

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

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

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

на тему: **АКУСТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЬНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ**

Здобувача групи ЕП.м-11н Баранова Олександра Олександровича

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

Олександр БАРАНОВ

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

Юрій ШАБЕЛЬНИК

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«03» травня 2023 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Баранова Олександра Олександровича

1. Тема роботи Акустoeлектричні перетворювачі для контрольнo-вимірювальних сенсорних систем

затверджена наказом по університету від «26» квітня 2023 р., № 0426-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 24 травня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Одним із основних функціональних і конструктивних елементів акустoeлектронних пристроїв є перетворювач сигналів. Цей факт дає підстави досліджувати і використовувати досягнення акустoeлектроніки для створення досконалих сенсорів різного призначення. Такі датчики використовуються в споживчих та високопрофесійних пристроях та системах: митному контролі, в криміналістиці та контролі стану промислових виробів, в автоматизованих системах керування літаків, контролю двигуна тощо. До таких датчиків можна отримати бездротовий доступ, що забезпечує віддалений контроль. Вони працюють в діапазоні мегагерцових частот до декількох гігагерц, мають компактну структуру, високу стабільність та чутливість, низьку вартість.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні фізичних основ функціонування акустoeлектричних перетворювачів для контрольнo-вимірювальних сенсорних систем та проведення розрахунку параметрів смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
1. Провести літературний огляд сенсорів фізичних величин на основі акустоелектричних ефектів (літературний огляд).
 2. Розрахувати параметри смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях.
 3. Проаналізувати та навести приклади застосування акустичних сенсорів електроніці, зробити висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- Слайди № 1, 2 – Вступ. Мета та актуальність.
Слайди № 3-6 – Сенсори фізичних величин на основі акустоелектричних ефектів (літературний огляд)
Слайди № 7-9 – Розрахунок параметрів датчиків на ПАХ. Таблиці.
Слайди № 10-12 – Застосування акустичних пристроїв в електроніці.
Слайд № 13 – Висновки
Слайд № 14. Список публікацій. Подяка.
6. Дата видачі завдання 03.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 07.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 24.05.2023 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	25.05.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист кваліфікаційної роботи	30.05.2023 р., 10 ⁰⁰ – 13 ⁰⁰ онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти _____ О. О. Баранов

Керівник роботи _____ Ю. М. Шабельник

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 36 сторінках, зокрема, містить 14 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 22 найменувань.

Одним із основних функціональних і конструктивних елементів акустoeлектронних пристроїв є перетворювач сигналів. Цей факт дає підстави досліджувати і використовувати досягнення акустoeлектроніки для створення досконалих сенсорів різного призначення. Такі датчики використовуються в споживчих та високопрофесійних пристроях та системах: митному контролі, в криміналістиці та контролі стану промислових виробів, в автоматизованих системах керування літаків, контролю двигуна тощо. До датчиків можна отримати бездротовий доступ, що забезпечує віддалений контроль. Вони працюють в діапазоні від декількох мегагерц до декількох гігагерц, мають компактну структуру, високу стабільність та чутливість, низьку вартість.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні фізичних основ функціонування акустoeлектронних перетворювачів для контрольованих вимірювальних сенсорних систем та проведення розрахунку параметрів смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях.

Під час виконання роботи використовували стандартний метод розрахунку параметрів (коефіцієнтів загасання) смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях. У результаті проведених наукових досліджень та розрахунків встановлено основні конструктивні та акустoeлектричні параметри фільтра на ПАХ на базі звукопровода із ніобат літію YZ- зрізу: кількість пар електродів – $N = 5$, апертура – $W = 4.3 \cdot 10^{-3}$ м·с, коефіцієнт розсіювання – від 0,25 до 0,5, загальні втрати – $B = 25$ дБ.

Отримані розрахункові параметри фільтра на ПАХ можна використати при розробці лабораторних та розрахункових робіт з дисципліни «Прилади та пристрої оптоелектроніки та спінтроніки».

Ключові слова: АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА, АКУСТИЧНІ ХВИЛІ, ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ, СЕНСОР, СМУГОВИЙ ФІЛЬТР.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ АКУСТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕФЕКТІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)	7
1.1. Основні поняття в акустоелектроніці	7
1.2. Розповсюдження акустичних хвиль в твердому тілі.....	9
1.3 П'єзоелектричний ефект, зустрічно-штирвові перетворювачі, та сенсори на їх основі.....	14
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКІВ НА ПАХ	19
2.1. Розрахунки параметрів смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях.....	19
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ	23
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

ВСТУП

У теперішній час важливим є точність вимірювання фізичних величин. Це приводить до установаження таких технічних вимог до вимірювальних пристроїв та систем, які не можуть бути забезпечені традиційними вимірювальними перетворювачами. Для цього можуть використовуватися акустoeлектричні перетворювачі на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) та системи на їх основі. Такі датчики мають ряд переваг. Це – мала довжина хвиль при відносно невисоких частотах, можливість розподіленого приймання сигналу, наявність ефективних методів збудження, передачі та приймання сигналів в пристроях акустoeлектроніки, можливість використання сучасної мікроелектронної технології, що сумісна з технологією виготовлення інтегральних мікросхем. Тому пристрої на ПАХ впроваджуються при створенні активних та пасивних первинних перетворювачів: температури, вологості, тиску, складу газового середовища, переміщення, тощо. Ці сенсори можна використовувати для виявлення крихітних слідів біомолекул через спорідненість до біомаркерів для виявлення патогенних мікроорганізмів, вірусів, діагностики та захворювань [1-3].

Одним із основних функціональних і конструктивних елементів акустoeлектронних пристроїв є перетворювач сигналів. Цей факт дає підстави досліджувати і використовувати досягнення акустoeлектроніки для створення досконалих сенсорів різного призначення. До таких датчиків можна отримати бездротовий доступ, що забезпечує віддалений контроль у суворих умовах. Вони працюють в діапазоні частот від 10 МГц до декількох ГГц, мають міцну компактну структуру, високу стабільність та чутливість, низьку вартість, швидку реакцію в реальному часі, надзвичайно малий розмір.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні фізичних основ функціонування акустoeлектричних перетворювачів для контрольовано-вимірювальних сенсорних систем та проведення розрахунку параметрів смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях.

РОЗДІЛ 1.

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ АКУСТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕФЕКТІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Основні поняття в акустоелектроніці

Акустоелектроніка – це галузь електроніки, що вивчає взаємодію механічних хвиль (зазвичай ультразвукових) і електромагнітних полів у кристалічних матеріалах і напівпровідниках. В акустоелектроніці використовується явище акустоелектричної взаємодії, за якої ультразвукові хвилі змінюють електричні властивості матеріалу. Це явище широко застосовується в різних електронних пристроях, таких як фільтри, осцилятори, підсилювачі та інші [1].

До базових елементів електронних пристроїв, які використовуються для обробки сигналів можна віднести фільтри, осцилятори та підсилювачі. В акустоелектроніці ці елементи можуть бути реалізовані на основі акустоелектричної взаємодії ультразвукових хвиль та електромагнітних полів у кристалічних матеріалах.

Фільтри використовуються для розділення сигналів на різні частоти або на різні діапазони частот. Їх можна реалізувати на основі акустоелектричних резонаторів, які діють як фільтри високих, низьких або проміжних частот.

Осцилятори – це пристрої, які генерують електричні сигнали певної амплітуди та частоти. Вони можуть бути реалізовані на основі акустоелектричних резонаторів, які діють як резонатори високої частоти. Акустоелектричні осцилятори використовуються там де потрібен точний і стабільний сигнал [1].

Підсилювачі – це пристрої, які збільшують амплітуду електричних сигналів. В акустоелектроніці підсилювачі роблять на основі акустоелектричних транзисторів або інших пристроїв, які використовують акустоелектричну взаємодію для управління струмом. Посилення сигналу їх основне застосування.

Акустоелектричні фільтри, осцилятори та підсилювачі використовують в радіотехніці, телекомунікаційних, системах навігації, крім того, акустоелектроніка знаходить застосування в інших галузях електроніки, як-от сенсорика, контроль і управління, оптичні пристрої та інші. Наприклад, акустоелектричні датчики.

Акустоелектричні датчики – це пристрої, які для вимірювання різних параметрів середовища використовують акустоелектричну взаємодію. Вони можуть бути використані для вимірювання тиску, температури, рівня рідини та інших параметрів. В акустоелектричних датчиках ультразвукова хвиля, що генерується акустоелектричним осцилятором, поширюється через середовище і відбивається від межі розділу або інших об'єктів у середовищі. Відбита хвиля потім обробляється акустоелектричними пристроями, такими як фільтри або підсилювачі, і після цього вимірюються її параметри. Такі параметри як зміна часу проходження хвилі й зміна її амплітуди можуть бути використані для визначення параметрів середовища.

Акустоелектричні датчики мають низку переваг перед іншими типами датчиків, як-от висока чутливість, висока точність вимірювань, широкий діапазон частот і відсутність контакту із середовищем. Це все може бути особливо важливим у приладах, де необхідно вимірювати параметри агресивних середовищ та в умовах високої температури.

Акустоелектричні датчики широко використовуються в різних галузях, як-от медицина, промисловість, наука і техніка, а також у системах контролю та управління. Наприклад, вони можуть бути використані для вимірювання рівня рідини в резервуарах або ємностях, вимірювання тиску в трубопроводах, вимірювання температури в печах та інших технічних системах. Вони також можуть використовуватися в медичних пристроях, таких як ультразвукові сканери та інших діагностичних приладах [2].

1.2. Розповсюдження акустичних хвиль в твердому тілі

Матеріали, що використовуються в акустоелектроніці, класифікуються залежно від їхніх властивостей і здатності взаємодіяти з акустичними хвилями. До основних класів матеріалів, що використовуються в акустоелектроніці, включають:

1. П'єзоелектричні матеріали – це матеріали, які під час деформації змінюють свій електричний заряд, і навпаки, під час подачі електричного поля на них відбувається деформація. Наприклад: кварц, турмалін, п'єзокераміка, цинкокерамічні матеріали, деякі полімери.

2. П'єзомагнітні матеріали – це матеріали, які при впливі на них магнітного поля змінюють свій п'єзоефект. Наприклад: ферити, гранати, композити на основі феритів і п'єзоелектричних матеріалів, металокерамічні матеріали.

3. П'єзооптичні матеріали – це матеріали, які змінюють свій оптичний показник заломлення під час впливу на них акустичних хвиль. Наприклад: кварц, літєвий ніобат (LiNbO_3), кадмій сульфід (CdS), бісмутовий кремній оксид ($\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$) [3].

4. Акустичні середовища – це матеріали, які використовуються для передавання та посилення акустичних хвиль. Як акустичні середовища можуть використовуватися рідини, газу, а також тверді тіла, наприклад, кристали.

У твердих тілах можливе поширення об'ємних і поверхневих акустичних хвиль. Увесь об'єм твердого тіла охоплюють об'ємні хвилі, тоді як на межі розділу двох середовищ поширюються тільки поверхневі хвилі.

Об'ємні акустичні хвилі – це тип акустичних хвиль, які поширюються в повному об'ємі середовища. Вони являють собою механічні коливання частинок середовища. Об'ємні хвилі можуть бути поздовжніми, поперечними або змішаними, залежно від того, в якому напрямку відбуваються коливання частинок. Прикладом об'ємних акустичних хвиль є звукові хвилі, що поширюються в повітрі або інших середовищах. Також об'ємні хвилі можуть виникати під час поширення ультразвукових хвиль у твердих тілах, рідинах і газах. Об'ємні акустичні хвилі широко використовуються в медичній

діагностиці, матеріалознавстві, неруйнівному контролю та інших галузях, де потрібне вимірювання фізичних властивостей середовища на основі акустичних хвиль.

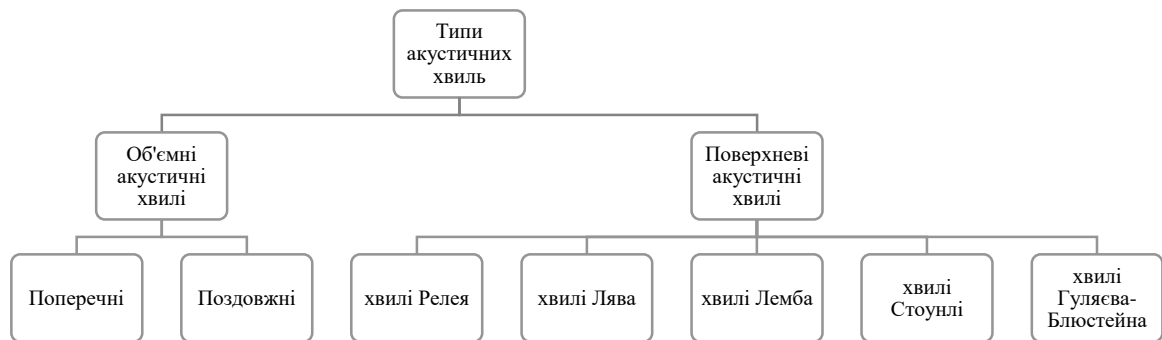


Рисунок 1.1 – Основні види акустичних хвиль, що розповсюджуються в твердому тілі. Адаптовано із роботи [1]

Поверхневі акустичні хвилі – це тип акустичних хвиль, які поширюються тільки поверхнею твердого тіла. До них відносять хвилі Релея, хвилі Лява, хвилі Лемба, хвилі Стоунлі. Вони виникають під час взаємодії об'ємних хвиль із поверхнею твердого тіла і являють собою коливання частинок на межі розділу двох середовищ, наприклад, твердого тіла і повітря. Поверхневі хвилі можуть бути поздовжніми або поперечними, залежно від напрямку коливань частинок. Поздовжні хвилі поширюються в напрямку, паралельному напрямку руху хвилі, тоді як поперечні хвилі поширюються перпендикулярно напрямку руху хвилі. Швидкість поширення акустичних хвиль залежить від типу хвилі та механічних властивостей твердого середовища. Наприклад, для поздовжніх хвиль швидкість поширення визначається густиною і пружністю середовища, а для поперечних хвиль – тільки пружністю.

Хвилі Релея (або релеївські) – це поверхневі акустичні хвилі, що поширюються вздовж поверхні твердого матеріалу. Хвилі Релея мають горизонтальний рух, тобто частинки середовища, через яке вони поширюються, рухаються тільки в горизонтальному напрямку. Ці хвилі характеризуються тим, що вони не можуть поширюватися всередині об'єму середовища, вони обмежені тільки поверхнею матеріалу. Хвилі Релея виникають, коли поздовжня хвиля

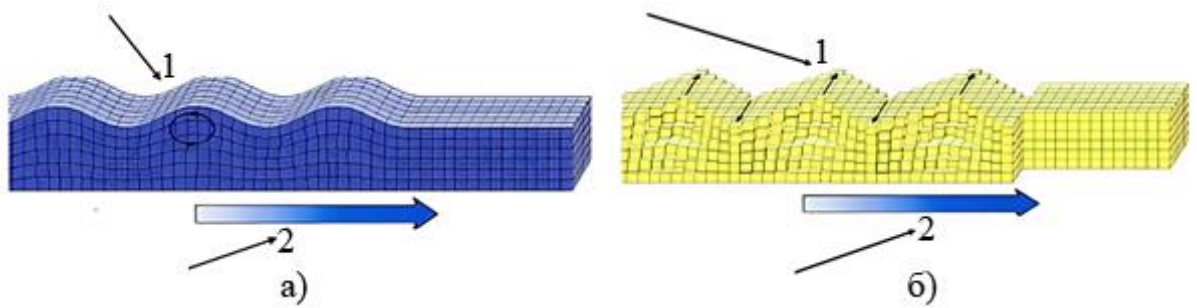


Рисунок 1.2 – Хвиля Релея а) та Хвиля Лява б): 1 – напрямок розповсюдження; 2 – напрям руху частинок. Адаптовано з роботи [1]

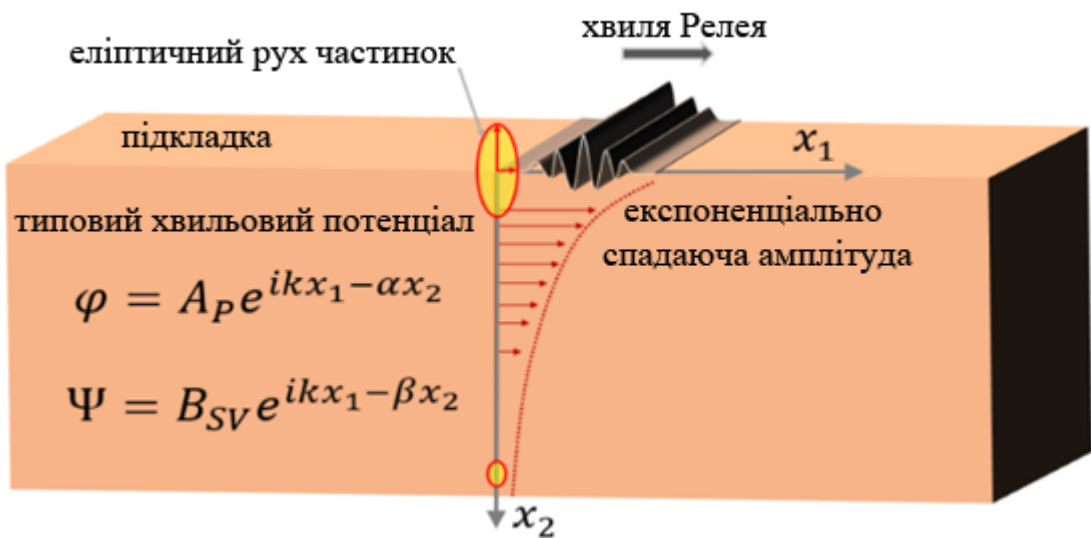


Рисунок 1.3 – Схема хвиль Релея, що поширюються через підкладку. Адаптовано із роботи [2]

потрапляє на межу двох середовищ із різною густиною. Унаслідок цього відбувається відбиття поздовжньої хвилі та збудження поверхневої хвилі Релея, що поширюється вздовж межі розділу двох середовищ. Завдяки властивості цієї хвилі поверхневі частинки рухаються еліптично, по нормалі до поверхні і паралельно до напрямку поширення. У цьому типі хвиль швидкість хвилі залежить виключно від матеріалу підкладки та орієнтації кристалів [3]. Хвилі Релея відіграють важливу роль у різних галузях науки і техніки, включно з обробкою матеріалів, неруйнівним контролем і біомедичною діагностикою.

Поперечні горизонтальні хвилі. У випадку зсувних горизонтальних хвиль (ЗГХ) рух частинок перпендикулярний до напрямку поширення хвилі. Однак, на відміну від хвилі Релея, амплітуда зміщень частинок не спадає експоненціально з глибиною. Оскільки амплітуда не спадає, через підкладку можна передавати кілька довжин хвиль, а отже, цей тип хвиль проникає на кілька довжин хвиль у підкладку або насичує всю товщину використовуваної підкладки. Це робить його чутливим до змін на поверхні пристрою [3].

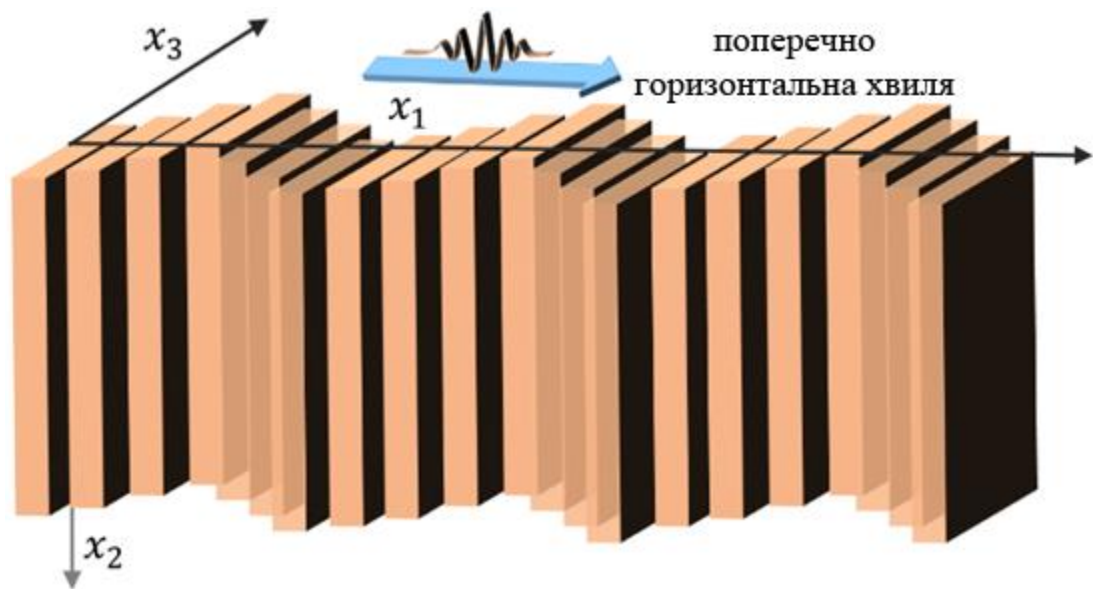


Рисунок 1.4 – Схема поперечних горизонтальних (SH) хвиль, що поширюються через підкладку. Адаптовано із роботи [2]

Хвилі Лемба генеруються у хвилеводі між двома паралельними поверхнями, наприклад, між верхньою і нижньою поверхнями пластини або підкладки.

Іншими словами, хвиля Лемба насичує всю товщину підкладки. Хвилі Лемба поділяються на два модальні типи хвиль - антисиметричні та симетричні, які можуть поширюватися через пластину незалежно в залежності від частоти хвилі. Швидкість хвилі Лемба залежить від добутку частоти на товщину пластини. Швидкість кожної хвильової моди Лемба змінюється залежно від частоти, оскільки вони мають високу дисперсію. Залежно від середовища і частоти збудження, хвилі Лемба можуть поширюватися з дуже високими швидкостями від 800 м/с до 6000 м/с, що робить їх придатними для застосування в SAW [3].

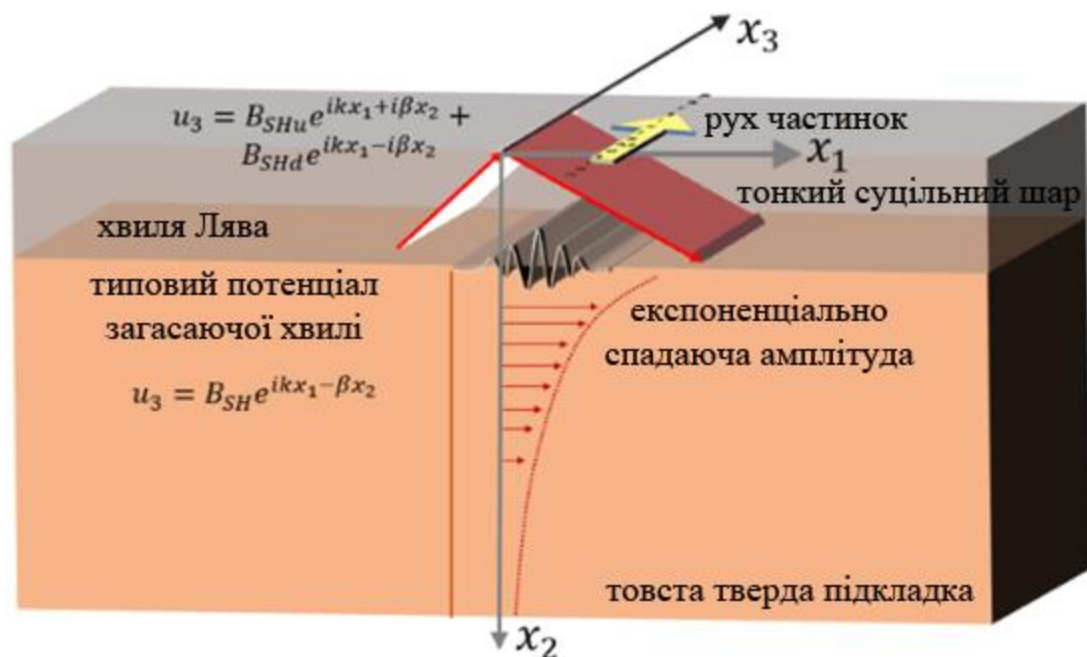


Рисунок 1.5 – Схема та математика хвиль Лява, що поширюються через поверхню. Адаптовано із роботи [2]

Як і хвиля Релея, SH-хвиля зі спадаючою амплітудою по глибині не є стійкою. Отже, для спрямування SH-хвилі необхідний тонкий шар, і тоді хвиля може затухати разом із глибиною іншого шару, прикріпленого до тонкого шару. Такі SH-хвилі називаються хвилями Лява. Отже, хвилі Лява генеруються на межі двох твердих пружних шарів підкладки, де один шар є дуже товстим, а інший - тонким, розташованим на товстому шарі. Це спрямовані хвилі, які поширюються через тонкий шар осаду, нанесений на поверхню підкладки SAW. Коли генеруються хвилі Лява, в тонкому направляючому шарі концентрується дуже

висока акустична енергія. Таким чином, ці хвилі дуже чутливі до масового навантаження на підкладку. Перевага цього типу хвиль полягає в тому, що вони мають найвищу чутливість (серед SAW-сенсорів) завдяки своїм концентрованим направляючим характеристикам. Крім того, завдяки своїй поверхневій природі, хвилі Лява можуть поширюватися в рідких середовищах, що робить їх придатними для біосенсорики [4]. На відміну від інших хвиль, які можуть передаватися як уперед, так і назад поверхнею, хвиля Лява передається тільки в одному напрямку, що робить її корисною в деяких випадках, наприклад, у сфері активного загасання шуму і вібрацій.

1.3 П'єзоелектричний ефект, зустрічно-штирьові перетворювачі, та сенсори на їх основі

Явище виникнення електричного заряду на поверхні матеріалу під час дії на нього акустичних хвиль називають п'єзоелектричним ефектом. Зворотний п'єзоелектричний ефект полягає в тому, що при застосуванні до п'єзоелектричного матеріалу електричного поля відбувається його вібрація. П'єзоелектричні елементи використовують змінне електричне поле для створення механічних хвиль, які поширюються через матеріал і знову перетворюються в електричний сигнал. Таким чином, п'єзоелектричні матеріали можуть бути використані як датчики і перетворювачі механічних сигналів в електричні [4].

П'єзоелектричні плівкові матеріали мають найвищий коефіцієнт п'єзоелектричної проникності та коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Однак ці матеріали не є оптимальними для застосування в біосенсорних пристроях через низку недоліків, таких як високе акустичне загасання, великі втрати енергії, низька швидкість звукової хвилі і погана біосумісність. Один із методів збудження поверхневих хвиль полягає у використанні зустрічно штирьових перетворювачів.

Зустрічно-штирьові перетворювачі (ЗШП) – це один із методів для збудження поверхневих акустичних хвиль у п'єзоелектричних матеріалах. ЗШП

складаються з двох електродів, розташованих на протилежних сторонах п'єзоелектричного матеріалу, і проміжного шару, званого зустрічним штирем. Під час подавання змінного електричного сигналу на електроди відбувається електрична поляризація матеріалу, що призводить до появи механічних коливань у п'єзоелектричному матеріалі. Ці коливання взаємодіють із зустрічним штирем, який діє як резонатор, посилюючи поверхневі хвилі на поверхні п'єзоелектричного матеріалу.

Одна з переваг використання ЗШП полягає в тому, що вони можуть бути використані для створення різних форм поверхневих хвиль з різною частотою і амплітудою. Крім того, вони можуть бути застосовані для створення біосенсорів та інших пристроїв, які вимагають маленьких розмірів і високої чутливості.

Однак, ЗШП також мають деякі обмеження, включно з можливістю виникнення небажаних хвильових режимів і втратою енергії через опір матеріалу. Незважаючи на це, їх використання залишаються одним із найпоширеніших методів для збудження поверхневих хвиль у п'єзоелектричних матеріалах.

При наявності плівки можна визначити ємність зустрічно – штирьового перетворювача за формулою:

$$C_L = \varepsilon_0 \varepsilon_L \left(\frac{h'}{r} \right),$$

де $r=d/2b$ – коефіцієнт металізації ЗШП; ε_l – діелектрична проникність плівки; b – відстань між електродами; d – ширина електрода; h' – висота електрода.

Змінюючи форму зустрічно-штирьового перетворювача, можна створювати необхідні параметри поверхневих хвиль [5]. Існують різні види таких перетворювачів, включно з еквідистантним перетворювачем, що має однакові відстані між штирями, і нееквідистантним перетворювачем, у якого відстані між штирями різні. Крім того, існують неаподизовані перетворювачі, у яких перекриття між штирями однакові, та аподизовані перетворювачі, у яких перекриття мають різний ступінь. (див. Рисунок 1.7).

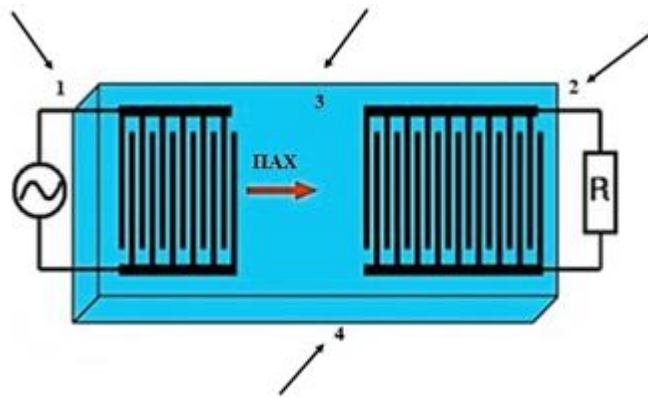


Рисунок 1.6 – Пристрій на ПАХ з зустрічно-штирьовими перетворювачами: 1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – напрям ПАХ; 4 – п'єзоелектрична підкладка. Адаптовано із роботи [6]

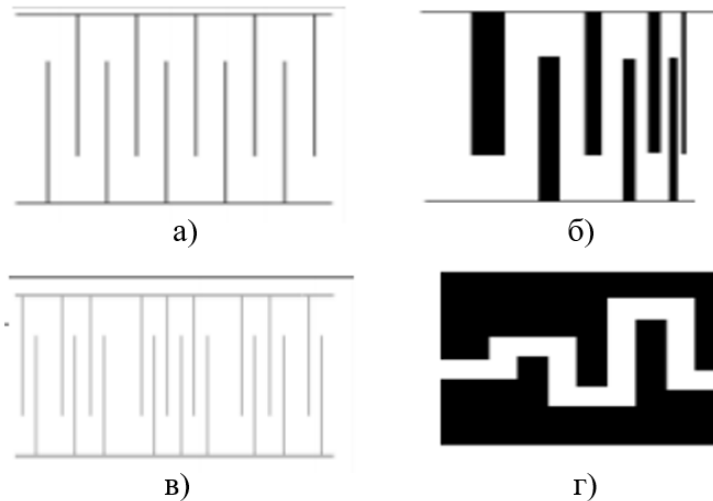


Рисунок 1.7 – Різновиди ЗШП: а – еквідістантний; б – нееквідістантний; в – неоподизований; г – аподизований перетворювачі. Адаптовано із роботи [7]

На основі ЗШП можна зробити сенсори. Якщо на шляху поширення поверхневих акустичних хвиль потрапляє якийсь об'єкт, то він викликає зміну фазової швидкості та амплітуди хвиль. Для того щоб захопити цей об'єкт наносять шар чутливого покриття. І виявляючи зміну сигналу при потраплянні чогось на чутливе покриття отримують потрібну інформацію.

Для генерації та виявлення поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) у сенсори використовують дві конфігурації пристроїв: лінії затримки та резонатори. Сенсор ПАХ з лінією затримки складається з двох зустрічно штирьових перетворювачів (ЗШП), один для введення і один для виведення електричного

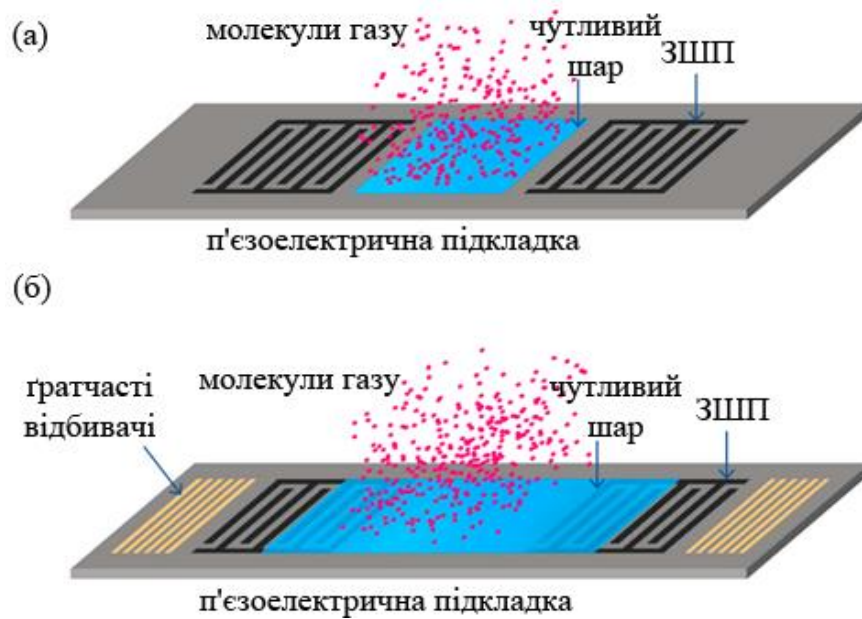


Рисунок 1.8 – Схеми хімічних сенсорів ПАХ: двопортова лінія затримки (а) і резонатор (б) із шаром чутливого покриття та цільовими парами аналітичного матеріалу. Адаптовано із роботи [8]

сигналу, що розташовані на певній відстані один від одного на п'єзоелектричній підкладці. Ділянка між ЗШП вкрита шаром чутливого покриття для взаємодії зі сторонніми хімічними парами або газами. Ця область створює тимчасову затримку між вхідним і вихідним сигналами, яка залежить від її довжини і швидкості ПАХ. Рисунок 1.8 (а) показує двопортову конфігурацію лінії затримки сенсору ПАХ. Крім того, можливо використовувати один і той самий ЗШП для генерації та виявлення ПАХ, додавши відбивач (зазвичай інший ЗШП). Це називається конфігурацією з одним портом або відбивною лінією затримки. Лінія затримки вимагає достатнього узгодження імпедансу для зменшення внесеного загасання. Ця конфігурація проста і практична для сенсорних застосувань, але схема генератора ускладнюється через великі зміни фази в смузі пропускання [8].

Другим типом конфігурації є резонатор. Він складається з двох ЗШП, які випромінюють і реєструють акустичні хвилі, і ґратчастих відбивачів, розміщених зовні кожного ЗШП, що створює резонуючу порожнину. Якщо використовується один ЗШП для вхідних і вихідних сигналів, то це називається

однопортовим резонатором. Чутливий шар може бути нанесений на ЗШП у резонаторах, і вимоги до узгодження імпедансу не такі суворі, оскільки вони мають менше внесене загасання. Крім того, конструкція генератора проста, оскільки в цій конфігурації зміна фази в смузі пропускання відносно невелика ($\sim\pi$). Можуть бути й деякі модифікації конфігурацій пристроїв [8].

Як чутливі покриття в сенсорах ПАХ використовують різні активні матеріали. Завдяки розвитку матеріалознавства, нанотехнологій, біології та хімії є великий вибір активних матеріалів [9]. Умовно їх можна поділити на дві групи: органічні та неорганічні.

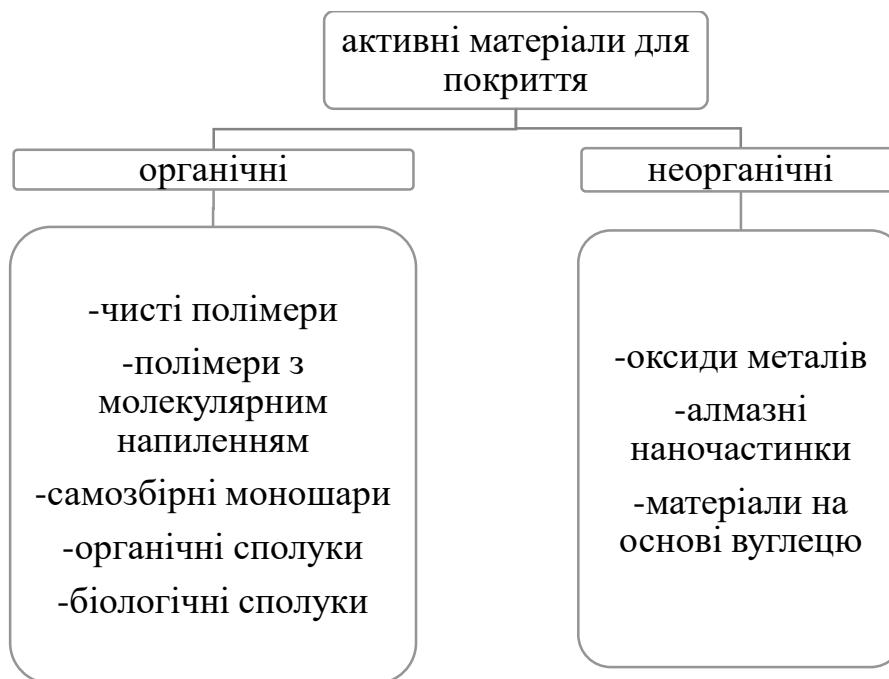


Рисунок 1.9 – Схема матеріалів, що використовуються в якості активних чутливих покриттів в сенсорах на ПАХ. Адаптовано із роботи [9]

Ці матеріали можуть використовуватися як чутливі шари на поверхні сенсорів на ПАХ і в залежності від того які саме зміни в навколишньому середовищі, як-от зміни концентрації газів, рідин або біомолекул треба відстежувати підбирається потрібний активний матеріал [10].

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДАТЧИКІВ НА ПАХ

2.1. Розрахунки параметрів смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях

У пристроях, що використовують акустичні хвилі, важливим параметром є величина втрат, яка може призвести до послаблення обробки сигналу. Існують основні критерії втрат, які включають в себе: загасання поверхневих акустичних хвиль у підкладці, двоспрямованість зустрічно штирьового перетворювача, загасання сигналу в електродах перетворювача, дифракційний розбіг акустичного пучка, злагожденість зустрічно штирьового перетворювача з внутрішнім електричним ланцюгом.

Якщо дані параметри смугового фільтра, можна виконати розрахунок його коефіцієнтів втрат.

Дано: $f_0 = 1,8$ МГц; $\frac{\Delta f}{f} = 20\%$; $R_{\text{випр}} = 60$ Ом.

Потрібно обчислити кількість пар електродів N , які необхідно використовувати. Для цього скористаємося умовою забезпечення смуги пропускання.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{N} \rightarrow N = \frac{1}{\frac{\Delta f}{f_0}} = 5. \quad (1)$$

Для визначення матеріалу підкладки з близьким значенням N_0 до N ми скористаємося табличними даними. Наприклад, ніобат літію (LiNbO_3) може підійти, оскільки його швидкість поширення акустичних хвиль $\vartheta_a = 3,49 \cdot 10^3$ м/с. Потім ми повинні визначити довжину хвилі.

$$\lambda_a = \vartheta_a \cdot \frac{1}{f_0} = 3,39 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^6} \approx 210 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (2)$$

Необхідно визначити період розміщення електродів таким чином, щоб він був рівний довжині акустичної хвилі:

$$h = \frac{\lambda_a}{2} = \frac{210 \cdot 10^{-6}}{2} = 105 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (3)$$

Обчислюємо розміри електродів, а саме довжину:

$$b = \frac{h}{2} = \frac{105 \cdot 10^{-6}}{2} = 52,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (4)$$

Визначаємо значення апертури W для матеріалу ніобату літію (LiNbO_3):

$$\frac{W_0}{\lambda_a} = M_0 = 17 \rightarrow W_0 = M_0 \cdot \lambda_a = 17 \cdot 210 \cdot 10^{-6} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (5)$$

Обчислюємо необхідне значення апертури, яке відповідає опору випромінювання, що дорівнює 60 Ом:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{R}{R_0} \rightarrow W = W_0 \cdot \frac{R_{\text{випр}}}{R_0} = 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60}{50} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (6)$$

Алюміній обраний як матеріал для електродів, оскільки широко використовується для виробництва комутаційних інтегральних мікросхем, а оксид хрому обраний і буде використовуватися як матеріал для поглиначів.

Через товщину комутації, що дорівнює приблизно 1 мкм, товщина електродів має бути приблизно такою самою.

Для розрахунку втрат енергії необхідно визначити коефіцієнт η , за умови, що навантажувальний опір дорівнює опору випромінювання і становить 60 Ом:

$$\eta = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{випр}}} = \frac{60}{60} = 1. \quad (7)$$

І тепер обчислюємо коефіцієнт розсіювання:

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{1}{(1+\eta)^2} = \frac{1}{(1+1)^2} = \frac{1}{4}; \\ T_{12} &= \frac{\eta^2}{(1+\eta)^2} = \frac{1}{(1+1)^2} = \frac{1}{4}; \\ T_{13} &= \frac{2\eta}{(1+\eta)^2} = \frac{2}{(1+1)^2} = \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Отримавши значення коефіцієнта розсіювання знаходимо втрати енергії при електромеханічному відбиванні:

$$\begin{aligned} B_{11} &= -10 \log T_{11} = -10 \log \frac{1}{4}; \\ B_{12} &= -10 \log T_{12} = -10 \log \frac{1}{4}; \\ B_{13} &= -10 \log \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для обчислення загальних втрат енергії скористаємось формулою:

$$B = B_{11} + B_{12} + B_{13} = -10 \left(\log \frac{1}{4} + \log \frac{1}{4} + \log \frac{1}{2} \right) = -10 \log \frac{1}{32} = 25 \text{ дБ}. \quad (10)$$

Таблиця 1 – Розраховані параметри смугового фільтра на ПАХ

Параметр	Значення
N	5
λ_a	$210 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
h	$150 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
b	$52,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
W_0	$3,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
W	$4,3 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$
η	1
B	25 дБ

Нижче наведено опис проекрованої конструкції фільтра:

Фільтр складається з одного вхідного перетворювача й одного вихідного. Вхідний перетворювач являє собою еквідистантний неаподизований широкопasmовий перетворювач і складається з двох пар штирів. Вихідний перетворювач є нееквідистантним і аподизованим, з числом пар штирів, що дорівнює десяти.

Матеріалом, який може використовуватися для звукопроводу в проектованому фільтрі на ПАХ, є ніобат літію (LiNbO_3) з орієнтацією ZY. Клас обробки звукопроводу становить $\nabla 13$, а розміри підкладки становлять $22,5 \times 10,5 \times 1,5$ мм.

Для виготовлення проектованого фільтра використовується метод прямої контактної фотолітографії.

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

Акустичні пристрої знайшли широке застосування в хімічній та біосенсорній сферах завдяки своїй високій чутливості, міцності, мініатюрному дизайну та здатності інтегруватися з польовими електронними системами. До них можна віднести кварцові кристалічні мікроваги (ККМ), пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) і плівкові об'ємні акустичні резонатори (ПОАР). ККМ і ПОАР належать до сімейства резонаторів ОАХ, тоді як пристрої ПАХ є типовими поверхневими акустичними резонаторами. Вже більше двох десятків років використовують ККМ, акустичні резонатори першого покоління, як гравіметричні хімічні/біохімічні датчики завдяки своїй чутливості до будь-яких збурень поверхні [11]. ПОАР хоч і подібні до ККМ, але вони пропонують набагато вищу резонансну частоту з меншою основною масою, ніж ККМ, що робить їх кращими з точки зору чутливості. Крім того, їх мініатюрний дизайн і просте управління дуже підходять для інтеграції з електронними системами.

Залежно від способу ізоляції розрізняють дві конструкції ПОАР: у першому випадку для акустичної ізоляції п'єзоелектричної області від підкладки використовується повітряна порожнина, у другому - акустичні бреггівські рефлектори, тобто такі, що складаються з шарів з низьким і високим акустичним імпедансом, що чергуються. Існує два резонансних режими у ПОАР-пристроях, а саме: поздовжній режим по товщині і режим зсуву по товщині. У першому випадку генеруються поздовжні хвилі, а в другому - поперечні хвилі. У поздовжньому режимі по товщині акустичні хвилі страждають від високих втрат загасання при використанні в рідких середовищах і, таким чином, в основному використовуються для зондування газоподібної фази, в той час як пристрої в режимі зсуву по товщині демонструють низьке загасання і, таким чином, краще підходять для операцій в рідкій фазі.

В типових пристроях ККМ резонансна частота лежить в діапазоні 5-20 МГц., більшість пристроїв мають частоту 10 МГц [12-13]. Оскільки ККМ є прикладом ТСМ-резонаторів, їхня резонансна частота залежить від товщини

п'єзоелектричної підкладки. Тому зменшення товщини понад певну межу зробить їх механічно нестабільними і крихкими. Це є основним обмеженням у створенні ККМ з високими частотами основного резонансу. Але цю проблему вирішує НФФ- ККМ шляхом зменшення товщини центральної частини навколо круглого електрода. І вже робоча частота збільшується до 200 МГц. Фундаментальна резонансна частота першого покоління пристроїв ПАХ спочатку була в діапазоні декількох сотень МГц, а в наш час з подальшим технологічним прогресом резонансна частота була значно збільшена до діапазону ГГц. У пристроях ПАХ основна частота залежить від геометрії електродів ЗШП, включаючи відстань між пальцями ЗШП. Хоча ККМ і ПОАР є пристроями ОАХ і мають однаковий робочий механізм, робоча резонансна частота ПОАР зазвичай знаходиться в діапазоні від декількох ГГц до близько 10 ГГц, що значно вище, ніж у ККМ. Більше того, ПОАР також мають вищі частоти, ніж ПАХ, оскільки перший пристрій пропонує вищий діапазон частот у ГГц порівняно з кількома ГГц, які пропонує ПАХ [14].

ККМ є одним з найбільш вивчених акустичних перетворювачів для хімічних/біохімічних сенсорів завдяки його невеликому розміру, простоті використання, низькому температурному коефіцієнту, низькій вартості виготовлення, а також однаково хорошій чутливості і придатності як для роботи в газовій, так і в рідкій фазі. Однак, звичайний діапазон робочих частот становить 5-20 МГц, що набагато менше, ніж у ПАХ і ПОАР. НФФ- ККМ хоч і існують але їх не так часто використовують. Пристрої на основі ПАХ добре відомі для сенсорів газової фази, їхня висока частота основного резонансу, простота виготовлення, компактний дизайн і можливість бездротової інтеграції є основними привабливими характеристиками. Сенсорні пристрої на основі ПАХ є одним з особливих класів акустичних перетворювачів, які здобули комерційний успіх в аналізі газової фази. У хімічному/біохімічному зондуванні ПОАР є новішими акустичними пристроями, ніж ККМ і ПАХ. У сенсорній області є дві основні переваги використання ПОАР в якості акустичних перетворювачів: по-перше, це висока резонансна частота, яка призводить до

підвищення чутливості і зниження меж виявлення, а по-друге, це їх здатність працювати в рідких середовищах [15-16].

У широкому спектрі застосувань, як-от вимірювання газів, рідин і біосенсорів, успішно застосовуються пристрої датчиків на об'ємних акустичних хвилях (ОАХ) і поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Датчики ОАХ використовують режими зсуву по товщині, а датчики ПАХ використовують хвилі Релея або горизонтально поляризовані зсувні хвилі. Селективність і специфічність датчиків визначаються їхніми покриттями. У випадках, коли необхідно визначити групу аналітів або є селективні покриття, що реагують на кілька аналітів, використання мультисенсорних масивів має переваги, оскільки вони дають змогу отримати якісну та кількісну інформацію про зразок, аналізуючи сигнали від кількох датчиків. Масиви віртуальних датчиків, з іншого боку, використовують тільки один фізичний датчик, але застосовують вдосконалені методи оцінки сигналу або попереднє розділення зразка, що призводить до результатів, аналогічних тим, які отримують під час використання мультисенсорних масивів. Обидва типи масивів, мультисенсорні та віртуальні, мають перспективи щодо системної інтеграції та вартості їх виготовлення.

Незважаючи на численні вимоги, пов'язані з роботою з акустичними датчиками та масивами датчиків, масиви акустичних датчиків успішно застосовують у різних галузях для виявлення кількох аналітів у газоподібних і рідких зразках. У більшості випадків використовуються вже відомі пристрої та конфігурації датчиків ОАХ і ПАХ, і дослідження зосереджені на оптимізації шарів та знаходженні нових застосувань. Однією з нових розробок у галузі датчиків є впровадження акустичних резонаторів на п'єзоелектричному плівковому резонаторі (ПОАР) як сенсорних пристроїв, що обіцяє підвищену чутливість завдяки дуже високим робочим частотам [17-18]. Однак для досягнення більш високої чутливості масивів необхідно знизити рівень шуму цих пристроїв. Крім того, процеси виготовлення і реєстрації сигналів ПОАР ще не стандартизовані, що вимагає додаткових досліджень для створення доступних і високопродуктивних пристроїв. Інші розробки в галузі сенсорних систем

спрямовані на бездротове або безелектродне зчитування. Ці конфігурації можуть поліпшити продуктивність датчика, як це продемонстровано у випадку пристроїв на основі кварцового кристала (ККМ). Крім того, бездротові сенсорні системи дадуть змогу моніторити небезпечні речовини з безпечної відстані, особливо під час використання мережі з безлічі бездротових сенсорних масивів.

Полімери продовжують застосовуватися як чутливі покриття, їх розвиток не зупиняється. Але є і нові підходи які полягають у використанні біомолекул (ДНК, пептидів і білків) у газових сенсорах для впровадження нових механізмів взаємодії та забезпечення кращої селективності. Проводяться активні дослідження і з часом вони покажуть, наскільки нові покриття можуть змагатися з традиційними. Однак, особливо для нещодавно розроблених покриттів, стабільність чутливого шару часто не була повністю досліджена з погляду зберігання властивостей, або у випадку хімічних сенсорів, повторюваності результатів під час багаторазових вимірювань.

Є два напрямки за якими рухається розвиток масивів датчиків і вони протилежні. З одного боку, спостерігається збільшення кількості датчиків, а з іншого боку – навпаки, зменшення кількості датчиків і поліпшення обробки сигналу, що призводить до появи віртуальних масивів. Перевага останнього підходу полягає в тому, що використання меншої кількості датчиків знижує вплив різних дрейфів, що виникають у датчиках, на сигнали, що полегшує процес калібрування. Однак, особливо в разі, коли виявлені аналітичні матеріали дуже схожі один на одного, все одно потрібна певна кількість датчиків для селективного виявлення окремих компонентів. Результатом об'єднання цих двох напрямів є створення високопродуктивних масивів з мінімальною складністю виготовлення [19].

У той час як масиви датчиків для хімічних сенсорів і електронних носіїв широко поширені, підходи до створення масивів біосенсорів досі недостатньо представлені, хоча їхнє доцільне використання уже було продемонстровано. Однією з можливих причин цього є те, що профілі біомаркерів для діагностичних застосувань, які можна легко визначити за допомогою таких масивів, поки що не

повністю ідентифіковані. Через це ключові області застосування цих масивів ще не визначені повною мірою [20].

Поверхневих акустичні хвилі (ПАХ) мають широке застосування в різних галузях, включно з електронікою, зв'язком, медициною, матеріалознавством і багатьма іншими. В електроніці поверхневі акустичні хвилі використовують у пристроях зв'язку, наприклад, у фільтрах і резонаторах, для фільтрації та селективності частот сигналу. Також вони застосовуються для синхронізації тактових сигналів у цифрових пристроях, а також у безконтактних датчиках для вимірювання відстані, швидкості та кута повороту. У медицині ПАХ використовуються в біосенсорах для детектування та аналізу біомолекул, таких як ДНК, РНК і білки, для діагностики хвороб і моніторингу здоров'я пацієнтів. У матеріалознавстві поверхневі акустичні хвилі використовують для вивчення механічних властивостей матеріалів, як-от модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, термічне розширення та інші параметри, які можуть бути виміряні за допомогою ПАХ. Крім того, вони можуть використовуватися для контролю якості матеріалів і дефектоскопії.

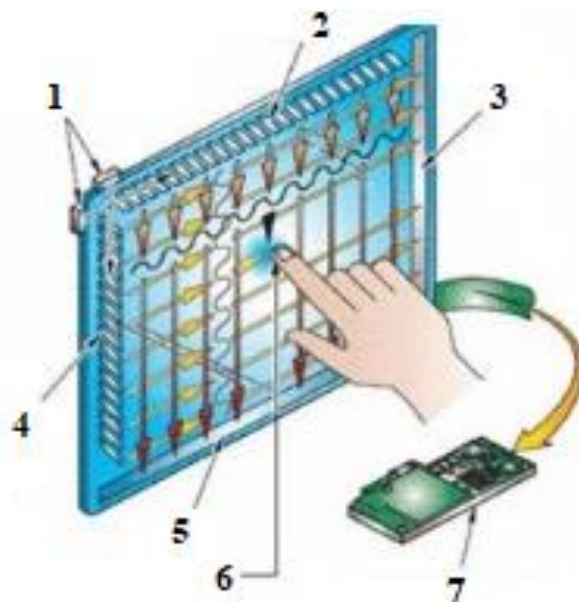


Рисунок 3.1 – Технологія поверхнево акустичної хвилі на сенсорному дисплеї: 1– п'єзоелектричні перетворювачі ; 2 – відбивачі звукових хвиль; 3 – сенсор; 4 – відбивачі звукових хвиль; 5 – сенсор; 6 – дотик поглинає частину енергії ПАХ; 7 – контролер. Адаптовано із роботи [15]

Технологія поверхнево-акустичної хвилі (ПАХ) може використовуватися на сенсорних дисплеях для виявлення дотику пальцем або іншими об'єктами. Ця технологія використовує п'єзоелектричний матеріал, який генерує поверхневу акустичну хвилю, коли на нього потрапляє електричний сигнал. Коли палець торкається поверхні сенсорного дисплея, відбуваються мікроскопічні деформації, які змінюють характеристики поверхневої акустичної хвилі. Цю зміну потім реєструють за допомогою приймача ПАХ, який розташований на протилежному боці дисплея. Використовуючи інформацію про зміну акустичної хвилі, система визначає місце розташування дотику і реагує відповідним чином.

Технологію поверхневих акустичних хвиль використовують у різних типах сенсорних дисплеїв, включно з мобільними телефонами, планшетами, ноутбуками та моніторами. Вона має низку переваг, як-от висока чутливість до дотику, низьке енергоспоживання, висока швидкість реакції та можливість використання з різними типами поверхонь, зокрема зі склом і пластиком. Однак технологія ПАХ також має свої недоліки, включно з обмеженою точністю розпізнавання жестів і можливістю хибних спрацьовувань у разі випадкового торкання поверхні. Також стійкість до подряпин та інших пошкоджень поверхні може бути проблемою. Проте, ПАХ залишається популярним способом виявлення дотику на сенсорних дисплеях завдяки своїй надійності, швидкості та чутливості [21-22].

Ультразвуковий сканер відбитка пальців - це пристрій, що використовує ультразвукові хвилі для сканування відбитків пальців. Він працює на основі принципу відбиття звукових хвиль від кордону розділу двох середовищ з різними акустичними властивостями, такими як шкіра і кістка. Коли палець поміщається на ультразвуковий сканер, пристрій генерує ультразвукову хвилю, яка спрямовується на палець. Потім хвиля відбивається від різних шарів пальця, включно з епідермісом, дермою і кістками, і повертається на датчики сканера. Вимірюючи час проходження звукової хвилі до різних шарів пальця і назад, ультразвуковий сканер визначає глибину і форму відбитка пальця.

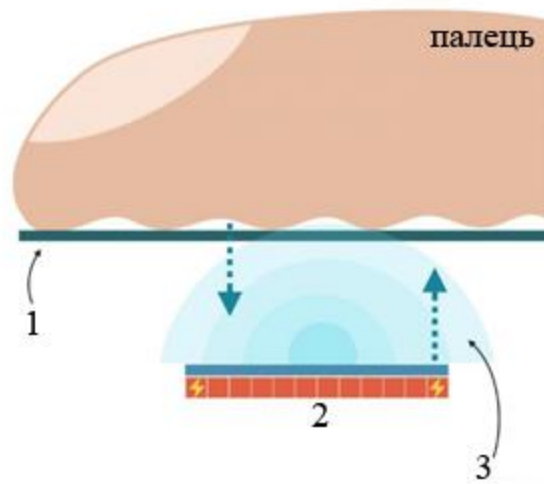


Рисунок 3.2 – Ультразвуковий сканер відбитку пальців: 1 – захисне скло, 2 – ультразвуковий сканер; 3 – звукові хвилі. Адаптовано із роботи [16]

Ультразвуковий сканер відбитка пальців має кілька переваг перед іншими технологіями сканування, такими як оптичне сканування. Він може працювати на мокрих або брудних пальцях, а також на пальцях із пошкодженою шкірою. Також він більш точний під час сканування глибоких шарів пальця, що робить його надійнішим і безпечнішим для ідентифікації особи. Однак ультразвуковий сканер також може мати обмеження в скануванні пальців зі щільною кістковою структурою, що може знизити точність сканування.

Сенсор ультрафіолетового випромінювання на основі поверхневих акустичних хвиль. ZnO є добре відомим матеріалом з п'єзоелектричними властивостями, що проявляються у високому коефіцієнті п'єзоелектричного зв'язку, сильній акустоелектричній взаємодії та легкості інтеграції в електронні схеми. Існує кілька методів вирощування тонких плівок ZnO таких як хімічне осадження з парової фази, золь-гель метод, молекулярно-променева епітаксія, імпульсне лазерне осадження, вакуумне дугове осадження та магнетронне розпилення. На отриману плівку ZnO наносять ЗШП методом радіочастотного розпилення з мішені Al в атмосфері Ar. На рисунку 1.12 показано сенсор ультрафіолетового випромінювання на основі ПАХ та дві різні умови освітлення.

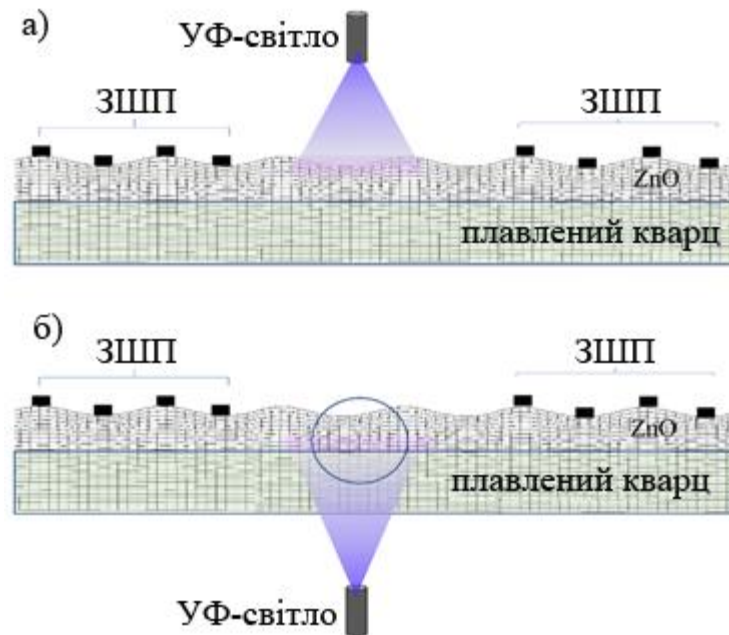


Рисунок 3.3 – Схема сенсора ультрафіолетового випромінювання на основі поверхневих акустичних хвиль для (а) верхнього та (б) нижнього освітлення. Адаптовано із роботи [17]

В цьому датчику фаза поверхневих акустичних хвиль, $\varphi = 2\pi L/\lambda = 2\pi Lf/v$, відстежується в часі протягом циклів темрява/УФ-світло/темрява, де L — шлях хвилі, а v — фазова швидкість. Будь-яка зміна швидкості хвилі, викликана поглинанням УФ світла, відповідає фазовим зсувам. Часовий відгук сенсора на зміну густини потужності УФ-випромінювання вимірюється як різниця між значеннями фази в темряві та під дією УФ-світла [17].

Гіроскоп на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) має просту структуру, малий розмір, тривалий термін служби, ударостійкість і він має перспективи широкого застосування. Гіроскоп ПАХ працює на основі гіроскопічного ефекту ПАХ, під час якого хвиля Релея поширюється поверхнею підкладки та викликає вібрації частинок в середовищі за еліптичною траєкторією в площині, яка складається з напрямку поширення акустичної хвилі та напрямку нормалі підкладки. Траєкторія коливання частинок змінюється, що призводить до зміни швидкості та частоти ПАХ. Таким чином, величина вектора обертання може бути охарактеризована шляхом виявлення зміни частоти [18].

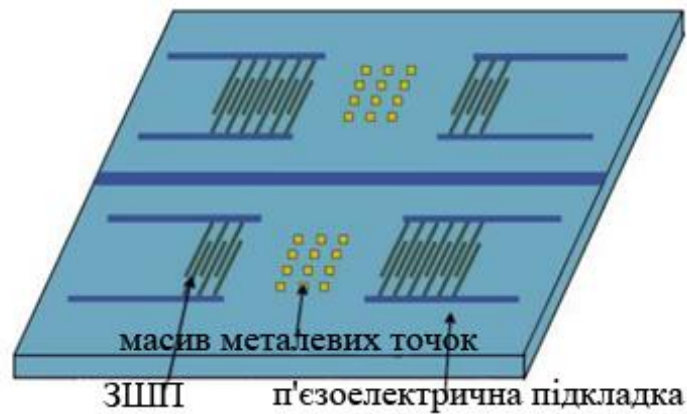


Рисунок 3.4 – Структура гіроскопа на ПАХ. Адаптовано із роботи [19]

Структура складається з двох паралельних і зворотних ліній затримки ПАХ для формування диференціального режиму зондування. Коли гіроскоп ПАХ обертається, вібруючі частинки в подвійних лініях затримки, розташованих в протилежних напрямках, піддаються дії сили Кориоліса в протилежному напрямку. Використовуючи різницю частот, можна отримати потрібні нам дані [19]. Основною проблемою гіроскопа на ПАХ є його низька чутливість, але дослідження продовжуються. Зменшення відбивної здатності в ЗШП ефективно покращило чутливість [20].

Системи акустичного зондування в основу яких покладено оптичне волокно можуть використовуватися для дистанційного моніторингу акустичних сигналів, викликаних зовнішніми перешкодами. Залежно від безперервності чутливих елементів існують дві основні технології акустичного зондування за допомогою оптичного волокна: квазірозподілена і розподілена. Кожна з цих технологій відповідає різним вимогам у різних галузях застосування. Недавні дослідження в галузі акустичного зондування зосереджуються на вдосконаленні інтерферометра Фабрі-Перо (FPI), що працює з матеріалом мембрани, а також на вивченні безперервної волоконної решітки Брегга (FBG). Водночас інтерферометрія Маха-Цендера (MZI), інтерферометрія Міхельсона (MI) та інтерферометрія Сагнака (SI) активно розвиваються для оптимізації алгоритмів демодуляції та підвищення ефективності зондування. Наразі фазочутливий

оптичний рефлектометр із часовою діаграмою спрямованості (ϕ -OTDR) активно досліджується з метою поліпшення співвідношення сигнал/шум і розроблення комбінованих оптичних структур.

Технологія акустичного зондування з використанням оптичного волокна має низку переваг, таких як можливість великомасштабного моніторингу, ефективно виявлення, висока гнучкість, захист від електромагнітних завад і має значні економічні та фінансові вигоди. При впливі акустичного збурення на чутливе волокно, оптичні параметри, такі як інтенсивність, фаза, стан поляризації та оптична частота волокна, піддаються змінам. Кожна з доступних технологій має свої переваги в плані вартості, складності та продуктивності. Систем зондування на основі оптичного волокна знаходять своє застосування в таких сферах, як військова оборона, моніторинг стану конструкцій, нафторозвідка і розробка [21].

Ще одним варіантом застосування є модель скінченних елементів (FEM) для моделювання та виготовлення квадратної мембрани з мікротунелем для акустичного датчика MEMS. Цей датчик може використовуватися для вимірювання широкого діапазону робочих частот і високих рівнів звукового тиску (SPL) від 100 дБ до 180 дБ у спускових апаратах і літаках. Структура мембрани складається з п'єзоелектричного шару ZnO, розміщеного між двома алюмінієвими електродами на тонкій кремнієвій діафрагмі. Мікротунель, що з'єднує порожнину з атмосферою, присутній у структурі для компенсації тиску. Мікротунель визначає нижню частоту відсічення пристрою. Для оптимізації розмірів мікротунелю і структури мембрани використовувалися аналітичні та імітаційні підходи. Також проводиться аналіз зміни зміщення, напруги, чутливості та резонансної частоти за різних розмірів і товщини мембрани. Оптимізовану структуру мембрани розміром 1750×1750 мкм² з мікротунелем завширшки 100 мкм і завглибшки 24 мкм було виготовлено з використанням технології об'ємної мікрообробки. Відгук виготовленого пристрою було протестовано з використанням лазерного доплерівського вібрметра (LDV) і системи вимірювання чутливості.

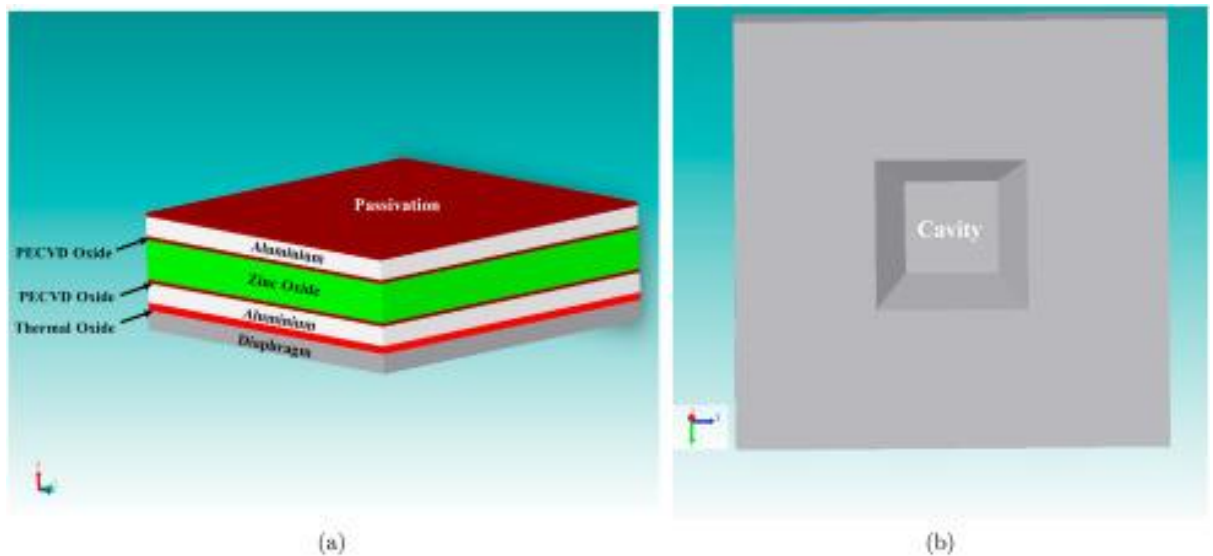


Рисунок 3.5 – Спроекована структура акустичного сенсора за допомогою MEMS інструменту CoventorWare: (а) поперечний переріз та (б) зворотній бік. Адаптовано із роботи [22]

Для оптимізації розмірів мембрани квадратної форми і мікротунелю були використані методи моделювання на основі кінцево-елементного (FEM) і локального еквівалентного (LEM) методів. Розмір мембрани становив 1750×1750 мкм² з товщиною 20 мкм, щоб задовольнити вимоги широкого діапазону робочих частот і високого рівня звукового тиску (SPL) під час вимірювання тиску в супутникових ракетах-носіях і літаках. Оптимізовані розміри мембрани та мікротунелю було реалізовано з використанням об'ємного мікрооброблення та стандартних процесів, сумісних із комплементарними метал-оксид-напівпровідниковими (CMOS) на кремнієвій підкладці. Виготовлений п'єзоелектричний (ZnO) пристрій показав резонансну частоту 80 кГц і чутливість 72 мкВ/Па. Це аналітичне рішення і запропонований технологічний процес виготовлення мікротунелю з гладким отвором у глибокій порожнині мають велику цінність під час розроблення акустичних датчиків для вимірювання високого тиску, а також для хімічних і біомедичних застосувань [22].

Загалом, використання акустичних хвиль має широкий спектр в різних галузях і продовжує розвиватися з розвитком нових матеріалів і технологій.

ВИСНОВКИ

1. Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) є перспективними для створення активних та пасивних первинних перетворювачів температури, вологості, тиску, складу газового середовища, переміщення, тощо. Використання аподизації електродів зустрічно-штирових перетворювачів дозволяє змінювати характеристики функціональних пристроїв на ПАХ, що значно розширює галузі застосування цих пристроїв.
2. До основних переваг акустичних хвиль можна віднести невелику швидкість поширення, що приблизно в 10^5 разів менше швидкості поширення електромагнітних хвиль, а також відносно невеликі втрати на поглинання і електромеханічне перетворення.
3. Ефективним методом забезпечення необхідної форми амплітудночастотних характеристик фільтрів на поверхневих акустичних хвилях є аподизація електродів зустрічно-штирових перетворювачів згідно функцій Хеммінга, Чебишева, Бесселя, Кайзера тощо.
4. Згідно з розроблених методик розраховані конструктивні та акустоелектричні параметри фільтра на ПАХ на базі звукопровода із ніобат літію YZ- зрізу: кількість пар електродів – $N = 5$, апертура – $W = 4.3 \cdot 10^{-3}$ м·с, коефіцієнт розсіювання – від 0,25 до 0,5, загальні втрати – $B = 25$ дБ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Trivedi S., Nemade, H. B. Finite element simulation of Love wave resonator for DNA detection // *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. – 2015. – V. 7(4). – P. 210–218.
2. Banerjee S., Leckey C.A. *Computational Nondestructive Evaluation Handbook: Ultrasound Modeling Techniques*; Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020, 553 p.
3. Mandal D., Banerjee S. Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications // *Sensors*. – 2022. – V. 22(3). – ID 820.
4. Drafts, B. Acoustic wave technology sensors. *IEEE Trans. Microw. Theory Techniques* 2001, 49, 795–802.
5. Ballantine D. Jr., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Zellers E., Frye G., Wohltjen H. *Acoustic Wave Sensors: Theory, Design and Physico-Chemical Applications* (Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1996).
6. Fu Y.Q., Luo J.K., Nguyen N.T., Walton A.J., Flewitt A.J., Zu X.T., Li. Y., McHale G., Matthews A., Iborra E., Du. H., Milne, W.I. Advances in piezoelectric thin films for acoustic biosensors, acoustofluidics and lab-on-chip applications // *Progress in Materials Science*. – 2017. – V. 89. – P. 31–91.
7. Bhalla M.R., Bhalla A.V. Comparative Study of Various Touchscreen Technologies // *International Journal of Computer Applications*. – 2010. – No 8. – P. 106–120.
8. Devkota J., Ohodnicki P.R., Greve D.W. SAW Sensors for Chemical Vapors and Gases // *Sensors*. – 2017. – V. 17(4). – ID 801.
9. Afzal A., Dickert F.L. Surface acoustic wave sensors for chemical applications. *Chem. Sens. Compr. Sens. Technol.* – 2011 – V. 3. – P. 447–484.
10. Palla-Papavlu A., Voicu S.I., Dinescu M. Sensitive Materials and Coating Technologies for Surface Acoustic Wave Sensors // *Chemosensors*. – 2021. – V. 9(5). – ID 105.
11. Buttry D.A., Ward M.D, Measurement of interfacial processes at electrode surfaces with the electrochemical quartz crystal microbalance // *Chemical Reviews*. – 1992. – V. 92. – P. 1355–1379.
12. Percival C., Stanley S., Braithwaite A., Newton M., McHale G. Molecular

- imprinted polymer coated QCM for the detection of nandrolone // *Analyst*. – 2002. – V. 127. – P. 1024–1026.
13. Mujahid A., Afzal A., Dickert F.L. An Overview of High Frequency Acoustic Sensors – QCMs, SAWs and FBARs – Chemical and Biochemical Applications // *Sensors*. – 2019. – V. 19(20). – ID 4395.
 14. Länge K. Bulk and Surface Acoustic Wave Sensor Arrays for Multi-Analyte Detection: A Review // *Sensors*. – 2019. – V. 19(24). – ID 5382.
 15. Технології сенсорних екранів. Погляд зсередини. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digitaldevice.ua/project/tehnologii-sensornih-ekranov> (Дата доступу: 15.05.2023 р.).
 16. Сканер відбитка пальця на смартфоні. Як працює і який краще – емнісний, оптичний або ультразвуковий? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://deep-review.com/articles/fingerprint-sensors-for-dummies/> (Дата доступу: 10.05.2023 р.).
 17. Caliendo C., Benetti M., Cannatà D. Buzzin A., Grossi F., Verona E., Cesare G. UV Sensor Based on Surface Acoustic Waves in ZnO/Fused Silica // *Sensors*. – 2023. – V. 23(9). – ID 4197.
 18. Wang W., Shao X., Liu X., Liu J., He S., Enhanced Sensitivity of Surface Acoustic Wave-Based Rate Sensors Incorporating Metallic Dot Arrays // *Sensors*. – 2014. – V. 14(3). – P. 3908–3920.
 19. Chen H., Lu M., Meng L., Wang W., Shao X. Finite Element Analysis of the Distribution Parameters of a Metal Dot Array in a SAW Gyroscope // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12(16). – ID 8062.
 20. Sun X., Liu W., Shao X., Zhou S., Wang W., Lin D. Surface Acoustic Wave Gyroscopic Effect in an Interdigital Transducer // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – ID 106.
 21. Wang Y., Yuan H., Liu X., Bai Q., Zhang H., Gao Y., Jin B. A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing // *EEE Access*. – 2019. – V. 7. – P. 85821–85837.
 22. Kumar A., Varghese A., Sharma G., Kumar M., Sharma G.K., Prasad M., Janyani V., Yadav R.P., Elgaid K. Optimization and fabrication of MEMS based piezoelectric acoustic sensor for wide frequency range and high SPL acoustic application // *Micro and Nanostructures*. – 2023. – V. 179. – ID 207592.