неоднозначностей у визначенні лівих і правих складових джерела сигналу. Такі функції первинного перетворювача можуть забезпечити нові способи вирішення багатьох акустичних задач. При цьому функціональність акустичної системи вимірювання може бути значно розширена і покращена.

З розвитком MEMS технології розробки сенсорів та інструментів обробки сигналів первинні перетворювачі AVS в цілому стали широко використовуватися у військовому та цивільному застосуванні.

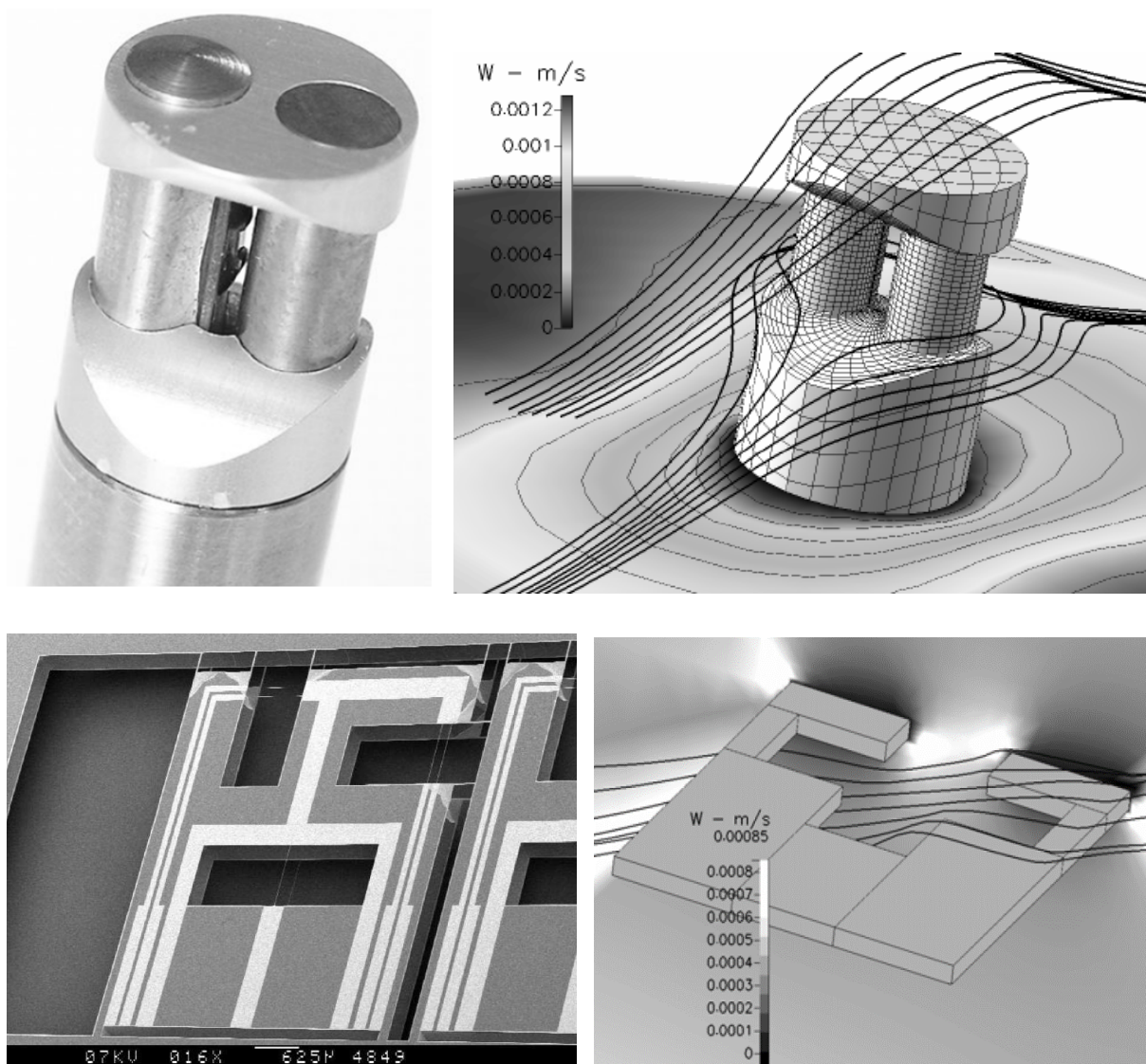


Рис. 1.1 – Акустичний векторний сенсор - потоковий мікрофон Microflown з розрахунковою візуалізацією потоків середовища через елементи конструкції первинного перетворювача [29,30].

Основний фізичний механізм вимірювального перетворення при визначенні лінійної швидкості середовища методами активного нагрівання[29] передбачає оцінку частки теплових втрат теплогенеруючого елемента (ТГЕ) в середовище, обумовлену його механічним рухом (термоанемометричний метод), або аналіз зміни просторового розподілу температури в теплоізольованій структурі (ТІС) і в потокоформуючому каналі в околиці ТГЕ (калориметричний метод). Визначення лінійної швидкості середовища методами активного нагрівання передбачає оцінку частки теплових втрат ТГЕ в середовище, обумовлену його механічним рухом

(термоанемометричний метод), або аналіз зміни просторового розподілу температури в ТІС і в потокоформуєчому каналі в околиці ТГЕ (калориметричний метод). Розв'язок задачі теплообміну в точній постановці вимагає знаходження спільного розв'язку наступних рівнянь:

- рівняння Нав'є – Стокса для нестискуваного середовища (рівняння моментів):

$$-\gamma_{Fl} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \eta_{Fl} \cdot \nabla^2 \vec{V} = \vec{\nabla}(\Delta P) + \gamma_{Fl} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} + \gamma_{Fl} \vec{g}; \quad (1.3.)$$

- рівняння нерозривності струменя в каналі :

-

$$\text{div } \vec{V} \equiv \frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} = 0; \quad (1.4)$$

- рівняння переносу енергії в заповненому середовищем каналі для поля температури $T(x;y;z)$ в рухомому потоці без урахування виділення тепла за рахунок виконання роботи силами тертя і стискання :

$$\frac{dT}{dt} + V_x \frac{dT}{dx} + V_y \frac{dT}{dy} + V_z \frac{dT}{dz} = a_{Fl} \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right); \quad (1.5)$$

- рівняння кондуктивного переносу тепла в елементах ТІС з врахуванням джерел тепловиділення і теплообмінних поверхневих процесів:

$$k_m d_m \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) = -q + H(T - T_{н.с.}) + C_m \gamma_m d_m \frac{dT}{dt}, \quad (1.6)$$

де γ_{FI} [кг/м³], $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ [м/сек], η_{FI} [Па·сек] та ν_{FI} [м²/(сек)] – відповідно густина, швидкість, кінематична та динамічна в'язкість середовища в каналі, $\nu_{FI} = \eta_{FI} / \gamma_{FI}$, t – час, (x, y, z) – координати, ΔP – диференціальний тиск [Па], k_m , d_m та C_m – відповідно теплопровідність, товщина, питома теплоємність мембрани ТІС, $g = 9,8$ [м/(сек²)] – прискорення земного тяжіння, a_{FI} – температуро-провідність середовища, $a_{FI} = \frac{k_{FI}}{C_{FI} \cdot \gamma_{FI}}$ [м²/сек], $q(x, y, z)$ [Вт/м³] – об'ємна густина потужності джерел тепловиділення, H – коефіцієнт теплообміну з поверхні ТІС [Вт/(м² · °С)].

1.2 Приймачі акустичних сигналів.

Сенсори, які чутливі до звукових хвиль, що розповсюджуються в повітрі чи в інших газах, зазвичай називають мікрофонами; перетворювачі, що чутливі до акустичних хвиль у воді називаються гідрофонами; а сенсори акустичних хвиль в твердих тілах – стетоскопами[41]. Основним об'єктом і його моделлю для нашого розгляду буде саме мікрофон, але на інші названі вище ППІ для наведених середовищ результати також можуть розповсюджуватися. Наприклад, в медицині вже давно використовуються стетоскопи для скалярного прослуховування звуків в грудній клітині людини, що виникають в результаті скорочень серця та легень, проходження повітря вздовж дихальних шляхів і прокачування крові судинами, тощо.

Основними параметрами скалярних акустичних сенсорів є амплітудна чутливість до зміни тиску середовища, амплітудно-частотна характеристика, динамічний діапазон чутливості. В даний час для цих цілей широко використовуються п'єзоелектричні сенсори, мікробарометри і мікрохвильові об'ємні резонатори з рухомою стінкою. Кожен з перерахованих вище сенсорів має свої переваги та недоліки. Мікробарометри і п'єзоелектричні сенсори мають високий рівень власних шумів, обмеження на ультранизких частотах (<0,1 Гц) інфразвукового діапазону, їх параметри залежать від флуктуації напруги живлення і електромагнітних наведень. Сенсори на основі мікрохвильових резонаторів з

рухомою стінкою в широкому динамічному діапазоні мають недостатню чутливість.

Більш детально зупинимося на мікрофонах. В мікрофонах для перетворення механічних коливань в електричний сигнал використовують графітовий порошок, електричний опір якого зменшується зі збільшенням тиску. Так працювали перші резистивні мікрофони. Зараз же використовують електростатичні, волоконно-оптичні, пьезоелектричні, та інші перетворювачі.

Класифікація мікрофонів:

1. За характеристикою напрямку:
 - 1.4 Ненаправлені.
 - 2.4 Односторонні
 - 3.4 Двухсторонні
 - 4.4 Вузьконаправлені
2. За типом перетворювача:
 - 2.1 Графітові.
 - 2.2 Плівкові.
 - 2.3 Динамічні.
 - 2.4 Пьезоелектричні.
 - 2.5 Ємнісні.
3. За типом зв'язку: дротові та бездротові (з радіоканалом зв'язку).

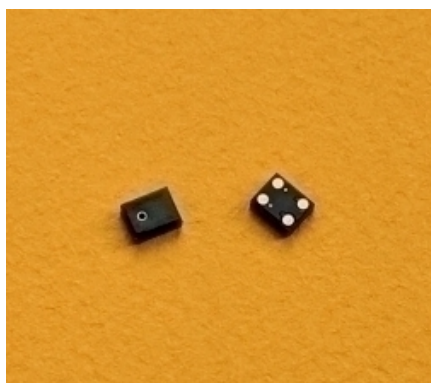


Рис. 1.2 – Мікрофон Motorola Droid Ultra [<https://motorolka.org.ua/mikrofon/mic-droid-ultra>].

Відомий також опто-акустичний лазерний мікрофон. Такий сенсор частіше всього використовується в системах прослуховування. Промінь лазерного джерела направляють на поверхню, яку збираються прослуховувати. Передача відбитого оптичного сигналу на фотоприймач забезпечує зчитування звукових коливань та обробку інформації, наступні маніпуляції з сигналом (посилення, фільтрація, тощо), з наступною можливістю прослухати через навушники чи інші джерела звуку.

Буде доречно також зазначити сенсори інфразвукового частотного діапазону. Інфразвукові хвилі з частотою від 20 Гц і нижче випромінюються внаслідок будь-яких збурень атмосфери чи земної кори, характеризуються низьким загасанням і тому поширюються в атмосфері чи земній корі на сотні кілометрів, можуть проникати крізь більшість перешкод без істотних втрат. Необхідність розробки високочутливих інфразвукових сенсорів визначається їх широким застосуванням в сейсмології для діагностики землетрусів, в авіації для фіксування і вимірювання турбулентних потоків, в метеорології для передбачення шторму і торнадо, у військовій сфері для контролю над випробуванням надпотужних вибухових пристроїв, а також в медицині. Розробка високочутливого інфразвукового сенсора з широким динамічним діапазоном протягом тривалого часу залишається надзвичайно актуальним завданням.

1.3 Порівняльний аналіз методів оцінки інтенсивності звуку.

Метод визначення інтенсивності звукового поля спирається на одночасну реєстрацію звукового тиску та вектору швидкості середовища в точці вимірювання. Для реконструювання загального вектору швидкості акустичної хвилі швидкість середовища повинна вимірюватися в трьох взаємно ортогональних напрямках.[23,27] Таку можливість надає комерційно доступний сенсор швидкості середовища за трьома осями, названий Microflown, варіанти конструкцій якого відображають прогрес технології його виготовлення; їх наведено в цій роботі по тексту нижче.

Методи визначення кутових координат джерела акустичного сигналу в низькочастотному та інфразвуковому діапазоні поділяють на наближення віддаленого джерела (плоского фронту) або джерела в ближньому полі (для точкового джерела характерний сферичний фронт)[5]. Поле віддаленого джерела проти ближнього поля: хвильовий фронт у ближньому до джерела полі випромінюваного сигналу вигнутий, а його кривизна залежить від форми і відстані до джерела. Якщо відстань стає великою, хвильовий фронт стає плоским, а джерело, як прийнято класифікувати, знаходиться в дальньому полі. Для джерел у дальньому полі можна оцінити тільки азимут - тобто, напрямок на джерело прибуття плоскої хвилі (DOA - direction of arrival)[16]. Для джерел в ближньому полі може бути оцінена їх позиція - тобто як напрямок на джерело, так і його розташування. Також істотним є наявність чи відсутність повторного відбиття акустичної хвилі під поверхонь на шляху її розповсюдження (реверберації) від перешкод: у вільному просторі випущений сигнал не відбивається від перешкод, таких як стіни, поверхня Землі, а випущений сигнал надходить до мікрофонів прямим шляхом (пряма лінія від джерела до приймача). Якщо прийнятий сигнал є сумою сигналу прямого шляху та сигналів, відбитих від стін та інших перешкод, тоді оцінка позиції реального джерела істотно ускладнюється, оскільки відбиті сигнали можна інтерпретувати як незалежне джерело.

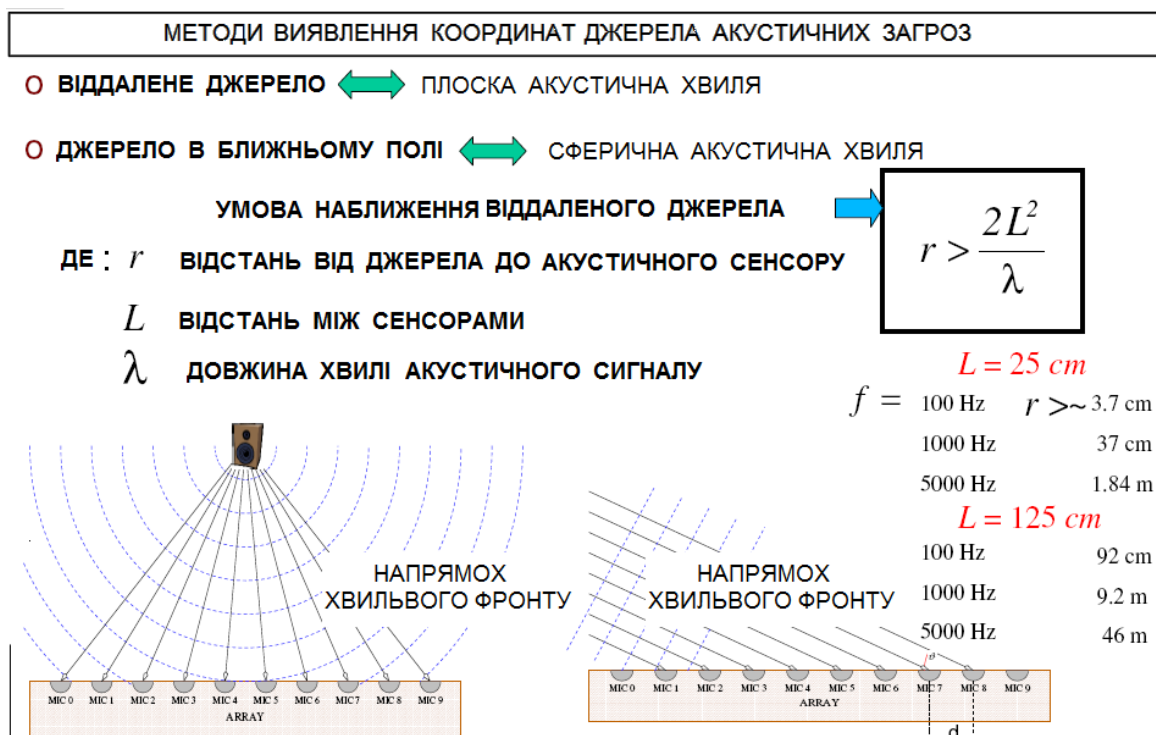


Рис. 1.3 – Взаємне розташування акустичного джерела та сенсорів в наближенні ближнього поля (зліва) та віддаленого джерела [26]

Методи пасивної локації низькочастотного звукового та інфразвукового діапазону для просторового виявлення загроз та їх ідентифікації передбачають векторне відображення звукового поля в точці спостереження (в точці розміщення кластеру низькочастотних звукових бездротових сенсорів). Векторне відображення звукового поля, в свою чергу, потребує використання відповідних первинних перетворювачів (ПП), які реалізують синхронну реєстрацію наступних фізичних величин: зміни тиску в певному частотному діапазоні та вектору лінійної коливальної швидкості часток газового чи рідинного середовища.

2. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА КРЕМНІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ СЕНСОРНИХ ВЕКТОРНИХ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1. Використання МЕМС-технології для виготовлення мікрофонів. Технологічна реалізація первинних перетворювачів диференціального тиску, швидкості середовища, потокових мікрофонів.

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) або мікросистеми складаються з мікросенсорів і мікроактюаторів, що інтегровано входять в схеми вимірювання, управління та регулювання. Такі пристрої застосовуються в різних галузях промисловості: автомобільна, авіаційно-космічна, спеціального чи подвійного призначення, біомедична, а також в сферах, пов'язаних з виготовленням периферійного комп'ютерного обладнання, систем телекомунікації, управління виробничими процесами, систем доповненої реальності[24].

Кремній загальноновизнано найкращим базовим матеріалом при виробництві мікроелектромеханічних приладів головним чином саме завдяки можливості проектування і виготовлення тривимірних структур первинних перетворювачів (сенсорів), його хорошим механічним і п'єзорезистивним властивостям. Принципово важливим фактором мікроелектронної технології є відпрацьованість технологічних операцій механічної обробки окремих компонентів виробів з субмікронною точністю завдяки використанню літографії в оптичному, ультрафіолетовому або більш короткохвильових діапазонах. Це унікальна властивість технології; жодна інша технологія механічної обробки матеріалів не здатна забезпечити подібну прецизійність форми виготовлених окремих компонентів, деталей та системи в цілому. Крім того, інтегральна мікроелектронна технологія кремнієвих напівпровідникових виробів в кінцевому підсумку робить можливою системну інтеграцію на одному кристалі сенсорів зі схемами обробки та управління чи регулювання.

У звіті будуть розглянуті переважно можливості методу глибокого фронтального і наскрізного рідинного травлення кремнію в водних розчинах гідроксиду калію КОН, однак - Реактивне Іонне Травлення (RIT) травлення діелектриків з використанням індуктивно-зв'язаної плазми також є актуальним і перспективним при розробці.

Тенденції в розвитку технології глибокого травлення кремнію - досягнення більш високої швидкості травлення (> 2 мкм/хв), більш високого коефіцієнта анізотропії травлення ($> 20:1$) і забезпечення високоточного контролю форми профілю травлення. До процесу формування мікроструктур за допомогою травлення на глибину до 10 мкм (травлення монокристалічного кремнію з фронтального боку пластини) або до глибини понад 300 мкм (травлення пластини наскрізь зі зворотного боку) висуваються особливі вимоги. До них відносяться ще більш висока швидкість травлення кремнію (більше 3 мкм/хв), забезпечення двостороннього процесу травлення із субмікронним суміщенням рисунків фронтального боку зі зворотним, можливість травлення V-подібного заглиблення заданої глибини, отримання діелектричних, напівпровідникових та кремнієвих мембран заданої товщини і т. д.

Різниця MEMC-технології від напівпровідникової полягає в необхідності отримання тривимірних (3-D) компонентів та вузлів пристроїв з глибиною механічної обробки до 300 мкм, в той час в напівпровідникових приладах глибина обробки матеріалу становить переважно декілька мікрометрів. Зараз відомо близько 20 методів виготовлення MEMC-пристроїв, що використовують базову напівпровідникову технологію, і їх кількість з кожним роком тільки зростає. Назвемо найбільш відомі методи[26]:

- LIGA –Lithographic, Galvanoformung, Abformung;
- SLIGA –Sacrificial LIG;
- MUMPS –Multi User MEMS Process Silicon(універсальний);
- SEM –Simultaneously Electroplating Machining;
- HARM –High Aspect Ratio Machining;
- SEIMS –Sandia Embedded Integrated;

- SUMMIT –Sandia Ultra – Planar Multi-layer MEMS Technology;
- HARPSS –High Aspect Ratio Polysilicon Silicon.

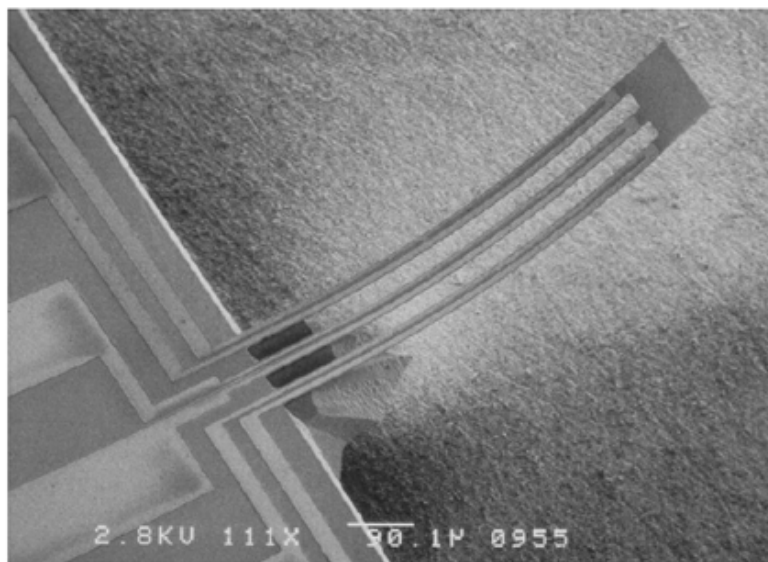
До планарної технології відносяться: MUMPS. MUMPS, SUMMIT, IMEMS. Об'ємна технологія включає в себе методи: LIGA, SLIGA, HARM. Змішана технологія включає SCREAM, HARPSS.

Об'ємна мікрообробка монокристалічного матеріалу полягає у вибіркового видаленні кремнію з одного боку підкладки для формування мембран, містків, консолей, балок, заглиблень (борозенок), наскрізних отворів і інших тривимірних структур.

Об'ємні MEMC - технології дозволяють отримувати структури з лінійним розміром до 2 мм при бокових (латеральних) розмірах елементів порядку кілька мікрон. Об'ємні методи обробки кремнію знайшли широке застосування при виготовленні різних функціональних мікроструктур: сенсорів тиску, кремнієвих акселерометрів, об'ємних мікромеханічних деталей з використанням літографії потужними рентгенівськими джерелами випромінювання – синхротронами (Технології LIGA, SLIGA), і методами травлення, що включають рідинні методи изотропного і анізотропного травлення, плазмового і реактивно іонного травлення.

Поверхневі технології MEMC використовують процеси масового виробництва IC, які включають нанесення або видалення двовимірних шарів на підкладках методами літографії і хімічного травлення. В результаті 3-D структура МСТ виходить за шаблонами 2-D-шарів. Додаткові шари виходять у вигляді тонких плівок після травлення (натравлюванням) захисних шарів. У процесах поверхневої обробки підкладка використовується як основа, на якій повинні будуватися інші структури. На підкладку (зазвичай кремнієву) наносяться тонкі плівки, які утворюють структурні шари, або служать для отримання проміжку між елементами конструкції, для чого вони пізніше видаляються і називаються жертвними шарами. Отже, в процесі використовуються плівки 2-х різних матеріалів. Для структурних шарів зазвичай використовують полікристалічний кремній, нітрид кремнію або алюміній, для жертвних шарів, що наносяться або на будь-які відкриті ділянки або на окремі механічні структури, зазвичай

використовується двооксид кремнію. Ці шари (тонкі плівки) наносяться обраним способом, після чого остаточно мокрим травленням видаляється жертвний шар для отримання остаточної структури.



Теплоізолювана структура акустичного сенсора інфразвукового діапазону консольного типу, виготовлена за методом Type II

Рис. 2.1 – Теплоізолювана структура акустичного сенсора [31]

Кремній в МЕМС, окрім електричних функціональних застосувань, виконує роль механічного конструктивного матеріалу, де насамперед треба враховувати його механічні властивості[20]. Для збереження і використання властивостей монокристалічного кремнію в процесі обробки треба мінімізувати появу поверхневих, крайових та об'ємних дефектів. Щоб досягнути зменшення поверхневих дефектів, використовують режими механічної обробки і наступного травлення поверхневого шару після механічної обробки. В поверхневих технологіях основним видом дефектів є залипання шарів після травлення «жертвних» шарів. Для зменшення кількості об'ємних дефектів потрібне зменшення температур при термообробці і уникнення внутрішніх механічних навантажень.

Складність виготовлення МЕМС-приладів спирається на кількість структурних шарів. Наприклад методи SUMMIT та SUMMIT-V забезпечують

п'ятишарові структури. Зі збільшенням кількості шарів зростають також і нерівності кожного наступного шару. Для зменшення нерівностей в процесі виготовлення використовується хіміко-механічне полірування верхніх шарів полікремнію.

Таблиця 2.1 послідовності виготовлення і товщини шарів в метода SUMMIT.

Технологічні шари	Товщина, мкм
Оксид кремнію	0,1 ... 0,63
Нітрид кремнію	0,1 ... 0,80
Полікремній(0)	0,30
Жертовний шар(1)	2,00
Полікремній(1)	1,00
Жертовний(2)	0,50
Полікремній(2)	1,50
Жертовний(3)	2,20
Полікремній(3)	2,22

Процеси глибокого травлення кремнію.

Існують три основні технології, що використовуються для глибокого анізотропного (тобто, залежного від напрямку в кристалографічній орієнтації монокристалічної заготовки) травлення кремнію: рідинне хімічне травлення, сухе травлення з використанням плазми (РІТ - реактивно-іонне травлення) і сухе травлення за допомогою індуктивнов'язаної плазми високої щільності. Найбільш поширеним методом є процес вологого хімічного травлення при використанні таких травників як, наприклад, водний розчин лугу - гідроксиду калію КОН. Це переважно груповий метод обробки, при якому виконується обробка одночасно декількох пластин кремнію в нагрітій ванні. Саме тому процес рідинного травлення є порівняно дешевим. Швидкість травлення при даному процесі в визначальній мірі залежить від орієнтації пластини монокристалічного кремнію. Використовується властивість анізотропії рідинного травлення, відповідно до чого деякі кристалографічні напрямки травляться значно швидше за інші, що призводить до

утворення V- подібних профілів порожнин травлення в об'ємі монокристалу. При проектуванні приладів з великою глибиною травлення (> 100 мкм) це суттєво знижує щільність їх розміщення. При використанні цього методу важко отримати високу анізотропію травлення. Швидкість травлення кремнію в цьому процесі також залежить від кількості одночасно оброблюваних пластин, що ускладнює контроль процесу. Оскільки рідинне травлення у ванні може йти одночасно з двох сторін пластини, необхідно відповідне маскування одного боку перед травленням іншого у випадку одностороннього процесу (що дещо ускладнює технологічний маршрут виготовлення виробу) або суміщення рисунків фотошаблонів на фронтальній та зворотній сторонах пластини.

Анізотропне травлення кремнію з високою швидкістю.

У багатьох випадках в процесі плазмового травлення кремнію висувуються жорсткі вимоги до величини підтравлювання під маску, селективності процесу і форми профілю. При цьому потрібна висока швидкість травлення для забезпечення потрібної продуктивності процесу.

Нижче наведено опис процесу, оптимізованого для швидкості травлення 10 мкм/хв при одночасному забезпеченні заданого профілю травлення. Швидкість травлення в цьому процесі залежить від розміру елемента, розміру пластини і величини області кремнію, відкритої для травлення на пластині (відношення закритої маскою і відкритої для травлення площ).

Кремній травиться на глибину 200 мікрон при швидкості травлення 10 мкм/хв при майже вертикальному профілі. Така висока швидкість травлення дає можливість використовувати даний вид технології для масового виробництва мікросистем з високою продуктивністю [29].

Процеси реактивного іонного травлення (РІТ) в плазмових реакторах з низькою щільністю плазми застосовуються при обробці напівпровідників досить часто. У цих процесах використовуються суміші фтор, хлор, бром - вмісних газових сумішей. Швидкості травлення кремнію при цьому зазвичай менше 1 мкм/хв, що

знижує загальну продуктивність техпроцесу. Даний процес зазвичай проводиться при подачі на підкладку високої електричної напруги зсуву, що вимагає використання або твердої окисної маски або товстого фоторезиста, а часто і того й іншого одночасно. В результаті обробки пластини можна отримати вертикальні профілі травлення, однак контролювати профіль структури на глибину понад 10 мкм досить складно. Тому при виготовленні багатьох типів мікроелектромеханічних систем, де потрібно більш глибоке травлення з точним контролем профілю, ефективно використовувати процес звичайного реактивного іонного травлення практично неможливо. Вихід зі становища знайшли в використанні для глибинного травлення кремнію реакторів високощільної плазми ($5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ і вище), зокрема реакторів індуктивнозв'язаної плазми (ICP) з використанням фторовмісних газових сумішей. Особливістю даного техпроцесу є висока щільність потоку іонів і хімічно активних частинок на поверхню оброблюваної пластини, а також низька енергія іонного бомбардування поверхні. Технологія забезпечує високу швидкість глибокого травлення кремнію і високу селективність процесу по відношенню до маскуючого покриття. При цьому одночасно досягається і висока анізотропія процесу травлення. Крім того, ця технологічна операція сумісна зі стандартною технологією виготовлення ІС, що робить її привабливою при виробництві виробів, які об'єднують на одному кристалі схеми обробки сигналу з мікроелектромеханічним (MEMS) пристроєм. Вертикальне анізотропне глибоке травлення кремнію в реакторах індуктивно-зв'язаної плазми з використанням фторовмісних газів може здійснюватися в двох режимах.

Технологія фотолітографії складається з наступних операцій:

1. Створення на поверхні підкладки захисного шару. У разі кремнієвих підкладок для цього зазвичай використовують термічне окиснення поверхні з утворенням оксидного шару SiO_2 , в інших випадках нарощують шар нітриду кремнію Si_3N_4 або комбінують ці два діелектрики.

2. На захищену поверхню пластини наносять шар фоторезисту. Найбільш розповсюджені способи – це центрифугування та розпорошення. У разі використання центрифуги крапля фоторезисту подається на центр пластини, яка притиснута вакуумом до платформи центрифуги. Рідкий фоторезист розтікається від центру до периферії, в той час як відцентрові сили рівномірно розподіляють фоторезист по поверхні пластини, скидаючи надлишки в спеціальний кожух. Для розпорошення аерозоль фоторезисту подається з форсунки на пластини, що лежать на столі, який здійснює зворотно-поступальний рух. Необхідна товщина формується поступово. Отриману плівку фоторезисту висушують до затвердіння (задублюють).

У випадку використання контактної фотолітографії на пластину, вкриту фоторезистом, накладають фотошаблон рисунком до фоторезисту та експонують його в ультрафіолетових променях кварцової лампи. Під дією світла у фоторезисті протікають фотохімічні реакції, які залежно від типу фоторезисту призводять до посилення або послаблення його розчинності в певних хімічних розчинах. Для отримання необхідного результату критично важливим є час експонування.

Рисунок маски виготовляють покроково. Спочатку з великою точністю виконують креслення окремих елементів та їх з'єднань у площині, яка паралельна основі підкладки, у масштабі від 100:1 до 1000:1. Потім з'єднують окремі фрагменти у єдиний великомасштабний трафарет і редукують (зменшують) зображення до масштабу 1:1. На наступному етапі мультиплікації розмножують зображення відповідно до кількості чіпів на пластині. На заключному етапі переносять рисунок маски на прозору плівку і виготовляють фотошаблон. Фотошаблон – пластина, на одній із сторін якої нанесена тонка плівка з позитивним або негативним рисунком елементів групи ІС в масштабі 1:1, тобто плівка має прозорі та непрозорі для випромінювання області, які визначаються топологією проектованого пристрою. Як матеріал маскуючого шару фотошаблону зазвичай використовується хром, оксиди хрому, заліза та інші, що утворюють тверді зносостійкі покриття.

2.2 Порівняльний аналіз конструкцій сучасних мікрофонів.

1. **Мікрофони тиску** є найпоширенішими пристроями, що використовуються для скалярного (одиначний ПП) та векторного (два та більше просторово рознесених ПП з наступною математичною обробкою результатів синхронних вимірювань амплітуди і фази вимірюваного сигналу) аналізу звукового поля. Мікрофони тиску мають внутрішню мембрану, яка реагує на зміну тиску середовища так само, як і барабанна перетинка людини, рухаючись коливально під дією сили тиску на поверхню мембрани. Рух мембрани трансформується в електричний сигнал перетворювальними елементами, зформованими безпосередньо в деформованих частинах ПП або змонтованими на їх поверхні, з використанням тензо- чи п'єзо-ефекту.

2. **Потокові мікрофони** - ПП коливальної швидкості часток середовища в низькочастотному акустичному та інфрачастотному діапазоні (включаючи, що вкрай важливо, нульову частоту – тобто, сигнал сталої швидкості середовища або сталого градієнту тиску). Піонерами серед названих ПП є так звані Microflowm, які спочатку були запропоновані в якості аналогів дротових анемометрів, виготовлених за електронною технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС) на кремнії. Дріт (чи тонкоплівковий терморезистор, ізолюваний від кремнієвої основи) нагрівається в результаті протікання через нього електричного струму і примусово охолоджується при обдуванні потоком середовища. Зміна температури розігрівання терморезистору викликає зміну його електричного опору, створюючи змінний електричний сигнал, залежний від швидкості потоку. Вперше процеси теплообміну перегрітої дротини з оточуючим середовищем ґрунтовно описані досить давно [King, 1914]. Виконані King аналітичні дослідження виявились досить вичерпними і за понад вікову історію розвитку були доповнені в основному лише чисельними експериментальними результатами та дослідженнями феноменологічного характеру. Основним недоліком анемометричного методу реєстрації лінійної швидкості потоку є його низька чутливість в нижній частині діапазону: метод ефективний починаючи із досить

значних швидкостей (для повітря це 0,1 м/с і вище). Такий діапазон рідко реалізується в акустичних процесах, де коливальна швидкість середовища знаходиться в істотно нижчому діапазоні (референсними значеннями акустичного тиску і швидкості повітря є відповідно $2 \cdot 10^{-6}$ Па $5 \cdot 10^{-8}$ м/с). Проте, використовуючи схожу конструкцію ПП, що включає щонайменше два розігріті дроти (тонкоплівкові терморезистори активного нагрівання, виготовлені за технологією MEMS) або один відокремлений нагрівач та два вимірювачі температури, розташовані на відстані порядку десятків – сотень мікрон один від одного, можна реалізувати альтернативний – термокондуктометричний - метод вимірювання швидкості акустичної хвилі за різницею температур між вимірювальними дротами. Такий метод забезпечує значно вищу чутливість до швидкостей повітря в нижній частині діапазону, тому може ефективно застосовуватись в акустичних вимірюваннях. Невеликий розмір таких ПП, виготовлених за технологією MEMS, дозволяє їх розміщення достатньо близько один до одного в трьох ортогональних площинах для визначення вектора швидкості акустичної хвилі в конкретній точці звукового поля, де розміщено кластер ІБС, та наступного виявлення (розрахунку) просторових координат віддаленої акустичної загрози.

3. **Акселерометри** - це ПП для вимірювання прискорення; корпус такого ПП необхідно закріпити на поверхні об'єкту, що зазнає коливань в акустичному діапазоні. **Акселерометр з гравітаційною масою** фіксує прискорення відносно рами ПП шляхом реєстрації механічних коливань підвісу. Відомі також **теплові акселерометри** без гравітаційної маси і пружних елементів, які фіксують прискорення нагрітого елементу середовища (рідини або газу) відносно нагрівача. Одно- та багато- осьові моделі акселерометрів комерційно доступні для виявлення величини та напрямку прискорення як векторної величини. Хоча досить низька вартість цієї технології робить її привабливою, той факт, що акселерометр повинен бути безпосередньо змонтований на елементах віброуючої конструкції, є одним з його основних недоліків, що обмежує практичне застосування.

4. Лазерні доплерівські віброметри (LDV) можуть дистанційно вимірювати миттєву швидкість поверхні структури, від якої дзеркально відбивається промінь лазера. Швидкість характеризується доплерівським зсувом довжини хвилі світла, відбитого від рухомої поверхні, який оцінюється за допомогою інтерферометра. Для надійних вимірювань слід досягти реєстрації відбитого променя від поверхні вібруючого об'єкта. Хоча безперервна лазерна доплерівська віброметрія (CSLDV) та скануюча лазерна віброметрія (SLDV) з механічних міркувань є неінтрузивним підходом, однак метод вимірювання – активний, що може вважатися недоліком в порівнянні з пасивними методами. До того ж висока вартість та низька гнучкість цієї технології обмежують її використання в більшості практичних застосувань.

5. Зонди інтенсивності звуку, реалізовані на двох і більше малогабаритних тискових мікрофонах, здатні забезпечувати інформацію щодо векторної енергетичної характеристики звукового поля - акустичної інтенсивності у вибраній точці простору (в точці розміщення кластеру ІБС), тобто усередненого в часі добутку змінного тиску на вектор швидкості частинок. Вектор швидкості вимірюється локально безпосередньо термоанемометричним ПП або обчислюється за виміряним градієнтом тиску в тій же точці середовища і питомим акустичним опором. Це дає змогу віддалено не інтрузивно знаходити координати акустичних джерел пасивним методом з точки простору в середовищі, куди надходять достатні для вимірювального перетворення потоки акустичної енергії (з точки, де змонтовано кластер ІБС і відбувається фіксація потоку акустичної енергії).

6. Векторний акустичний сенсор. Акустичні векторні сенсори вимірюють як акустичний тиск, так і три компоненти швидкості частинок. Таким чином, окремий пристрій має можливості просторової фільтрації, які недоступні гідрофону. Масив векторних сенсорів (VSA) має можливість забезпечити інформацію у вертикальному та азимутальному напрямках, що забезпечує високу спрямованість, що неможливо з масивами традиційних гідрофонів з однаковою довжиною і однаковою кількістю датчиків. Векторний сенсор складається з ортогонально орієнтованих сенсорів швидкості та гідрофона, всі елементи

просторово розташовані за точковою геометрією. Кожен датчик швидкості, вимірюючи одну декартову складову тривимірного (3-D) вектора швидкості частинок поля падаючої хвилі. У акустичному полі вимірювання швидкість частинок може бути здійснено за допомогою сумісної пари датчиків тиску або за допомогою інерційного датчика, що вимірює швидкість. Інерційні векторні сенсори містять інерційні складові, такі як акселерометри або геофони, які ідеально встановлені у підвішений корпус, який є нейтрально плавучим і не має режимів внутрішніх коливань. Міркування щодо проектування таких зондів, як правило, зосереджені навколо системи підвісу, оскільки цей атрибут представляє найбільшу перешкоду у розробці нового пристрою, який має розумну надійність у визначеній смузі. Інші важливі атрибути включають розмір, ефекти плавучості, в'язкість рідини, в'язкопружні покриття і т.д.

Одночасне вимірювання акустичного тиску і руху акустичних частинок в одній точці еквівалентно об'ємному вимірюванню акустичного тиску навколо точки, а оптимальним підходом до виявлення за допомогою векторних датчиків є застосування адитивних методів формування променя, тобто для підсумовування як сигналу тиску, так і сигналу руху частинок. Вихід векторного датчика є поєднанням чотирьох сигналів (3 компоненти швидкості та 1 тиску), і тому його можна порівняти з виходом масиву з чотирьох датчиків. Методи формування пучка та визначення напрямку, які були сформульовані для масивів гідрофонів під тиском і вже використовуються в сучасних системах, можуть бути застосовані і до векторних датчиків.

При векторній обробці інтенсивності сигнали тиску та руху частинок множаться або корелюються разом, щоб виміряти акустичну інтенсивність або потік потужності, а не підсумовують, так що такий підхід є неоптимальним.

Непряма оцінка інтенсивності звукових коливань як векторної енергетичної характеристики акустичного поля може реалізовуватись при використанні зонду інтенсивності p - p , який включає щонайменше два тискових мікрофони, розміщені поруч один з одним [B&K]. Розширене використання тискових мікрофонів

протягом багатьох років і суттєве покращення їх технічних параметрів підвищили популярність зондів р-р, незважаючи на внутрішні обмеження використовуваного непрямого методу. Альтернативою непрямому способу є прямий спосіб вимірювання обох величин, необхідних для обчислення інтенсивності звуку. Він використовує зонд інтенсивності р-у, який складається із вимірювача змінного акустичного тиску та сучасного ПП вектору швидкості середовища - **потокowego мікрофона** Microflow (1994).

Швидке зростання малогабаритних електронних приладів, що призначені для передачі та прийому звуку, потребує розробки нових надійних мікрофонів. Зараз є чимало областей де можна застосовувати мініатюрні мікрофони, наприклад по шуму пострілу можна визначити місцеположення снайперів, як це роблять провідні Європейські країни. В системах де є мікрофони що виготовлені за MEMS технологією, зберігають своє повторення конструкції від приладу до приладу.

Два або більше мікрофона, що працюють одночасно та синхронізовано, дозволяють побудувати систему для подавлення шуму від навколишнього середовища і підвищення якості переданого звуку в телефонах і смартфонах. Наприклад, в iPhone застосовується два пристрої з MEMS-мікрофонами для ефективного шумопоглинання. Ринок мобільних смартфонів сьогодні величезний і постійно збільшується. Для ефективного збуту свого товару багато виробників вводять нові функції, в тому числі за рахунок використання пристроїв поліпшення якості звуку мікрофону.



Рис. 2.2 – Мікрофон AKU340, випущений компанією Acustica [40]

Серед компаній, що випускають MEMS-мікрофони, - STMicroelectronics, Knowles, Sonion, MEMSTech, Infineon, Wolfson Microelectronics, Omron.

У більшості аудіопідсистем використовуються електретні конденсаторні мікрофони. Принцип роботи такого мікрофона заснований на властивості діелектричних матеріалів (Електрети) які зберігають поверхневу неоднорідність розподілу заряду протягом тривалого часу. Однак чутливість, відношення сигнал / шум і лінійність даних мікрофонів набули свій максимум в теоретичній і практичній межі, а поліпшення цих характеристик вимагає великих затрат. Крім того, такі мікрофони споживають порівняно багато енергії і не забезпечують ефективного поглинання шумів і вібрацій джерела.

Важливим недоліком електретних є низька повторюваність характеристик при їх масовому виробництві. Чутливість і частотна характеристика електретних мікрофонів можуть відрізнятися від екземпляра до екземпляру, вимірювання характеристик може бути різним у різних екземплярах мікрофона та при зміні температури, що обмежує можливості розробникам.

MEMS- мікрофони в порівнянні з електретними мають ряд переваг: висококу повторюваність параметрів при масовому виробництві; слабку залежність параметрів від температури, краще відношення сигнал/шум. Спочатку мікрофони на MEMS створювалися для застосування в слухових апаратах. Однак відмінні характеристики цих мікрофонів дозволили інтегрувати їх в пристрої побутової

електроніки, такі як навушники з інтерфейсами Bluetooth, телефони, персональні комп'ютери і відеокамери.

В мікрофонах MEMS чутлива до тиску діафрагма формується на кремнієвому кристалі. Там же розміщений і попередній підсилювач, а в мікрофонах з цифровим виходом - і АЦП.

Мікрофони Analog Devices

Компанія Analog Devices Inc. (ADI), використовує MEMS-технологію для створення сімейства мініатюрних мікрофонів з більшим показником сигнал/шум і широкої лінії відтворюваних частот. В мікрофонах забезпечується значення відношення сигнал / шум не менше 61 дБ (в деяких моделях - до 65 дБ), частотна характеристика найкращих моделей рівномірна в діапазоні частот від 0.1 до 20 кГц.

Таблиця 2.2 – Характеристики серії мікрофонів ADMP Analog Devices [40]

Тип	Тип вихідн. сигналу	Віднош. сигнал/шум, дБ	Чутлив. на част. 1кГц, дБ	Частоти кГц	Струм спож. мкА	Напруга живлення, В.
ADMP401	Аналог.	62	-42	0,1-15	250	1,5
ADMP521	Аналог.	65	-26	0,1-16	900	1,8
ADMP421	Цифровий	61	-26	0,1-15	650	1,8
ADMP441	Цифровий	61	-26	0,06-15	1400	1,8

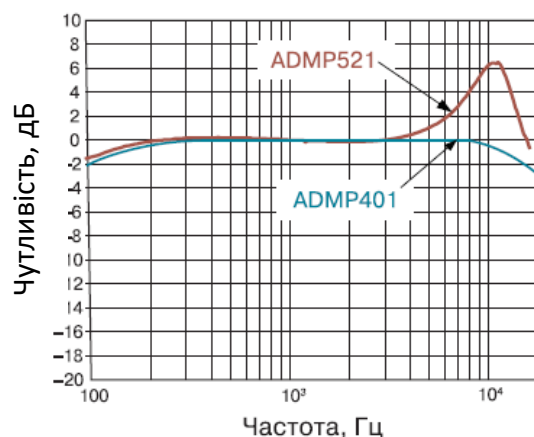


Рис. 2.3 – Амплітудно-частотні характеристики чутливості мікрофонів ADMP521 і ADMP401[40]

Частотна характеристика чутливості мікрофона ADMP521 (ця модель вважається найбільш успішним в серії) в діапазоні частот 100 Гц...16 кГц має нерівномірність на краях не більше -2 до + 6 дБ. Для їх порівняння на одному графіку зображенна також АЧХ аналогового мікрофону ADMP40.

Мала енергозатратність дозволяє збільшити час автономної роботи бездротових портативних комунікаційних пристроїв. Всі мікрофони підтримують «сплячий» режим, в якому споживання електричної енергії сильно зменшується. Наприклад, для мікрофона ADMP521 струм споживання в такому режимі не більше ніж 1 мкА, а час переходу в режим сну і навпаки приблизно 1 і 10 мс відповідно.

Для аналогових мікрофонів чутливість в логарифмічних одиницях визначають за формулою:

$$S_{dB} = 20 \lg \left(\frac{S_{mv}}{S_{REF}} \right) \quad (2.1)$$

де S_{REF} - опорне значення чутливості, чисельно дорівнює 1000 мВ / Па.

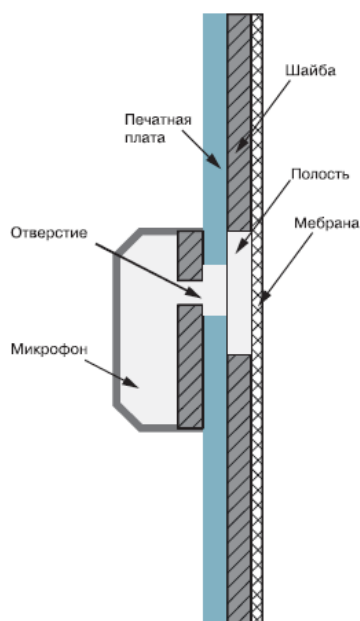


Рис. 2.4 – Рекомендована конструкція кріплення MEMS-мікрофона [40]

Аналогові мікрофони мають широкий діапазон чутливості. Кращі з них мають чутливість -70 дБ і містять вбудований підсилювач з малим рівнем шуму і високою чутливістю. MEMS-мікрофони на сьогоднішній день поки-що мають більш низькі значення чутливості.

Так як всі MEMS-мікрофони конструктивно виконані в корпусах, призначених для поверхневого монтажу, і отвір, через яке в мікрофон потрапляє повітря, розміщуються на його дні і в друкованій платі необхідно просвердлити отвір більшого діаметра, ніж діаметр отвору мікрофона.

Для захисту мікрофона від попадання в нього вологи, пилу і бруду на плату кріпиться мембрана з еластичного матеріалу[34]. Для зменшення нерівномірності АЧХ мікрофона між платою і мембраною слід закріпити круглу шайбу, діаметр отвору якої більше діаметра отвори в платі. формована при цьому порожнину утворює акустичну камеру, яка і забезпечує вирівнювання частотної характеристики мікрофона на верхніх частотах.

У випадку мікромеханічного мікрофона термомеханічний шум може стати

більшим, ніж електронний шум, якщо дизайнер також не обережно ставиться до шуму акустичної схеми. На невеликих розмірах потік окремих молекул повітря, що потрапляє на мембрану мікрофона, породжує еквівалентний шум вхідного тиску. Цей шум можна розрахувати так само, як тепловий шум в електричному ланцюзі. Слід зазначити, що, хоча відношення зміни ємності до номінальної ємності є очевидним способом визначення чутливості, збільшення постійного струму полегшує створення нижчого еквівалентного вхідного шуму і для електроніки. У технологіях MEMS зазори можуть бути значно меншими, ніж у звичайно зібраних мікрофонах, тому це може заповнити меншу площу електрода.

Приглушення вібрації, яке порівнює зміщення діафрагми через тиск звуку до зміщення внаслідок інерційних ефектів (наприклад, удари мікро-фона), також покращується за рахунок використання діафрагм малої площі.

2.3 Розробка акустичних сенсорів швидкості середовища на основі кремнієвих мікроелектромеханічних структур.

Акустичний сенсор низькочастотного діапазону є типовим представником мікроелектромеханічної системи (МЕМС) на монокристалічному кремнії. При його проектуванні та виготовленні використовують загальноприйняті в МЕМС індустрії на поточний момент технологічні операції. В першу чергу мова йде про процеси із наступного переліку:

- двостороння поліровка кремнієвої пластини орієнтації $\langle 100 \rangle$,
- виготовлення фотошаблонів,
- формування діелектричних шарів на поверхні кремнію,
- металізація,
- нанесення фоторезисту,
- проведення фотолітографії (часто – двосторонньої),
- металізація методами магнетронного нанесення,
- формування вікон в діелектрику,
- анізотропне рідинне травлення монокристалічного кремнію у водних розчинах гідроксиду калію з фронтального чи зворотного боку пластини з метою отримання вивільнених просторових дво- та три-вимірних структур,

- анізотропне плазмохімічне та іонно-променеве травлення матеріалів з метою отримання просторових структур істотно виродженої геометрії,
- розрізання пластин на кристали,
- формування специфічних мікрокомпонентів, що забезпечують або оптимізують процес вимірювального перетворення або виконавчої функції (потокоформуєчих каналів, сопел і т.д.)
- монтаж кристалів в спеціалізований корпус,
- розварка контактних площадок кристала на контакти корпусу, калібрування перетворювача на специфічний вплив середовища

Найбільш важливою складовою розробки акустичного сенсора в MEMS виконанні є його конструктивно обґрунтована технологічна реалізація. Саме вона безпосередньо впливає на отримані вимірювальні характеристики структури на поверхні монокристалічного кремнію, а правильне проведення самого процесу дає змогу отримати більш точний та чутливий сенсор, та також більш ергономічний та мобільний, але не завжди продуктивніший.



Рис. 2.5 – Блок -схема проектування MEMS-систем [45]

При вивченні мікросистем, наслідки пропорційного зменшення розмірів представляють особливий інтерес. Тобто приймається, що всі розміри і кути

залишаються у фіксованому співвідношенні один з одним, а змінюється тільки масштаб довжини, наприклад, припустимо ізометричний масштаб. Механічні процеси описуються відповідними характерними числами, які повинні залишитися незмінними, для того, щоб процеси залишилися такими ж. Деякі числа залежать від розміру системи, а інші незалежні від нього. При лінійному зменшенні розмірів «масові» сили зменшуються в кубі, а «поверхневі» тільки в квадраті. Зростає вплив в'язкості, в пристроях різних приводів (що врівноважують, резонаторах тощо) найефективнішими виявляються електростатичні, а не звичні електромагнітні. Платою за малі розміри часто виявляється падіння чутливості, збільшення ролі теплових шумів. Ставка на чутливіші напівпровідникові перетворювачі може обернутися збільшенням температурних похибок.

Microflown - це акустичний сенсор, який вимірює коливальну швидкість частинок середовища замість реєстрації коливань тиску, як те роблять звичайні мікрофони. В літературі присутня аналітична модель такого ПП [], яка описує фізичні процеси, що керують поведінкою його і визначають чутливість. Примусовий конвективний теплообмін двох розміщених ортогонально ПП в середовищі розповсюдження акустичної хвилі викликає асиметричне збурення температурного профілю навколо терморезисторів ПП, в результаті чого відповідних змін зазнає їх різниця температур. Аналітично ця різниця температур, що визначає чутливість ПП, розраховується за теорією збурень; залежна від частоти акустичного збурення поведінка чутливості проаналізована; виявлено, що є два важливих значення частоти сигналу, перше з них пов'язане з характерним часом дифузії тепла, а друге - з власною теплоємністю місткових нагрівачів-сенсорів первинного перетворювача.

Також цей акустичний датчик можна використовувати для виміру потоків постійного струму, які можна приймати за швидкість частинок з частотою 0 Гц. В професійній акустиці Microflown використовують як низькочастотний додатковий мікрофон[43]. Через малі габарити та виробництва на основі кремнію, цей датчик дуже можна застосовувати при розробці телефонів, або звукових карт.

Акустичний датчик Microflowн, не вимірює значення тиску в повітрі, а натомість він вимірює швидкість частинок в повітрі за допомогою двох резистивних смужко-подібних пластин, які нагріваються до високої температури. Рух рідини чи газу або їх частинок називають потоком, звідси і назва Мікрофлоун. Прилад вже давно став комерційно доступним.



Рис. 2.6 – Символи позначення Microflowн і мікрофона [42]

Як можна зауважити, символи позначення мікрофона і Microflowн, відрізняються. А саме, дві вертикальних лінії в символі Microflowн це два датчика температури, а в мікрофона це мембрана.

Microflowн виготовляється за мікромеханічною технологією на кремнії. Прилад був успішно реалізований у вигляді консольного типу, мостового, та у вигляді пластини.

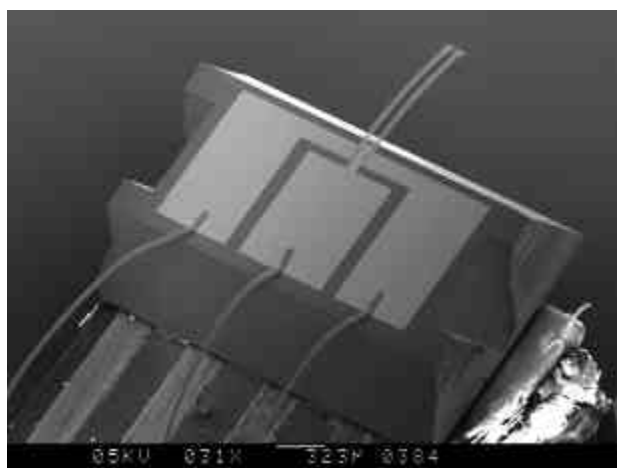


Рис. 2.7 – Фотографія сенсора Microflowн консольного типу, отримана з використанням скануючого електронного мікроскопа (SEM) [42]

Два дроти, що стирчать, - це сам Microflown, три квадрати - це контактні площадки, які використовуються для електричних з'єднань, а три дроти в нижній частині зображення – це алюмінієві дроти діаметром 80 мкм.

Перший Microflown був виготовлений в консольному виді. Тоді передбачалося, що дроти-консолі зондування повинні бути вільними в звуковому полі. Однак з часом при аналізах експериментів було вирішено, що дроти повинні бути більш жорсткими, а для забезпечення чутливості на високих частотах (тобто для високих тонів) дроти повинні бути якомога тоншими. Мостовий тип сенсора використовується сьогодні, оскільки він може відповідати цим вимогам. Провід датчика затискається з обох сторін, що покращує механічну стійкість. Розміри містка: довжина - 1мм, ширина - 5мкм, а товщина - 200 нм провідного прошарку плюс 150 нм – товщина підкладки нітриду кремнію.

Виготовлення сенсорів «Microflown» у чистому приміщенні вимагає певної кількості стандартних етапів процесу. Перш ніж проводити будь-який технологічний процес, пластини потрібно очистити. Це як для уникнення забруднення обладнання, так і для впевненості, що процеси починаються з очищеними пластинами. Після очищення на пластину наноситься тонкий (300 нм) шар нітриду кремнію. Цей шар використовується як маска для вологого хімічного травлення і як підкладка електропровідного містка – в кінцевій конструкції приладу.

Після нагрівання пластини для затвердіння фоторезисту її кладуть під маску і висвітлюють. Світловий малюнок в подальшому процесі буде видалений. Для створення датчиків та скляних панелях шар платини (200 нм) наноситься методом розпилення. Цей шар буде власне сенсорним шаром і провідниками для встановлення електричних з'єднань з друкованою платою.

Коли візерунковий шар платини готовий, шар нітриду кремнію травиться. Таким чином, мокрий хімічний травник може вивільнити містки чи консолі консолі, зробити їх завислими в повітрі. Перш ніж це може відбутися, знову потрібно виконати етап фотолітографії. де знімається шар фоторезисту, також буде

видалений шар нітриду кремнію. Шар нітриду кремнію видаляється реактивним іонним травленням. Вологий анізотропний вологий хімічний травник (KOH) створить канал і очистить консольні мости.

Принцип роботи сенсора Microflow.[6-9] Місткові терморезистори Microflown реалізовані у вигляді платинових резисторів і живляться електричним струмом, що забезпечує розсіювання на них заданої електричної потужності[38]. Це призводить до її контрольованого нагрівання завислої в повітрі вивільненої від корпусу місткової структури. Підвищення її температури також призводить до збільшення опору. Якщо швидкість частинок відсутня, датчики матимуть типову робочу температуру приблизно від 200°C до 400°C , і все тепло передається в навколишнє повітря. Коли присутня швидкість частинок середовища, вона асиметрично змінює розподіл температури навколо резисторів. Різниця температур двох бокових по відношенню до центрального нагрівача сенсорів кількісно визначає швидкість руху частинок.

Швидкість частинок призводить як до зміни різниці температур бокових проводів, так і до зміни температури центрального нагрівача три-місткової структури; оскільки це лінійна система, ці розподіли температур не залежні. Завдяки конвективному теплообміну між елементами, місток, що геометрично знаходиться перед центральним нагрівачем, зазнає більш інтенсивного охолодження, а «нижчий» по потоку сенсор – навпаки, більше нагрівається. Завдяки такому принципу роботи мікрофлоун може розрізняти «позитивний» і «негативний» напрямок швидкості середовища, тобто є векторним.

Для великих просторових інтервалів між датчиками ефекти одновимірного конвективного теплообміну (завдяки швидкості частинок) зменшуються за рахунок тривимірної дифузії тепла. Іншими словами, для великого інтервалу між датчиками конвективна передача тепла не досягає іншого датчика, і через це температура датчиків не змінюватиметься. Якщо датчики розташовані дуже близько один до одного, різниця температур майже неможлива, оскільки різниця температур

призводить до відносно великої дифузійної теплопередачі в протилежному напрямку. Отже, три-компонентний сенсор підлагає обов'язковій оптимізації геометричних розмірів.

На більш високих частотах чутливість Microflown зменшується. Високочастотна втрата чутливості спричинена дифузійними ефектами (критичним є час, протягом якого тепло кондуктивно передається від одного дроту до іншого). Ефект експериментально може бути оцінений за спадом амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) першого порядку.

Хороше наближення АЧХ мікрофлоуна можна описати за допомогою наступної залежності:

$$output = \frac{LFS}{\sqrt{\left(1 + \frac{f^2}{f_{headcup}^2}\right) \sqrt{1 + \frac{f^2}{f_d^2}}}} \quad (2.2)$$

LFS - низькочастотна чутливість сенсора - вихідний сигнал на частотах нижче кутової частоти теплової дифузії.

Основна модель частотно-залежної[40] поведінки внаслідок дифузійних ефектів представлена складним виразом, що містить функцію Бесселя. Що стосується частотної характеристики, цей вираз цілком може бути апроксимований поведінкою низьких частот першого порядку, однак така проста модель не може описати фазову характеристику.

Окрім захисту крихких датчиків Microflown, корпус приладу забезпечує декілька акустичних ефектів. Рівень швидкості частинок значно підвищується (від 10 дБ до 30 дБ в залежності від геометрії), а фазова реакція дещо змінюється.

Збільшення рівня швидкості частинок всередині корпусу в основному викликано каналізаційним ефектом, потік частинок "форсується" через корпус.



Рис. 2.7 – Корпус з коефіцієнтом підсилення від 9 до 13 дБ (півдюймовий зонд для визначення швидкості частинок) [42]

Електронний підсилювач для Microflow повинен задовольняти дві потреби: він повинен живити Microflow (для нагрівання датчиків), і він повинен перетворювати лише зміну диференціального опору у відповідний вихідний сигнал. Електронна схема, зображена на рис. 3.5, може задовольнити ці вимоги.

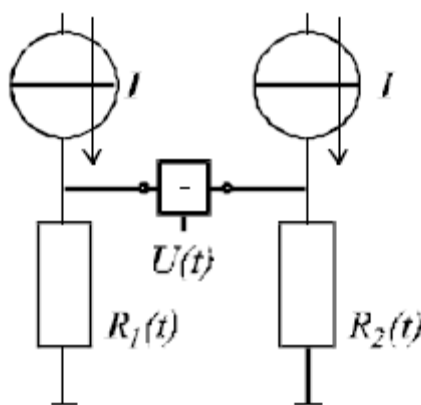


Рис. 2.8 – Схема вимірювання диференціального опору (R_1 та R_2 дроти датчика Microflow) [42]

Відношення сигнал / шум цієї схеми подається у вигляді:

$$\frac{S}{N} = \frac{2IR \frac{\Delta R}{R}}{\sqrt{4kTB_W(R_1 + R_2)}} \quad (2.2)$$

де k – стала Больцмана; T - абсолютна температура; B_W – частотна смуга пропускання.

Калібрування Microflowн. Оскільки еталонного мікрофона швидкості частинок не існує, головним завданням калібрування мікрофлону є забезпечення відомої швидкості руху частинок для зонда. Вимірювання звукового тиску в конфігурації, для якої відомий питомий акустичний опір, вирішує цю проблему. Швидкість частинок розраховується на основі частки звукового тиску та питомого акустичного опору. Кілька методів калібрування для визначення частотної характеристики Microflowн були випробувані протягом багатьох років. Найкраще вийшли три методи: калібрування у вільному акустичному полі (без відбиття, рос. «эха»), калібрування стоячої хвилі (SWT) та метод часових рамок у довгій трубці.

Microflowн є сенсором, що живиться постійним струмом, тому вплив на вітер повинен бути значним. Використання традиційного захисного лобового скла помітно зменшує вплив вітру при експериментах на відкритому середовищі, однак спотворює акустичну складову. Звукова хвиля може рухатися лише в одному напрямку.

У стоячій хвильовій (жорстко закритій з протилежного кінця) трубці з встановленими боковими стінками весь звук відбивається на протилежному до джерела кінці трубки [15]. Питомий акустичний імпеданс SWT всередині такого резонатора можна обчислити, вирішивши хвильове рівняння. Повітря збуджується поршнем або гучномовцем (у лівій частині Рис. 2.9 показано джерело сигналу у вигляді рухомого поршня); сигнал реєструється референтним сенсором тиску P_{ref} на правому кінці хвилевода.

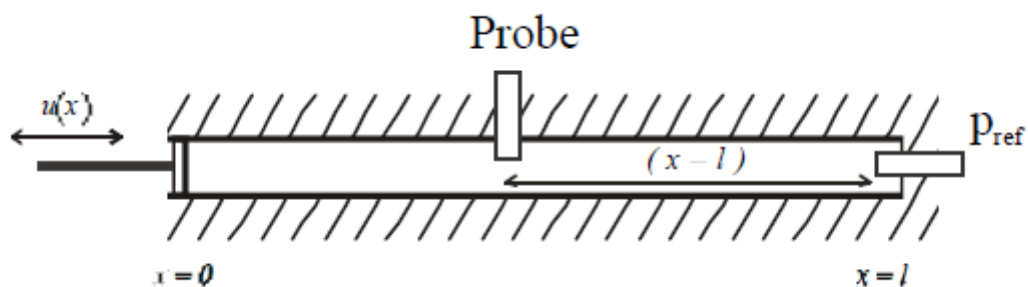


Рис. 2.9. – Трубка, яка жорстко закритаа при $x = L$ і в якій газ чи рідина приводиться в коливальний рух вібраційним поршнем при $x = 0$ [42]

Microflown також успішно використовується в установках стоячих хвиль для визначення коефіцієнта відбиття акустичних матеріалів. Перші експерименти показали, що результати трубки Кундта (яка працює з двома мікрофонами) можуть бути повторені з двома мікропотокowymi сенсорами із задовільними результатами. Пізніші дослідження показали, що можна по-іншому визначити коефіцієнт відбиття.

Якщо бічна і права кінцева стінки трубки-резонатора повністю відбивають звукові коливання, тоді весь звук, що генерується в трубці на лівому кінці, відбивається на правому кінці. Отже, інтенсивність звуку (чистий потік звукової енергії в одному напрямку) в трубці дорівнює нулю. Якщо, з іншого боку, зразок справа повністю поглинає звук, інтенсивність звуку буде великою, залежно від сигналу, який генерується гучномовцем. Гучність можна визначити за іншою акустичною величиною - щільністю звукової енергії. Співвідношення інтенсивності та енергії є мірою для коефіцієнта відбиття.

Визначення параметрів тривимірного акустичного поля

Для повної характеристики тривимірного акустичного поля необхідно визначити як швидкість акустичної частинки, так і тиск. За допомогою сенсора

швидкості частинок, який доповнює звичайний сенсор тиску, стає можливим повне визначення тривимірного акустичного поля, включаючи потоки інтенсивності та різні внески джерела. Для цього використовується мікродатчик швидкості частинок, що складається з щонайменше двох (можливо – трьох) паралельних нагрітих проводів довжиною близько 1 мм і рознесених на відстань близько 300 μm один від одного.

Для двопровідної конструкції можна використовувати двосторонній процес наскрізного анізотропного травлення. Спосіб виготовлення сенсора швидкості частинок середовища - розміщення дротів датчика (містків) по обидва боки кремнієвої пластини. Коли кремній між проводами датчика повністю витравиться, результатом може бути як (одно) площинна орієнтація містків, так і позаплощинний первинний перетворювач. Цей тип дизайну на сьогоднішній день є найбільш простим і має найвищі перспективи застосування. Нижче наведено деякі можливі поєднання орієнтацій двопровідних сенсорів на одному кристалі кремнію.

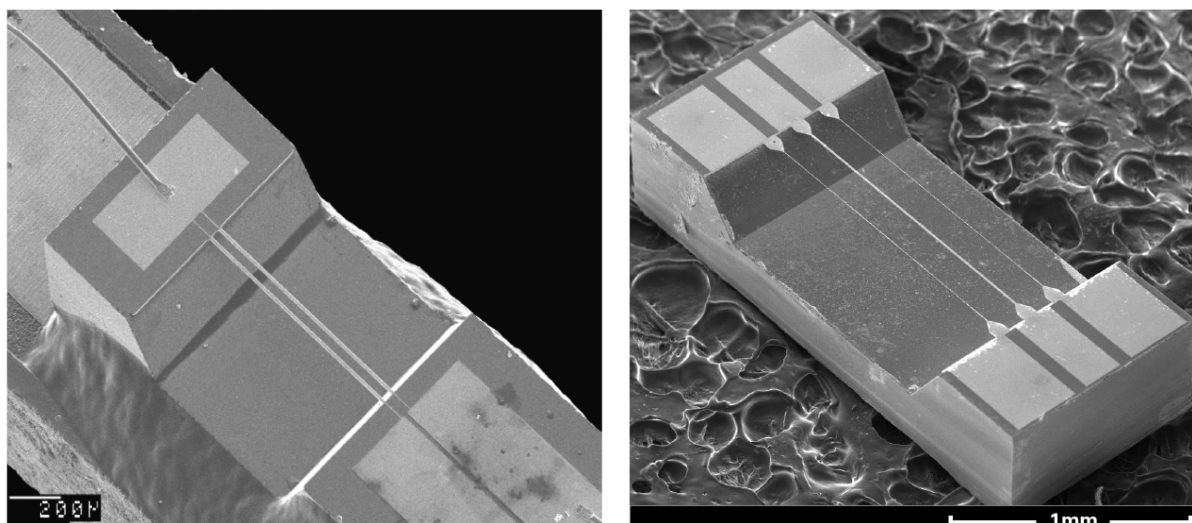


Рис. 2.10. – Одноосьовий первинний перетворювач та **трьохосьовий сенсор** лінійної швидкості середовища Microflow [20][43].

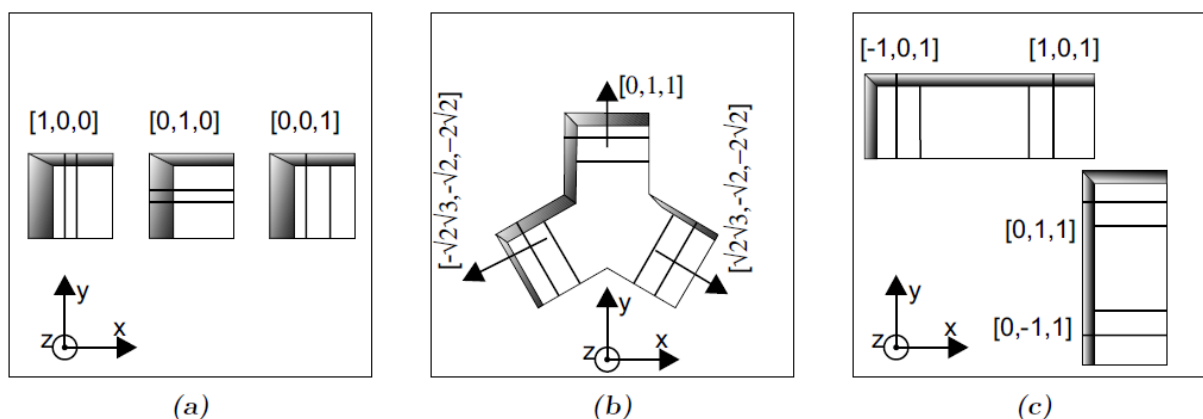


Рис. 2.11 – Варіанти орієнтацій місткових первинних перетворювачів і, відповідно, складових чутливостей вздовж кожної з осей прямокутної Декартової системи координат (орієнтація осей XYZ показана на кожному з рисунків). Для прикладу: на рис. а) $[1,0,0]$ – чутливість в площині пластини вздовж осі OX, $[0,1,0]$ – чутливість в площині пластини вздовж осі OY, $[0,0,1]$ – чутливість перпендикулярно площині пластини вздовж осі OZ; рис. б) та в) – місткові первинні перетворювачі сформовані на протилежних поверхнях (фронтальній та зворотній) зі зміщенням вздовж осе OX та OY. [14]

Три пари сенсорів на одному Si кристалі: два датчики з двома парами сенсорних містків в площині пластини кремнію і один датчик наскрізний – з містками по обидва боки пластини. Подібна орієнтація може призвести до різної чутливості перетворювача вздовж кожної з осей всередині однієї мікросхеми. Така конструкція показана зводиться до комбінації орієнтації датчика, як показано на рис. 2.10 а).

Три пари містків на одному кристалі: три містки на верхній поверхні пластини і три – з нижньої сторони, як показано на малюнку 2.10 б). Всі датчики однакові, вони відрізняються лише обертанням.

Чотири пари містків на одному кристалі: дві пари містків з чутливістю, перпендикулярною один одному (містки зміщені так, щоб осі чутливості були нахилені під 45 градусів поза площиною пластини), а ще дві пари містків взаємно розвернуті на 90 градусів у площині пластини. Схематичний малюнок цієї орієнтації наведено на рисунку 2.10 с). Всі чотири пари перетворювачів однакові,

мають лише різницю в орієнтації. Перевага типу чотирьох сенсорів полягає в тому, що для кожного напрямку швидкості частинок є щонайменше два датчики, що приймають сигнал, тому можливе перехресне співставлення (віднесення) двох сигналів датчика для кожного напрямку падіння звукової хвилі. Коли перехресні кореляційні сигнали не потрібні, один з каналів можна опустити або чотири канали можна в електронному вигляді об'єднати в три канали, зберігаючи один з каналів резервним для введення аналізатора.

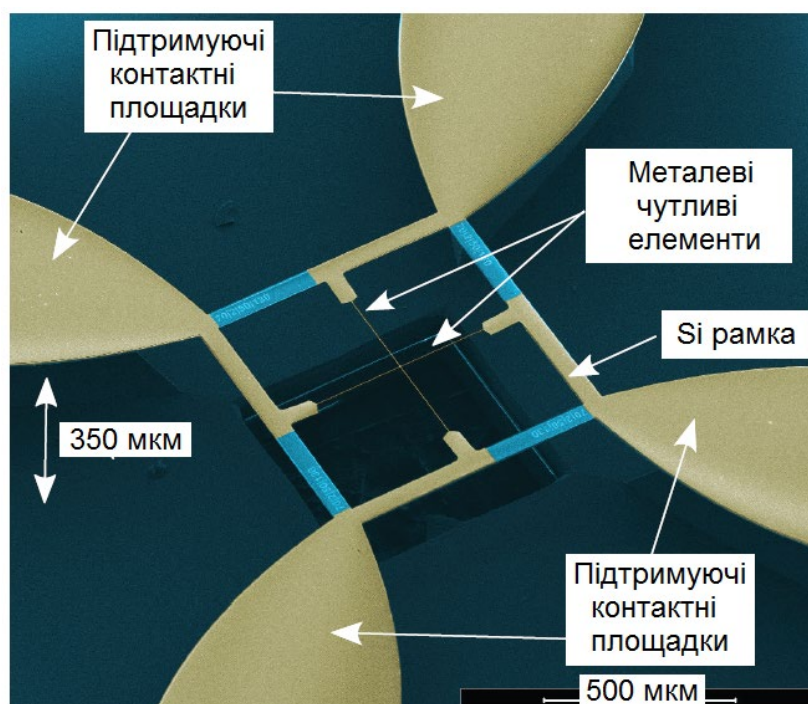


Рис. 2.12 – Варіанти орієнтацій місткових первинних перетворювачів [20]

Первинні перетворювачі, до складу яких входить три містки (один центральний нагрівач і два бокових сенсори) мають переваги завдяки більш високій частоті. Напрямки чутливості таких датчиків можуть бути подібними до напрямків для двопровідних датчиків. Виготовлення позапланарної три-місткової (три-провідної) конструкції не є простою. Деякі варіанти виготовлення тримісткового датчика описані далі.

Перший спосіб - конструювання виробів таким чином, щоб на пів-товщині перетворювача розмістити місток нагрівача. Хоча розміщення містків як на фронтальному боці пластини, так і зворотному – технологічно відносно проста

задача, розміщення містка на пів-висоті перетворювача не є простою задачею. Ідея полягає в тому, щоб почати з двосторонньо шліфованої і полірованої пластини з нанесенням містків з обох її сторін. Після формування рисунку металізації пластину протравлюють до половини її товщини і роблять центральний місток нагрівача. Процес є складним, оскільки після травлення кремнію, щонайменше є один вразливий верхній сенсорний місток. Це ускладнює обробку, а відсоток виходу придатних структур в технологічному процесі дуже обмежена.

Другий метод - використання двох окремих конструкцій. Кожна може складатися з одного кристалу із сенсорним містком на нижній стороні та містком нагрівача на верхній. Між двома проводами кремній протравлюється наскрізь, залишаючи отвір в пластині. Ще один кристал з одним сенсором і наскрізним отвором встановлюють поверх першої мікросхеми. Схематично це показано на рисунку 2.11. Недоліком є те, що точність суміщення двох кристалів безпосередньо визначає напрямок чутливості датчика. При використанні додаткових вирівнювальних виступів і прорізів можна підвищити точність монтажу. З описаного випливає, що двопровідна конструкція все ж має високі шанси мати переваги. Однак, тримісткова конструкція має більш низький рівень шуму і працює на більш високих частотах, але вимагає процесу виготовлення, який є більш складним, ніж двопровідна конструкція.

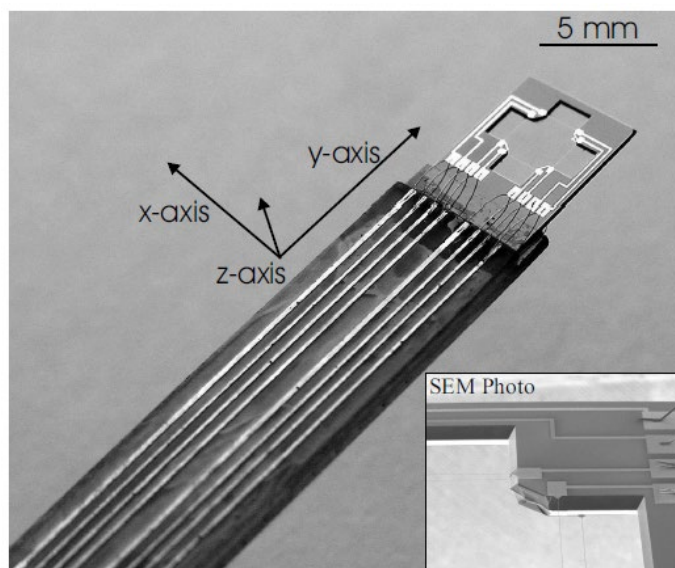


Рис. 2.13 – Триосьовий однокристальний перетворювач [14]

Для порівняння отриманих теоретично (аналітичним розрахунком) та чисельно результатів з кривою чутливості виробником розроблені первинні перетворювачі різних геометрій, а саме пристрої із різною глибиною травлення, різними відстанями між провідними містками та різною довжиною дроту. Їх характеристики відомі із джерел в переліку посилань [18-21]. Оскільки розсіювана потужність також може бути легко зміненою регулюванням напруги на дротах, стала можливою реалізація чисельно різних комбінацій. Глибина порожнини травлення l_z двохпроводних сенсорів була вибрана як 40, 80, 120, 240 і 300 мкм, довжина містків становила 500 і 1000 мм, а відстань між провідниками змінювалася в діапазоні 50, 80, 100, 200 і 300 мкм. Різні перетворювачі тестувалися в хвилеводах з еталонним мікрофоном. З отриманих таким чином кривих низькочастотної чутливості (для $f \rightarrow 0$) отримано характеристики перетворення в одиницях $[V/Pa]$ або в $[Vs/m]$. Функція чутливості характеризується трьома основними параметрами: її низькочастотним значенням $S_f = 0$, характеристичною частотою f_c та кутовою частотою зрізу, що пов'язана з теплоємністю первинного перетворювача. В рамках аналізу реалізованих виробником моделей розрахунків в цій роботі концентруємося на перших двох. Теплова потужність містків не змінювалась істотно, а розрахована величина відповідної кутової частоти, що слідує за аналітичною моделлю (3 кГц), була взята в якості константи. По-перше, розглядається низькочастотний вихід $S_f = 0$ двопровідного сенсора, як функція, залежна від взаємної відстані a між провідними містками та глибини порожнини травлення l_z під ними. Всі пристрої з комбінації a та l_z були відкалібровані в трубі стоячої хвилі. Підсумок цих вимірювань і результатів наведено на попередніх рисунках; на рисунку 2.12 зображено залежність низькочастотної чутливості від відношення a до l_z для серії вимірювань з $l_z = 240$ мкм та довжиною дроту $l_y = 500$ мкм. Спостерігається збільшення $S_f = 0$ із збільшенням l_z для всіх a при постійній потужності $P = 55$ мВт, показані результати зміни відстані між провідниками a , що підтвердило збільшення частотної полоси пропускання при зменшенні a . З наведених результатів робиться висновок, що

низькочастотна чутливість має оптимум для співвідношення a та l_z як $a \approx 0.3 l_z$. Оскільки сигнал також збільшується з l_z , до $l_y = l_z$, глибина травлення l_z повинна бути вибрана як $l_z / l_y \approx 0,5$ до 1. Що стосується характеристичної частоти, а слід вибрати якомога менше, щоб отримати більшу ширину смуги робочих частот.

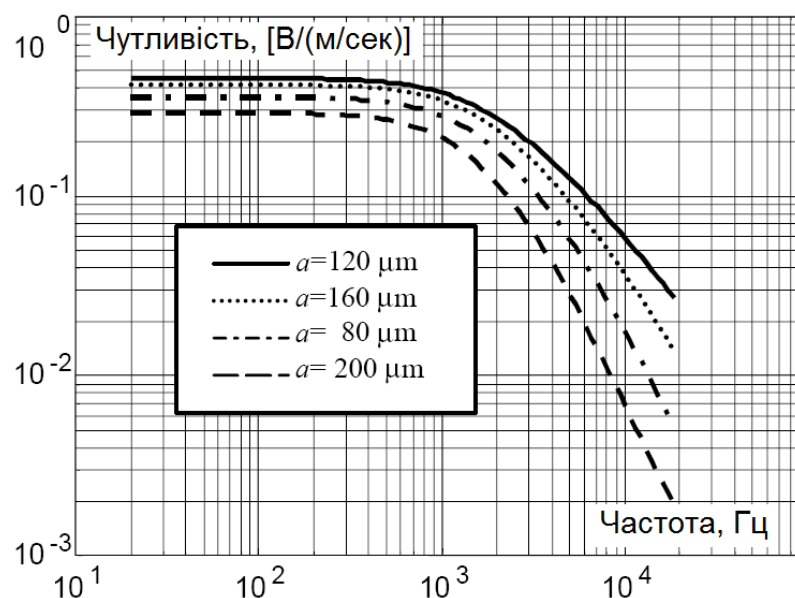


Рис. 2.14. – За матеріалами van Honschoten J.W. **Modelling and optimisation of the Microflow** / J.W. van Honschoten // Ph.D. Dissertation, University of Twente, Netherland, (2004). – 224 P.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОМЕХАНІЧНИХ СТРУКТУР ВЕКТОРНИХ СЕНСОРІВ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ

3.1 Акустичні векторні сенсори спеціального призначення.

Акустичні сигнатури як наземного поля бою, так і в підводних боях, можна пасивно використовувати для виявлення, локалізації та відстеження ворожих одиниць. Акустичні векторні датчики (AVS)[45] стали грати все більш важливу роль в цієї технології, приділяючи особливу увагу прикордонному контролю, захисту гавані, локалізації пострілів і ситуаційної обізнаності.

Будь-яке звукове поле можна описати скалярним значенням звукового тиску і тривимірним векторним значенням швидкості акустичних частинок. Датчик вектора звуку (AVS) – це 4-канальний датчик, який локально реєструватиме звуковий тиск і додатково - три ортогональних компоненти швидкості акустичних частинок. AVS - це невеликий акустичний сенсор, який здатний миттєво (без додаткової аналітичної обробки сигналів) визначати напрямок приходу сигналу від джерела звуку за відносними амплітудам трьох ортогональних компонентів у всій акустичній смузі пропускання. Таким чином, можлива локальна обробка безпосередньо на самому сенсорному вузлі. Результатом функціонування такого вузла є класифікація акустичного події із зазначенням щонайменше азимуту (або пеленга) і кута піднесення над лінією горизонту. Для деяких подій також може бути визначена відстань до джерела. У традиційних системах для визначається напрямок на джерело (DOA – direction of arrival), однак може використовуватись також часова характеристика (TOA – time of arrival) – різниця в часі приходу сигналу на синхронізовані за опитуванням мікрофони, рознесені в масив. У цього методу є деякі недоліки: великий розмір системи, обмежена смуга пропускання і втрата точності через вітер і змін температури. Акустичні вимірювання в повітрі раніше завжди ґрунтувалися на просторово рознесених наборах (матрицях) мікрофонів звукового тиску.

Акустичний векторний датчик можна розмістити на всі види платформ і він може виявити кілька одночасних акустичних сигнатур: ракети, артилерійські

зброя і міномети, постріли, безпілотні літальні апарати, гвинтокрилі і нерухомі крила (як реактивні, так і гвинтові літаки) і наземні транспортні засоби.

Акустичний векторний датчик являє собою абсолютно новий покоління акустичний датчики що вимірює абсолютно нову фізичну величину, це не просто набір мікрофонів з інтелектуальним інтефейсом.



Рис. 3.1 – Акустичний векторний датчик, що складається з мікрофона звукового тиску і трьох додаткових датчиків Microflowm [45]

Акустичні сенсори привертають значну увагу, тому що вони не використовують активного зондування середовища, тобто пасивні і тому не можуть бути запеленгованими і заблокованми супротивником.



Рис. 3.2 – Наземний сенсор на основі AVS [45]

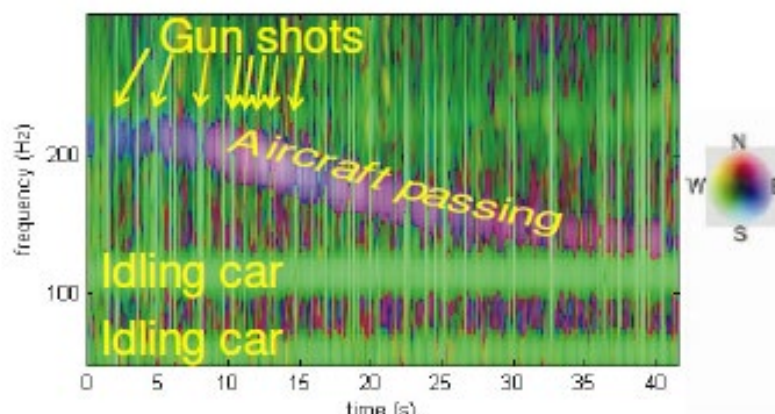


Рис. 3.3 – Обробка сигналу з датчика AVS[45]

Призначення спектру продукції нідерландської компанії **Microflow** **AVISA** полягає в забезпеченні аналізу повної 3D-акустичної ситуаційної інформованості на полі бою шляхом виявлення, локалізації та класифікації повного спектру джерел акустичних загроз, а саме: Стрілецька зброя; Ракети / Артилерія / Міномети; Платформи, що керуються двигунами (вертольоти, літаки, БЛА, човни та наземні транспортні засоби). Названа функціональність пристроїв можлива завдяки використанню Microflow - першого у світовій практиці первинного перетворювача (сенсору) акустичного поля, який вимірює вектор акустичної швидкості частинок середовища замість традиційного вимірювання скалярного звукового тиску. Основним вузлом є акустичний (Acoustic - A) багатофункціональний (Multi-Mission - MM) перетворювач (Sensor - S) сенсор AMMS, що включає векторні трикоординатні сенсори Microflow, цифрові сигнальні процесори (DSP) та захисний ковпак для захисту від впливу вітру. Виробник **Microflow** **AVISA** пропонує широкий набір варіантів "прив'язки" до наземних координат (geo referencing - геопосилання), живлення та зв'язку. AMMS є пасивним перетворювачем, тому його розташування не може бути виявлено противником, він не вимагає візуальної видимості для належного функціонування (темрява, туман, пил), а також працює в несприятливих погодних умовах (сильний дощ). Оскільки AMMS є компактним за розміром S, масою M та потужністю P (низькі показники SWaP), його можна розгорнути на всіх типах платформ, а саме: необслуговувані наземні носії, включаючи амуніцію бійця, транспортні засоби

(колісні та гусеничні), вертольоти, а також - що вкрай важливо - безпілотні літальні апарати БПЛА (UAV - квадрокоптери - чотиригвинтові малорозмірні вертольоти або гвинтові БПЛА з фіксованими крилами). AMMS на сьогоднішній день вважається «замовником гри» в задачах забезпечення інформованості про акустичну ситуацію на полі бою, пропонуючи реалізацію принципово нових доктрин.

Автомобільний мобільний акустичний багатофункціональний датчик (V-AMMS) для виявлення та локалізації вогнепальної зброї - система, заснована на унікальному та надзвичайно маленькому акустичному векторному датчику (AVS), розробленому Microflown AVISA. V-AMMS встановлюється на транспортних засобах та забезпечує екіпаж інформацією про реальну акустичну обстановку в азимуті 360 градусів. V-AMMS розпізнає вогневі позиції та відображає напрямки і відстань до джерел ворожих стрільців на простий у використанні надійний планшет. Технологія V-AMMS базується на вимірюванні спрямованої швидкості акустичної частки середовища. Ця унікальна технологія дозволяє досягти результатів визначення азимуту на джерело з точністю до 1.5 градусів. В поєднанні з низькими характеристиками SWaP робить V-AMMS цінним доповненням до будь-якого передбаченого або існуючого комплексу датчиків на борту пілотованих або безпілотних транспортних засобів. У порівнянні з традиційними мікрофонними матрицями, V-AMMS має дві основні переваги: по-перше, він надзвичайно малий і компактний завдяки Microflown's - унікальній і запатентованій сенсорній технології. Це не обмежує здатність системи надати повну акустичну інформацію, 360-градусну за азимутом. По-друге, відгуки користувачів для традиційних систем виявлення пострілів та вибухів говорили про високі помилки у виявленні координат джерел сигналів із випадково вказаними напрямками у реальному використанні місії. V-AMMS, таким чином, спеціально розроблено для підвищення продуктивності, повністю виключивши помилкові сигнали тривоги.

3.2 Структурні схеми експериментальних досліджень.

Систематично досліджуються різні конфігурації пасивного акустичного двоосного сенсору для знаходження азимуту та кута нахилу на акустичний випромінювач точкового розміру в підпросторі на основі двох ПП швидкості часток звукової хвилі, що надходить з дальнього поля. Оцінка азимуту та кута нахилу напрямку прибуття звукової хвилі можлива лише в тому випадку, якщо виконуються дві умови:

1. до складу входить два одноосних ПП, по-різному орієнтованих по азимуту та кута нахилу, а також
2. розділення двох складових одноосних ПП не перевищує половини довжини хвилі падаючого акустичного сигналу.

Різні конфігурації двоосного сенсору потребують різного рівня попередньої інформації про сектор акустичної події, пов'язаної з азимутом та кутом нахилу на джерело події. Більш точне значення кута нахилу $CRB(\theta)$ можна отримати, розділяючи два складових одноосних ПП вертикально один відносно одного. Аналогічним чином, точніше значення $CRB(\phi)$ можна отримати, виділяючи два односторонні компоненти, що розташовуються один від одного, горизонтально. Кілька способів калібрування розроблені для довільної початкової спрямованості AVS відносно джерела. Найбільш відомий метод калібрування - це метод порівняння, який використовує набір стандартних еталонних мікрофонів для початкового коригування кутів джерела сигналу за тріангуляційним методом та відповідного початкового корегування спрямованості AVS. Виконання такого калібрування вимагає використання об'єднаних випромінювачів.

Інший метод калібрування - це метод вібраційного середовища. Цей метод не потребує стандартного мікрофона як еталонного. Також AVS можна калібрувати за допомогою акселерометра за наявності відповідного апаратного та програмного забезпечення. Однак це означає, що вищевказаний метод потребує спеціального обладнання та акустичної камери, що усуває реверберацію, що робить його

незручним і високим за вартістю. Пропонуються також "самокалібрувальні" методи (також називають "сліпими" методами без попередньої інформації про DOA калібрувального джерела). Ці методи зазвичай прості, легкі в експлуатації та функціонують в режимі реального часу, але більшість з них передбачають наявність масиву скалярних датчиків та відповідного апаратного і програмного забезпечення обробки синхронно зареєстрованих сигналів.

Побудова та фізичні засади функціонування векторних сенсорів акустичної швидкості середовища.

Переваги використання триосьових векторних сенсорів в комбінації з одним скалярним сенсором звукового тиску.

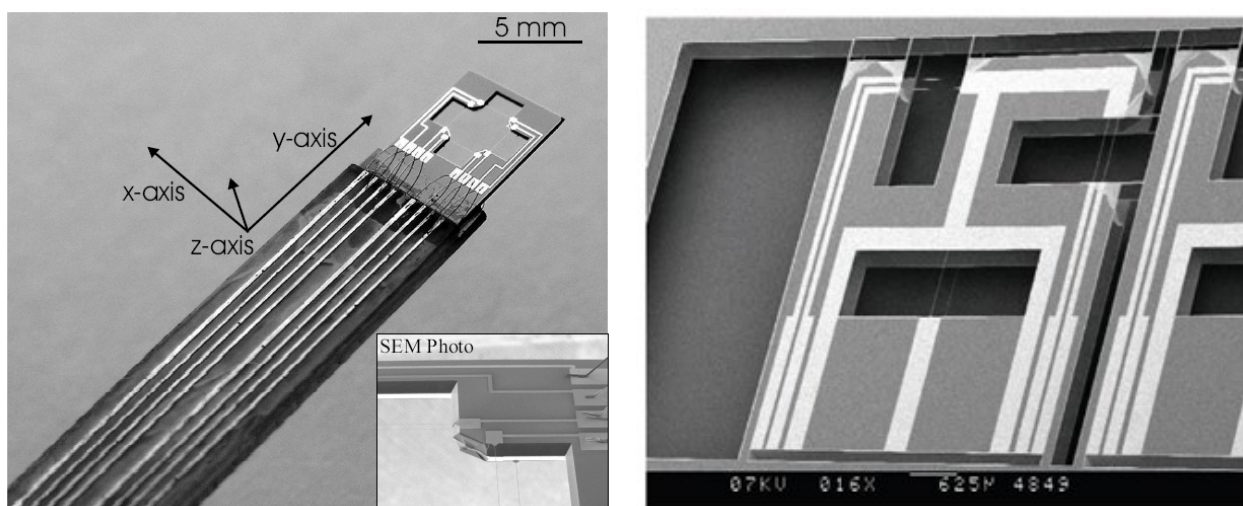


Рис. 3.4 – Триосьовий первинний перетворювач лінійної швидкості середовища Microflowm [18]

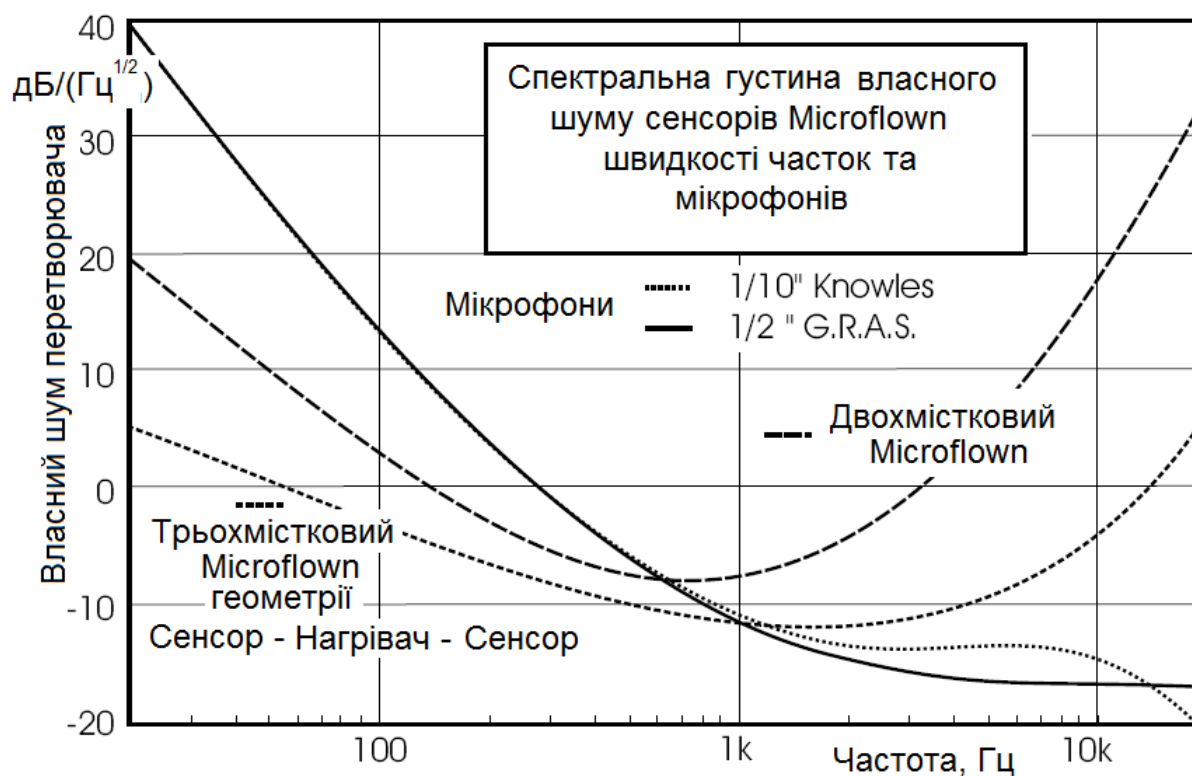


Рис. 3.5 – Спектральна густина власного шуму первинних перетворювачів Microflow, змонтованих у корпус діаметром $\frac{1}{2}$ дюйма: двохмісткового та три-місткового типу «Сенсор – Нагрівач -Сенсор» («Sensor-Heater-Sensor»). За матеріалами Yntema, Doekle. **An integrated three-dimensional sound-intensity probe.** Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands. **2008.** Для порівняння наведено також спектральну густину власного шуму мікрофонів (1/10") Knowles та (1/2") G.R.A.S.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ та ВИСНОВКИ

За результатами виконання дипломної роботи на тему «Мікромеханічний векторний акустичний сенсор низькочастотного діапазону» підібрано та опрацьовано близько 45 літературних джерел: наукових статей, оглядових робіт, монографій тощо.

Вивчено теоретичні засади скалярного та векторного аналізу акустичного поля в низькочастотному діапазоні. Проведено аналіз сучасних приймачів акустичного сигналу та різних за фізичною природою первинних перетворювачів. Ознайомлення з технологічними операціями виготовлення MEMC акустичних перетворювачів на основі монокристалічного кремнію переконливо доводить переваги цієї технології. В роботі детально проаналізовано літературні джерела на вплив технологічних і конструктивних параметрів на характеристики перетворення кремнієвих мікроструктур акустичних сенсорів, а саме вплив конструктивних параметрів на чутливість MEMC первинних перетворювачів та характеристики акустичних сенсорів типу Microflown.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. King L. V. "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires, with Application to Hot-Wire Anemometry," Proc. R. Soc. London, Vol. 90, pp. 563-570, 1914.
2. Johnson R.G. A highly sensitive silicon chip microtransducer for air flow and differential pressure sensing applications / R.G. Johnson, R.E. Higashi // Sensors and Actuators, 11 (1987) – p.p. 63–72.
3. Lammerink Theo S.J. Micro-liquid flow sensor / Theo S.J. Lammerink, Niels R.Tas, Miko Elwenspoek, Jan H.J. Fluitman // Sensors and Actuators A, 37-38 (1993) 45-50.
4. Mayer F. Influence of design geometry and packaging on the response of thermal CMOS flow sensors / F. Mayer, O. Paul and H. Baltes // Transducers'95 - Eurosensors IX. The 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995, p. 528-531.
5. Nguyen N.T. Asymmetrical locations of heaters and sensors relative to each other using heater arrays - a novel method for designing multi-range electrocaloric mass-flow sensors / N.T. Nguyen, W. Dotzel // Sensors and Actuators A 62 (1997), – p.p. 506 – 512
6. de Bree, Hans-Elias (H.-E. de Bree). **The Microflow**. Ph.D. - thesis, ISBN 9036509262, (1997). The Research described in this thesis has been possible due to the support of: Micro Mechanics group of the University of Twente, The Dutch Technology Foundation (STW).
7. de Bree H.E. Bidirectional fast flow sensor with a large dynamic range / H.E. de Bree, H.V. Jansen, T.S.J. Lammerink et al. // J. Micromech. Microeng. 1999). V. 9. P. 186 – 189.
8. Svetovoy V.B. Model of the μ -flow microphone / V.B. Svetovoy, I.A. Vinter // Sensors and Actuators A, -86 (2000). – P. 171–181.
9. Damean N. Heat transfer in a MEMS for microfluidics / N. Damean, Paul P. L. Regtien, M. Elwenspoek // Sensors and Actuators A, -105 (2003) – P. 137–149.

10. van Honschoten J.W. Analytic model of a two-wire thermal sensor for flow and sound measurements / J.W. van Honschoten, G.J.M. Krijnen, V.B. Svetovoy, H.-E. de Bree and M.C. Elwenspoek // *Journal of Micromechanics and Microengineering*, (2004) – P. 1468–1477.
11. van Honschoten J.W. **Modelling and optimisation of the Microflow** / J.W. van Honschoten // Ph.D. Dissertation, University of Twente, Netherland, (2004). – 224 P.
12. van Honschoten J.W. Optimization of a Thermal Flow Sensor for Acoustic Particle Velocity Measurements / J.W. van Honschoten, V.B. Svetovoy, G.J.M. Krijnen, M.C. Elwenspoek // *Journal of Microelectro-mechanical systems*, vol.14, No. 3, June 2005, – P. 436–443.
13. J.W. van Honschoten, D.R. Yntema, R.J. Wiegerink, M. Elwenspoek. DIRECTIONAL SENSITIVITY OF A THREE DIMENSIONAL PARTICLE VELOCITY SENSOR. Proceedings of the 17 workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems, p. 201-204, Published - 6 Sep 2006.
14. van Honschoten, J. W., Yntema, D. R., Svetovoy, V., Dijkstra, M., Wiegerink, R. J., & Elwenspoek, M. C. (2007). Analysis of the performance of a particle velocity sensor between two cylindrical obstructions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121 (WP07-01/5), 2711-2722.
15. T.G.H. Basten, H-E. de Bree, and E.H.G. Tijs. Localization and tracking of aircraft with ground based 3d sound probes. In ERF33, Kazan, Russia, 2007.
16. Гірняк Ю. МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ У СУЧАСНОМУ ПРИЛАДОБУДУВАННІ. *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 69, 2008 р. С. 97 – 102.
17. J.W. van Honschoten, D.R. Yntema, R.J. Wiegerink, M. Elwenspoek. Analysis of the angular sensitivity of an innovative particle velocity sensor. SENSORS, 2008 IEEE, Date of Conference: 26-29 Oct. 2008, Date Added to IEEE Xplore: 16 December 2008.
18. Yntema, Doekle. **An integrated three-dimensional sound-intensity probe**. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands. 2008. The research

described in this thesis was carried out at the Transducers Science and Technology Group of the MESA+ Research Institute at the University of Twente, Enschede, The Netherlands.

19. Wind, Jelmer. **Acoustic source localization: Exploring theory and practice**. Ph.D. Thesis (Applied Mechanics), University of Twente, Enschede, The Netherlands. **2009**.

20. Готра З.Ю. Принципи електротеплового моделювання електронних схем з динамічним саморозігрівом елементів / З. Ю. Готра, Р. Л. Голяка, С. В. Павлов, С. С. Куленко // Дванадцята відкрита науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету “Львівська політехніка” з проблем електроніки: тези доповідей, 7–9 квітня 2009 року / Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів : Видавн. Національного університету “Львівська політехніка”, **2009**. – С. 21.

21. Oerlemans, Stefan. **Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines**. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, **2009**.

22. Neering, Jan. **Optimization and estimation techniques for passive acoustic source localization**. PhD Thesis, Computer Science [cs]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, **2009**.

23. Ali Sukru Cubukcu, Eugen Zernickel, Uwe Buerklin, Gerald Anton Urban. A 2D thermal flow sensor with sub-mW power consumption Sensors and Actuators A: Physical, Volume 163, Issue 2, **October 2010**, Pages 449-456.

24. Cubukcu AS, Zernickel E, Buerklin U, Urban GA (**2010**) A 2D thermal flow sensor with sub-mW power consumption. Sens Actuators A 163(2): 449–456.

25. K. Kliche, S. Billat, F. Hedrich, C. Ziegler, R. Zengerle. Sensor for gas analysis based on thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference/ **Date of publication 2011/1/23**, Pages 1189-1192.

26. Лобур М. ОСНОВИ МІКРОСИСТЕМНИХ ПРИСТРОЇВ / Лобур М., Мельник М. // НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК, НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”, створено при підтримці Європейського Союзу за Спільним Європейським Проектом "Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (MastMST), ідент. № 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR.

27. Невлюдов И.Ш. Анализ современных средств автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем / И.Ш. Невлюдов, В.В. Евсеев, В.О. Бортникова, Я.О. Замирец // ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, №1, 2014, с. 3 – 8.

28. Pjetri, O., Wiegerink, R. J., Lammerink, T. S. J., & Krijnen, G. J. M. (2016). **A 2D acoustic particle velocity sensor with perfectly orthogonal sensitivity directions.** *Sensors and actuators. A: Physical*, 246, 28-34.

29. Pjetri, Olti. **Two - Dimentional Acoustic Particle Velocity Sensors Based on a Crossing Wires Topology.** PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2016.

30. Pjetri, Olti. **Two - Dimentional Acoustic Particle Velocity Sensors Based on a Crossing Wires Topology.** PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2016.

31. Лупина Б.І. Мікромеханічний поверхневий терморезисторний перетворювач лінійної швидкості середовища в каналі прямокутного перерізу - Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, №3 (92). – С. 17 – 28.

32. Невлюдов І.Ш. Методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів / І.Ш. Невлюдов, В.О. Бортнікова // ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, 1'2018, с. 8 - 10.

33. Зацепин А.Ф. Акустические Измерения / А.Ф Зацепин, В.Е. Щербинин, Г.Л. Аккерман, А.Б. Ринкевич // учеб. пособие для СПО, 2019, с. 140 – 142.

34. Jean-Michel Friedt Acoustic sensors / Jean-Michel Friedt. // Universit_e de Franche-Comt_l`e, 2010, с. 37 – 40.

35. И.Ш. Невлюдов Технологии Микросистемной Техники / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Чалая // Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, с. 7 – 9.
36. Paulo Jorge Maia dos Santos Vector Sensor Arrays in Underwater Acoustic Applications / Paulo Jorge Maia dos Santos, Paulo Felisberto // Conference Paper, February 2010, с. 2 –4.
37. А.Л. Ткачев Классификация Акустических Датчиков / А.Л. Ткачев, В.М. Мусалимов // с. 328 – 342.
38. Карабанов И.В. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов / И.В Карабанов, А.С Миронов // с. 19 – 24.
39. Сысоева Светлана Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов / Светлана Сысоева // с. 22 – 27.
40. V. Makarenko MEMS-микрофоны компании ANALOG DEVICES / V. Makarenko // АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА №6, июль 2012, с. 34 – 39.
41. New architecture of MEMS microfone for enhanced performances / J. Czarny, A. Walther, B. Desloges, Ph. Robert MEMS Sensors Laboratory CEA, LETI.
42. Сысоева Светлана МЭМС-микрофоны / Светлана Сысоева // с. 72 – 76.
43. Juan Pablo Sáenz AN INTRODUCTION TO MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS (MEMS) / Juan Pablo Sáenz // BURAN №22 SEPTIEMBRE 2005, с. 13 – 16.
44. Jacobsen, Finn; de Bree, Hans-Elias A comparison of two different sound intensity measurement principles / Jacobsen, Finn; de Bree, Hans-Elias // Acoustical Society of America, 2006, с. 1510 – 1517.
45. MULTI PURPOSE ACOUSTIC VECTOR SENSORS FOR BATTLEFIELD ACOUSTICS / Dr. Ir. Hans-Elias de Bree, Dr. Ir. Jelmer Wind, Prof. Dr. Ir. Erik Druyvesteyn, Microflown Technologies, The Netherlands / Major Henk te Kulve, Chief Target Acquisition and Sensor systems, Ministerie van Defensie, The Netherlands.