

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНЦЕНТРАЦІЇ
ГАЗУ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-24м
спеціальності 172 Електронні комунікації
та радіотехніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)
Мізяківський В.М.
(прізвище та ініціали)

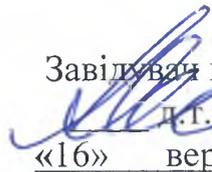
Керівник: Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)
« 12 » 12 2025 р.

Опонент: Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)
« 15 » 12 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)
« 16 » 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
 д.т.н., проф. Осадчук О.В.
«16» вересня 2025 року

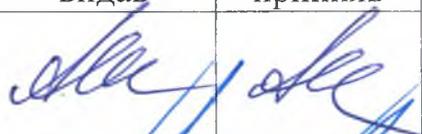
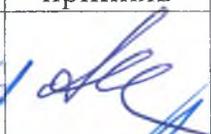
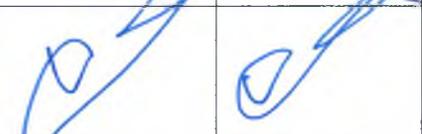
З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Мізяківському Василю Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Радіовимірювальні перетворювачі концентрації газу»
керівник роботи д.т.н., проф., зав. кафедри ІРТС Осадчук О.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.
2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025р.
3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення 5В; вихідна потужність від 1 мкВт до 10 мВт; датчик поверхневої акустичної хвилі (SAW) повинен працювати на високих частотах від 100 МГц до 1 ГГц; визначення концентрації CO₂ від 0,1 ppm до 1000 ppm.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Огляд сучасного стану газочутливих польових транзисторів. Розробка сенсора з автономним живленням для моніторингу вуглекислого газу з використанням технології поверхневих акустичних хвиль (SAW). Математичне моделювання перетворювачів концентрації газу. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Відновлення за допомогою методу самозатвердіння. Реконфігурований контроль вмісту кисню. Газовий датчик на основі кремнієвого польового транзистора. Польовий транзистор та резистивний газовий сенсор на основі легованого Yb In₂O₃. Газочутливі властивості TFT h-In₂O₃ /SWNT. Характеристики низькочастотного шуму для газових сенсорів на основі In₂O₃. Схема системи газового зондування та вимірювання низькочастотного шуму. Автономний датчик для виявлення вуглекислого газу. Зібрана електрична потужність PZT-5Н. Електрична реакція PZT та PVDF.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	Осадчук О.В. Зав. каф. ІРТС, професор, д.т.н.		
Економічна частина	Козловський В.О. професор каф. ЕПВМ, професор, к.е.н.		

7. Дата видачі завдання . 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-15.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	17.12.2025-18.12.2025	

Студент


(підпис)

Мізяківський В.М.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук О.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Мізяківський В.М. Радіовимірювальні перетворювачі концентрації газу. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 108с. На українській мові. Бібліогр.: 48 назв; Табл.: 14; Рис. 27.

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасного стану розвитку перетворювачів концентрації газів. Відмінна стабільність, низька вартість, висока чутливість та оксид індію (In_2O_3), напівпровідника на основі оксиду металу, були підтверджені в галузі газових датчиків. Звичайні газові датчики на основі In_2O_3 використовують прості та легкі у виготовленні резистивні компоненти як перетворювачі. Однак швидкий розвиток Інтернету речей висунув вищі вимоги до газових датчиків на основі оксидів металів, включаючи, перш за все, зниження робочих температур, покращення селективності та реалізацію інтегрованості.

В другому розділі проведені дослідження підкреслюють ефективність п'єзоелектричних матеріалів та технології поверхневих акустичних хвиль (SAW) у сферах механічного збору енергії та виявлення CO_2 . Було показано, що зібрана електрична потужність збільшується пропорційно прикладеному напруженню, що підкреслює вирішальну роль геометричної оптимізації, зокрема збільшення ширини п'єзоелектричної підкладки, у максимізації перетворення енергії. Проведені дослідження які зосереджені на нелінійному стрибковому резонансі в електронних схемах, забезпечують цінну теоретичну основу для поширення цих результатів на ширші архітектури пристроїв.

В третьому розділі проведено математичне моделювання яке демонструє високу чутливість технології SAW для виявлення низьких концентрацій CO_2 . Було зафіксовано лінійне зміщення резонансної частоти зі збільшенням концентрації CO_2 , з можливістю виявлення до 10 ppm. Крім того, було підтверджено вплив параметрів навколишнього середовища: вищий тиск посилює зміщення частоти, тоді як вища температура послаблює його, що, безумовно, пов'язано зі зниженням об'ємної щільності молекул CO_2 .

Ключові слова: перетворювач концентрації газу, п'єзоелектричний матеріал, газочутливий резистивний елемент, поверхневі акустичні хвилі, IoT система.

ANNOTATION

Mizyakivskiy V.M. Radio-measuring gas concentration converters. Master's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – p. In Ukrainian. Bibliography: 48 titles; Fig.27.

In the master's qualification work, an analysis of the current state of development of gas concentration converters was conducted. Excellent stability, low cost, high sensitivity and indium oxide (In_2O_3), a semiconductor based on a metal oxide, were confirmed in the field of gas sensors. Conventional gas sensors based on In_2O_3 use simple and easy-to-manufacture resistive components as converters. However, the rapid development of the Internet of Things has put forward higher requirements for gas sensors based on metal oxides, including, first of all, reducing operating temperatures, improving selectivity and implementing integration.

In the second section, the studies highlight the effectiveness of piezoelectric materials and surface acoustic wave (SAW) technology in the fields of mechanical energy harvesting and CO_2 detection. It was shown that the harvested electrical power increases proportionally to the applied voltage, which highlights the crucial role of geometric optimization, in particular increasing the width of the piezoelectric substrate, in maximizing energy conversion. The studies focused on nonlinear hopping resonance in electronic circuits provide a valuable theoretical basis for extending these results to broader device architectures.

In the third section, mathematical modeling is performed that demonstrates the high sensitivity of SAW technology for detecting low concentrations of CO_2 . A linear shift of the resonance frequency with increasing CO_2 concentration was recorded, with the possibility of detection down to 10 ppm. Furthermore, the influence of environmental parameters was confirmed: higher pressure enhances the frequency shift, while higher temperature weakens it, which is certainly related to the decrease in the bulk density of CO_2 molecules.

Keywords: gas concentration transducer, piezoelectric material, gas-sensitive resistive element, surface acoustic waves, IoT system.

ЗМІСТ

ВСТУП		8
1	ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ГАЗОЧУТЛИВИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ	11
1.1	Тенденції розвитку газочутливих перетворювачів	11
1.2	Типові перетворювачі для газових сенсорів на польових транзисторах In ₂ O ₃	13
1.3	Газочутливі МОП-транзистори	15
1.4	Газочутливі ТФТ-дисплей	21
1.5	Властивості газових сенсорів на основі польових транзисторів In ₂ O ₃	24
1.6	Чутливість та межа виявлення.....	25
1.7	Співвідношення сигнал/шум в газочутливих сенсорах.....	27
1.8	Реагування та відновлення газочутливих сенсорів.....	31
1.9	Можливість роботи газочутливих сенсорів при низьких температур.....	34
1.10	Вибірковість сенсорів газу.....	36
1.11	Оптимізація продуктивності газових сенсорів на основі польових транзисторів In ₂ O ₃	38
1.12	Перспективи розвитку газочутливих сенсорів.....	43
1.13	Висновки до розділу	46
2	РОЗРОБКА СЕНСОРА З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ (SAW)	48
2.1	Основні напрямки побудови сенсорів з автономним живленням для моніторингу вуглекислого газу	48
2.2	Система виявлення CO ₂ , принцип функціонування	52
2.3	Математична модель механізму виявлення CO ₂	56
2.4	Чисельне моделювання п'єзоелектричного генератора	58
2.5	Чисельне моделювання датчика CO ₂ методом SAW	61
2.6	Висновки до розділу	65
3	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ	66
3.1	Відгук п'єзоелектричного генератора	66
3.2	Оптимальний електричний заряд PZT 5-N та PVDF	66
3.3	Моделювання впливу гнучкості матеріалу на електричну реакцію.....	69
3.4	Моделювання впливу механічного збудження на електричну реакцію...	70
3.5	Моделювання ширини п'єзоелектричної пластини (wНерозбірливо) Вплив на електричну реакцію.....	71
3.6	Моделювання вимірювань датчика CO ₂	72

3.7	Висновки до розділу.....	76
4	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	77
4.1	Технологічний аудит розробленого радіовимірювального перетворювача концентрації газу (далі – розробки).....	77
4.2	Розрахунок витрат на розроблення радіовимірювального перетворювача концентрації газу	81
4.3	Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки	86
	ВИСНОВКИ.....	90
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	97
	Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	107

ВСТУП

Актуальність. Індустріалізація зазнала швидких ітерацій та модернізації за останні десятиліття, що призвело до викидів кількох отруйних та небезпечних газів, які негативно вплинули на якість повітря та поставили під загрозу здоров'я людини [1-3]. Таким чином, газові сенсори зараз широко використовуються в кількох галузях, таких як медична діагностика, виявлення псування харчових продуктів, сільське господарство, хімічне виробництво та проблеми безпеки, пов'язані з горючістю та вибухонебезпечними подіями [4-6]. Стандартні прилади, засновані на газовій хроматографії, спектроскопії та мас-спектрометрії, можуть досягати надзвичайних рівнів точності виявлення [7]. Однак обмеження традиційного обладнання, такі як висока вартість, складні процедури та відсутність портативності, роблять його непридатним для вимог швидкого виявлення в деяких ситуаціях. Інтенсивні дослідження в останні роки були зосереджені на напівпровідникових резистивних сенсорах з простими конструкціями, враховуючи необхідність недорогого та швидкого виявлення. Завдяки своїй винятковій стабільності, доступній вартості, високій швидкості відгуку та чутливості, металоксидно-напівпровідникові (МОП) матеріали, які використовуються в основних комерційних газових сенсорах, були ретельно досліджені як чутливі матеріали в напівпровідникових резистивних газових сенсорах [8-10].

Швидкий розвиток Інтернету речей (IoT) висунув більш жорсткі вимоги до газових сенсорів, що працюють на основі оксидів металів. Ці вимоги зазвичай включають здатність знижувати робочу температуру, підвищувати селективність та полегшувати сумісність інтеграції [11]. Протягом останнього десятиліття газовим сенсорам на польових транзисторах (FET) приділяється більше уваги для вирішення трьох основних проблем, зазначених вище. Фундаментальною характеристикою, яка відрізняє польові транзистори від резистивних сенсорів, є керування транспортуванням носіїв заряду по каналах напруги затвора. Загалом, польові транзистори можуть бути побудовані зі зменшеними розмірами, що робить їх придатними для інтеграції комплементарних металоксидно-напівпровідникових (CMOS) схем [12]. Крім того, газові сенсори на польових транзисторах на основі оксидів металів пропонують кращу продуктивність порівняно з резистивними сенсорами з точки зору покращеної чутливості, збільшеного співвідношення сигнал/шум та зменшених меж виявлення [13].

Метою роботи є покращення метрологічних характеристик та розробка радіовимірвальних перетворювачів газу.

Об'єктом дослідження є процес перетворення концентрації газу у цифровий сигнал за допомогою газочутливих елементів на основі ПАХ.

Предметом дослідження – статичні і динамічні характеристики перетворювачів для визначення концентрації в газових середовищах на основі ПАХ.

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються наступні задачі:

- проаналізувати існуючі перетворювачі концентрації газу та обґрунтувати переваги сенсорів газу із In_2O_3 ;
- розглянути принципи роботи та побудови газочутливих перетворювачів на ПАХ;
- провести моделювання впливу газу на сенсори газу із ПАХ;
- провести експериментальне дослідження.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей перетворювачів концентрації газу на основі ПАХ; основних положень теорії функції комплексної змінної; інтегрального та диференціального числення для побудови математичної моделі.

Наукова новизна одержаних результатів:

Проведені дослідження підкреслюють ефективність п'єзоелектричних матеріалів та технології поверхневих акустичних хвиль (SAW) у сферах механічного збору енергії та виявлення CO_2 . Що стосується збору енергії, полімер PVDF продемонстрував кращі характеристики, ніж кераміка PZT 5-H, незважаючи на меншу генерацію струму. Ця перевага пов'язана з більшою механічною гнучкістю PVDF, що дозволяє більшу деформацію під навантаженням і, як наслідок, покращує електричну реакцію. Було показано, що зібрана електрична потужність збільшується пропорційно прикладеному напруженню, що підкреслює вирішальну роль геометричної оптимізації, зокрема збільшення ширини п'єзоелектричної підкладки, у максимізації перетворення енергії, особливо для PVDF.

Нелінійні ефекти також спостерігалися у відгуку жорсткішого матеріалу PZT 5-H, що свідчить про появу нелінійної динамічної поведінки в певних конфігураціях. Ці явища відкривають багатообіцяючі перспективи для розробки нового класу нелінійних п'єзоелектричних осциляторів та високопродуктивних нелінійних резонаторів. Проведені дослідження які зосереджені на нелінійному стрибковому резонансі в

електронних схемах, забезпечують цінну теоретичну основу для поширення цих результатів на ширші архітектури пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведено порівняльний аналіз сенсорів газу на основі In_2O_3 . Відмінна стабільність, низька вартість, висока чутливість та оксид індію (In_2O_3), напівпровідника на основі оксиду металу, були підтвержені в галузі газових датчиків. Звичайні газові датчики на основі In_2O_3 використовують прості та легкі у виготовленні резистивні компоненти як перетворювачі.

Проведено математичне моделювання яке демонструє високу чутливість технології SAW для виявлення низьких концентрацій CO_2 . Було зафіксовано лінійне зміщення резонансної частоти зі збільшенням концентрації CO_2 , з можливістю виявлення до 10 ppm. Крім того, було підтверджено вплив параметрів навколишнього середовища: вищий тиск посилює зміщення частоти, тоді як вища температура послаблює його, що, безумовно, пов'язано зі зниженням об'ємної щільності молекул CO_2 .

Підсумовуючи, результати не лише підтверджують високу продуктивність та чутливість досліджуваних матеріалів і технологій, але й підкреслюють їхній значний потенціал для інтеграції в передові програми, від енергетичних автономних систем до зондування навколишнього середовища. Подальша робота буде зосереджена на вдосконаленні цих технологій, використанні їхніх нелінійних характеристик та адаптації їх до різних умов навколишнього середовища та вимог конкретного застосування.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається з 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ГАЗОЧУТЛИВИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Відмінна стабільність, низька вартість, висока чутливість та оксид індію (In_2O_3), напівпровідника на основі оксиду металу, були підтверджені в галузі газових датчиків. Звичайні газові датчики на основі In_2O_3 використовують прості та легкі у виготовленні резистивні компоненти як перетворювачі. Однак швидкий розвиток Інтернету речей висунув вищі вимоги до газових датчиків на основі оксидів металів, включаючи, перш за все, зниження робочих температур, покращення селективності та реалізацію інтегрованості. У відповідь на ці три основні проблеми, газові датчики на основі польових транзисторів (FET) викликали зростаючий інтерес протягом останнього десятиліття. Порівняно з іншими напівпровідниками на основі оксиду металу, In_2O_3 демонструє більшу концентрацію та рухливість носіїв заряду. Ця властивість є перевагою для виробництва польових транзисторів з винятковими електричними характеристиками, за умови, що струм у вимкненому стані контролюється на достатньо низькому рівні. У цьому огляді представлено значний прогрес, досягнутий у газових датчиках на основі польових транзисторів In_2O_3 за останні десять років, охоплюючи типові конструкції пристроїв, показники продуктивності газових датчиків, методи оптимізації та стратегії майбутнього розвитку на основі газових датчиків на основі польових транзисторів In_2O_3 .

1.1 Тенденції розвитку газочутливих перетворювачів

Індустріалізація зазнала швидких ітерацій та модернізації за останні десятиліття, що призвело до викидів кількох отруйних та небезпечних газів, які негативно вплинули на якість повітря та поставили під загрозу здоров'я людини [1-3]. Таким чином, газові сенсори зараз широко використовуються в кількох галузях, таких як медична діагностика, виявлення псування харчових продуктів, сільське господарство, хімічне виробництво та проблеми безпеки, пов'язані з горючістю та вибухонебезпечними подіями [4-6]. Стандартні прилади, засновані на газовій хроматографії, спектроскопії та мас-спектрометрії, можуть досягати надзвичайних рівнів точності виявлення [7]. Однак обмеження традиційного обладнання, такі як висока вартість, складні процедури та відсутність портативності, роблять його непридатним для вимог швидкого виявлення в деяких ситуаціях. Інтенсивні дослідження в останні роки були

зосереджені на напівпровідникових резистивних сенсорах з простими конструкціями, враховуючи необхідність недорогого та швидкого виявлення. Завдяки своїй винятковій стабільності, доступній вартості, високій швидкості відгуку та чутливості, металоксидно-напівпровідникові (МОП) матеріали, які використовуються в основних комерційних газових сенсорах, були ретельно досліджені як чутливі матеріали в напівпровідникових резистивних газових сенсорах [8-10].

Швидкий розвиток Інтернету речей (IoT) висунув більш жорсткі вимоги до газових сенсорів, що працюють на основі оксидів металів. Ці вимоги зазвичай включають здатність знижувати робочу температуру, підвищувати селективність та полегшувати сумісність інтеграції [11]. Протягом останнього десятиліття газовим сенсорам на польових транзисторах (FET) приділяється більше уваги для вирішення трьох основних проблем, зазначених вище. Фундаментальною характеристикою, яка відрізняє польові транзистори від резистивних сенсорів, є керування транспортуванням носіїв заряду по каналах напруги затвора. Загалом, польові транзистори можуть бути побудовані зі зменшеними розмірами, що робить їх придатними для інтеграції комплементарних металоксидно-напівпровідникових (CMOS) схем [12]. Крім того, газові сенсори на польових транзисторах на основі оксидів металів пропонують кращу продуктивність порівняно з резистивними сенсорами з точки зору покращеної чутливості, збільшеного співвідношення сигнал/шум та зменшених меж виявлення [13]. Вилучення кількох параметрів польових транзисторів, включаючи порогову напругу перехідного процесу (V_{th}), підпороговий коливання (SS), коефіцієнт перемикання (I_{on} / I_{off}), концентрацію носіїв (μ), крутизну (γ / m), вихідний струм насичення тощо, може бути корисним для ідентифікації змішаних газів. Доступні багатопараметри збільшують розмірність даних за допомогою алгоритмів для підвищення точності прогнозування типів та концентрацій газів, тим самим сприяючи створенню електронних «носів» для газових сенсорів [14]. Крім того, для газових сенсорів на польових транзисторах зазвичай використовується конфігурація верхнього контакту зворотного затвора. Оскільки газочутливі матеріали потребують частого впливу газового середовища, структура верхнього контакту є менш вибраною. Пряма взаємодія між газочутливими матеріалами та цільовими газами сприяє пришвидшеному вимірюванню.

Оксид індію (In_2O_3) – це прозорий напівпровідник на основі оксиду металу із шириною забороненої зони від 3,4 до 3,75 eV. Він перевершує інші поширені оксидні напівпровідники, такі як SnO_2 , ZnO та CuO , за

концентрацією та рухливістю носіїв заряду. Ця висока електропровідність призводить до виняткової чутливості до газів, особливо при низьких концентраціях (від ppm до ppb). Модифікація поверхні або легування In_2O_3 може підвищити його селективність для певних газів. Його стабільність за різних умов навколишнього середовища забезпечує надійну та стабільну роботу з часом. Окрім низького енергоспоживання, In_2O_3 характеризується швидким часом відгуку та відновлення. Він є дуже універсальним, придатним для інтеграції в різні конфігурації датчиків, такі як тонкі плівки, наночастинки та наноструктури. Ця універсальність підтримує гнучкі застосування для газового зондування та покращує продуктивність польових транзисторів, контролюючи струм у вимкненому стані [15]. Оптична прозорість In_2O_3 робить його ідеальним для прозорих провідних шарів, а оксиди на основі індію, такі як IGZO, є передовими матеріалами в технологіях дисплеїв. Підсумок досягнень у розробці газових сенсорів на основі оксиду індію може сприяти ширшому впровадженню газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 . У цьому огляді основний прогрес у розробці газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 за останнє десятиліття представлено з кількох аспектів. По-перше, окремо представлено розробку двох основних типів перетворювачів: MOSFET та тонкопліткових транзисторів (TFT). По-друге, переваги газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 відображаються в чутливості, межі виявлення, співвідношенні сигнал/шум, часі відгуку та відновлення, роботі за низьких температур та селективності. По-третє, оптимізація структури польових транзисторів, умов експлуатації та алгоритмів є майбутнім напрямком розвитку високопродуктивних газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 .

1.2 Типові перетворювачі для газових сенсорів на польових транзисторах In_2O_3

Резистивні газові сенсори In_2O_3 були ретельно досліджені протягом останніх кількох десятиліть, тоді як газові сенсори In_2O_3 на польових транзисторах розроблялися лише поступово протягом останнього десятиліття. Дослідження резистивних газових сенсорів In_2O_3 в основному зосереджені на наноструктурах сенсорних матеріалів або їх композитів. Різні методи приготування наноматеріалів In_2O_3 можуть призвести до варіацій у продуктивності газових сенсорів. Спираючись на досягнення в

галузі газових сенсорних матеріалів In_2O_3 , розробка високопродуктивних газових сенсорів на польових транзисторах стає все більш можливою.

У 2021 році Тонг та ін. досягли межі виявлення CO приблизно 4 ppm, використовуючи пористі наностержні In_2O_3 , виготовлені гідротермальним методом [16]. У 2022 році Сон та ін. повідомили, що нанодропи In_2O_3 , отримані термічним випаровуванням, продемонстрували високу чутливість до етанолу та селективне виявлення поширених відновлювальних газів, таких як ацетон, CO , NH_3 та H_2S , за кімнатної температури [17]. Крім того, нанокompозити In_2O_3 мають значний потенціал для покращення продуктивності газових сенсорів, особливо в поєднанні з дорогоцінними металами та оксидами металів. У 2021 році Ван та ін. досліджували вплив чотирьох металевих добавок (Au , Ag , Pt та Pd) на продуктивність мезопористого In_2O_3 у відношенні до етанолу. Всі чотири варіанти легованого In_2O_3 продемонстрували покращену реакцію на етанол порівняно з чистим In_2O_3 , причому легований Pd In_2O_3 показав найвищу реакцію за оптимальної робочої температури [18]. У тому ж році Луо та ін. покращили чутливість до газоподібного водню шляхом спільного легування нанотрубок In_2O_3 з PdO та NiO . Цей потрійний композит досяг найвищої реакції на водень та значно скоротив час реакції та відновлення [18]. Нещодавні дослідження композитів на основі In_2O_3 для газового зондування також висвітлили нові матеріали, такі як MXene, вуглецеві нанотрубки, вуглецеві нановолокна, графен та двовимірні сульфідні перехідних металів [19].

Існують деякі відмінності в механізмах роботи резистивних газових сенсорів In_2O_3 та польових транзисторів, хоча обидва покладаються на взаємодію між тонкоплівковими сенсорними шарами та цільовими газами. У резистивних газових сенсорах молекули газу реагують з оксидами металів, змінюючи опір і тим самим виявляючи концентрацію газу. Ця зміна вимірюється шляхом відстеження зміни значень опору. Навпаки, для польових газових сенсорів зміни продуктивності тонкоплівкового сенсорного шару, на який впливає газ, проявляються в переносі заряду TFT-пристроїв та екрануванні польових транзисторів та пристроїв на основі плаваючого затвора під дією електричного поля. Ці зміни вимірюються динамічними змінами струму або перехідними змінами напруги. Порівняно з широкими сценаріями застосування резистивних сенсорів, польові сенсори більше підходять для виявлення газу з високою чутливістю та високою селективністю. Крім того, вони, як правило, мають

нижче енергоспоживання та кращу стабільність. Тут ми детально розглянемо прогрес у розробці польових газових сенсорів In_2O_3 на основі двох основних перетворювачів (MOSFET та TFT).

1.3 Газочутлививі МОП-транзистори

Представлено газові сенсори на основі металоксидно-напівпровідникових польових транзисторів (MOSFET) з плаваючою структурою затвора, де шар газового чутливого шару In_2O_3 повністю відокремлений від каналного шару. У 2018 році Сонбін Хонг та ін. використали модифікований платиною In_2O_3 , підготовлений за допомогою струменевого друку, як сенсорний матеріал для кисневого MOSFET-сенсора. Сенсор з оптимальною концентрацією легування Pt значно покращив відгук нижче $140\text{ }^\circ\text{C}$ на основі фізичних механізмів адсорбції [20]. Наступного року їхня група застосувала модифіковані платиною MOSFET-транзистори In_2O_3 для виявлення CO. Сенсор продемонстрував покращені характеристики, включаючи кращу чутливість та швидший час відгуку та відновлення при оптимальній концентрації легування Pt та робочій температурі [20]. Крім того, застосування позитивної напруги керування затвором (V_{pre}) може ще більше підвищити чутливість до відновлювальних газів, таких як CO.

У 2020 році Вонджун Шін та ін. досліджували вплив умов осадження на співвідношення сигнал/шум газових сенсорів. Газові MOSFET-сенсори базувалися на тонких плівках In_2O_3 однакової товщини (30 нм), виготовлених магнетронним розпиленням при різних радіочастотних потужностях [21]. У діапазоні низьких потужностей (50–100 Вт) збільшення потужності призводить до більших зерен In_2O_3 з меншою кількістю меж зерен, що, як наслідок, знижує питомий опір плівки. Однак швидке осадження викликає значне збільшення дефектів та утворення багатьох дрібних зерен при надмірно високих потужностях (понад 100 Вт), що сприяє поганій однорідності плівки та вищому питомому опору. Тим не менш, зміни потужності радіочастотного розпилення не впливають на характеристики низькочастотного шуму (LFN) у газових MOSFET-сенсорах, оскільки канал MOSFET визначає характеристики низькочастотного шуму. Характеристики LFN газових сенсорів на основі MOSFET залежать від таких факторів, як канал, робоча область (лінійна область/підпорогова область/область насичення) та зміщення між витоком та стоком. Оптимальне співвідношення сигнал/шум резистивних газових сенсорів досягається там, де питомий опір чутливої плівки найнижчий,

незважаючи на меншу кількість дефектів, таких як місця адсорбції, та субоптимальну реакцію. І навпаки, характеристики LFN газових сенсорів на основі MOSFET залишаються незмінними під впливом дефектів чутливих тонких плівок, і тому максимальне співвідношення сигнал/шум досягається в положенні максимальної реакції, оскільки шум визначається каналом. Отже, найвище співвідношення сигнал/шум досягається на рівні потужності, де відбувається максимальна реакція газу, що пояснюється збільшенням дефектів плівки, які сприяють адсорбції газу. Крім того, їхня група досліджувала власний шум та додатковий шум газових сенсорів на основі 12 нм тонких плівок In_2O_3 у тому ж році. Власний шум походить з каналу транзистора, тоді як додатковий шум відноситься до шуму, що генерується внаслідок газових реакцій. Плівки, чутливі до In_2O_3 , виготовлені в різних кисневих атмосферах, можуть призвести до різниці в характеристиках чутливості до газу. Для підтвердження додаткового шуму було використано два типи плівок, чутливих до In_2O_3 , виготовлених в змішаних атмосферах Ar та Ar/O₂. MOSFET з тонкою плівкою, виготовленою в змішаній атмосфері Ar/O₂, продемонстрував сильнішу реакцію на H₂S без збільшення додаткового шуму порівняно з MOSFET з плівкою, виготовленою в чистому Ar. Отже, газові реакції не вносять додаткового шуму до MOSFET, що є значною перевагою над резистивними датчиками [22]. Наступного року їхня група продовжила дослідження впливу напруги зміщення переходу тіло-витік на MOSFET-сенсори NO₂, використовуючи тонку плівку In_2O_3 товщиною 12 нм як чутливий матеріал. Було виявлено, що на характеристики низькочастотного шуму впливає полярність зміщення переходу тіло-витік (V_{BS}). Застосування прямої напруги V_{BS} 0,5 В може зменшити потужність шуму $1/f$ приблизно в десять разів у підпороговій області, що призводить до подвоєння співвідношення сигнал/шум (SNR) [22].

У 2021 році Юнг та ін. виготовили MOSFET -сенсори NO₂, використовуючи тонку плівку In_2O_3 товщиною 10 нм як чутливий матеріал. Ця робота висвітлила два аспекти покращення продуктивності сенсора. По-перше, MOSFET на In_2O_3 продемонстрував різну продуктивність у різних діапазонах робочого струму та продемонстрував найвищу чутливість у підпороговій області. По-друге, підвищена чутливість до NO₂ була досягнута шляхом подачі негативної напруги попереднього зміщення V_{pre} до керуючого затвора [23].

У 2023 році Вонджун Шін та ін. досліджували проблему зсуву порогової напруги через напруження у вимкненому стані в MOSFET-транзисторах з тонкими плівками In_2O_3 товщиною 15 нм. Виникає напруження у вимкненому стані, і таким чином шар оксиду затвора пошкоджується гарячими дірками, як показано на рисунку 1.1a. Коли MOSFET In_2O_3 не працює, а напруга керування затвором нижча за порогову напругу, відбувається погіршення електричних характеристик, включаючи негативне зсув порогової напруги та збільшення шуму $1/f$, як показано на рисунку 1.1b,c. Така нестабільність призводить до змін у характеристиках газового зондування, включаючи чутливість та час відновлення, що підриває стабільність та надійність газових сенсорів MOSFET In_2O_3 . Вони запропонували метод самовідновлення, заснований на прямому зміщенні PN-переходу тіло-стік, для зменшення пошкоджень, пов'язаних з напруженням у вимкненому стані. Проблеми, що виникають через зсув порогової напруги, збільшення шуму та зниження реакції на NO_2 , були викликані пошкодженнями, пов'язаними з напруженням у вимкненому стані. Усіх їх можна виправити за допомогою цього підходу, як показано на рисунку 1.1 d-i.

У тому ж році Гювеон Юнг та ін. провели дослідження керованої маніпуляції адсорбованим киснем та вакансійним киснем на поверхні 18-нм транзистора на основі тонкої плівки In_2O_3 , і було продемонстровано застосування цієї маніпуляції для газової селективності. Ключ до цього методу полягає в нагрівачі та електричному полі затвора, де типи та кількості адсорбованого кисню та вакансійного кисню на поверхні In_2O_3 контролюються полярністю та величиною електричного поля (V_{GS}). На поверхні тонкої плівки In_2O_3 існує безліч електронів, коли V_{GS} позитивний, що призводить до рясної адсорбції кисню, і таким чином тонка плівка In_2O_3 переважно відчуває кисень через адсорбований кисень. І навпаки, електрони течуть від поверхні до затвора, коли V_{GS} негативний, викликаючи десорбцію кисню, і тонка плівка In_2O_3 переважно відчуває кисень через вакансійний кисень, як показано на рисунку 1.2a.

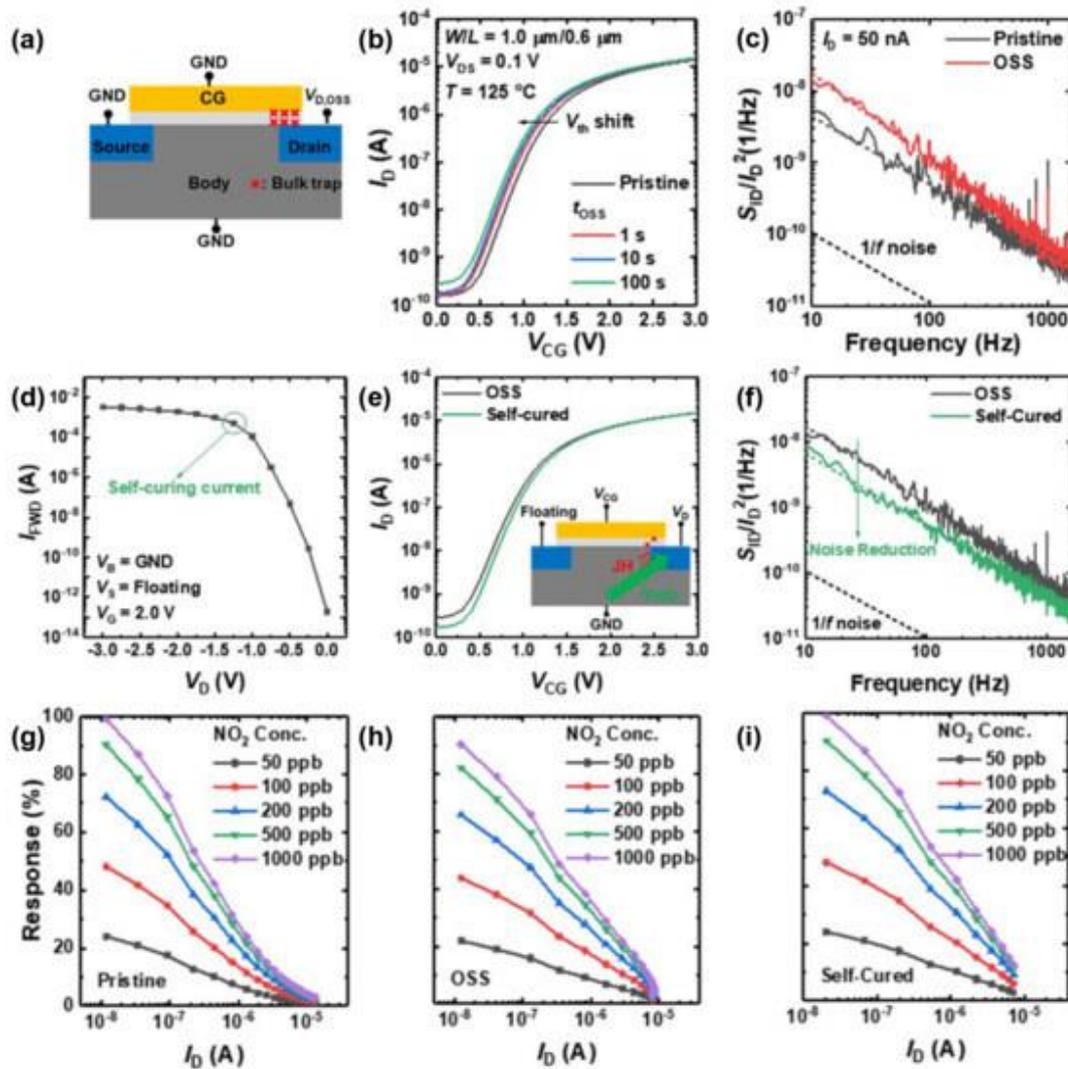


Рисунок 1.1 – Відновлення за допомогою методу самозатвердіння. (а)
 Діаграма деградації оксиду затвора внаслідок OSS. (b) $I_D - V_{CG}$ відносно
 т OSS. (c) S_{ID}/I_D^2 до та після OSS. (d) $V_D - I_{FWD}$. (e) $I_D -$
 V_{CG} OSS та після методу самозатвердіння. (f) S_{ID}/I_D^2 OSS та після
 самозатвердіння. Характеристики відгуку (g) чистих, (h) пошкоджених
 OSS та (i) самозатверділих сенсорів

Отже, цей метод вибірково посилює реакції з окислювальними газами (наприклад, NO та NO₂) за рахунок адсорбованого кисню та відновлювальними газами (наприклад, H₂S, NH₃ та CO) за рахунок вакансійного кисню, як показано на рисунку 1.2b. Крім того, Гюевон Юнг та ін. досліджували вплив вмісту гідроксильних груп у чутливому матеріалі, тонкій плівці In₂O₃, на характеристики сприйняття NO₂ MOSFET. Тонка плівка In₂O₃ товщиною 30 нм була виготовлена за допомогою радіочастотного магнетронного розпилення, при цьому гідроксильні групи були збагачені шляхом введення кисню під час процесу

розпилення ($\text{Ar}:\text{O}_2 = 30:1$). Тонка плівка In_2O_3 , збагачена гідроксилом (A1), продемонструвала вищу роботу виходу 4,92 eV та більшу довжину Дебая порівняно з чистою тонкою плівкою In_2O_3 (A0), а також продемонструвала чудову продуктивність сприйняття NO_2 , незалежно від того, чи використовувалися MOSFET, чи резистивні датчики як перетворювачі. Зокрема, MOSFET на основі In_2O_3 зі збагаченими гідроксильними групами навіть досяг вищої реакції та нижчої концентрації виявлення для NO_2 за нижчої температури (100 °C), як показано на рисунку 1.2h.

Продуктивність газових сенсорів на основі MOSFET-транзисторів In_2O_3 також покращується завдяки оптимізації структури пристрою. У 2023 році Сонбін Хонг та ін. підготували 12-нм MOSFET -транзистори на основі тонкої плівки In_2O_3 з різними співвідношеннями сторін каналу та площами каналу для оптимізації характеристик сприйняття NO_2 та H_2S . Макроскопічні структурні параметри сенсорів суттєво впливали на електричні характеристики транзисторів, що ще більше впливало на характеристики сприйняття газу. По-перше, більше співвідношення сторін призводило до більшого вихідного струму насичення, більшої крутизни, як показано на рисунку 1.3 a, b, та збільшення реакції на H_2S та NO_2 . По-друге, менша площа каналу призводила до збільшення реакції на H_2S та NO_2 при збереженні постійного співвідношення сторін, як показано на рисунку 1.3 c, d. Цзіньву Парк та ін. замінили загальноприйнятий металевий затвор у газових сенсорах MOSFET, побудованих з плівки In_2O_3 товщиною 15 нм, на полікристалічний кремнієвий затвор. Вдосконалені затвори були спроектовані як два кінці, V CG1 та V CG2. MOSFET на основі In_2O_3 продемонстрував кращі електричні характеристики з точки зору більшого вихідного струму та крутизни, коли V CG2 відкритий, порівняно з випадком, коли V CG2 заземлений, як показано на рисунку 1.3 e,f. Безумовно, пристрій продемонстрував кращу реакцію на H_2S , коли V CG2 відкритий, як показано на рисунку 1.3 g.

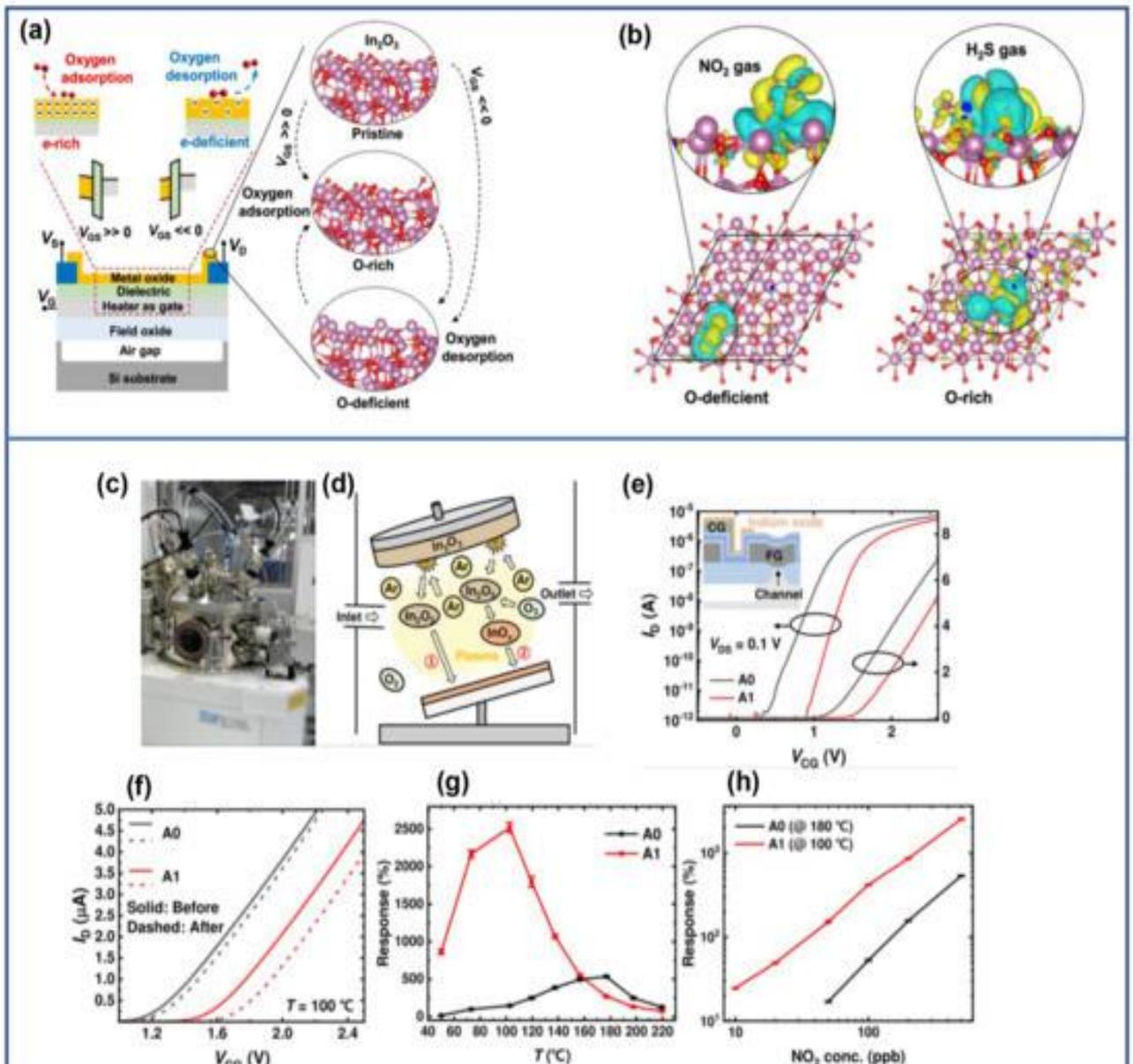


Рисунок 1.2 – (верхній графік) Реконфігурований контроль вмісту кисню. (а) Схематичні діаграми, що ілюструють зонну структуру та концентрацію електронів. (б) Модель адсорбції NO_2 та H_2S Газовий сенсор In_2O_3 з багатою на гідроксильні групи поверхнею. (с) Фотографія магнетронного радіочастотного розпилення. (д) Схематичне зображення процесу розпилення. (е) Криві переносу двох газових сенсорів типу FET. (ф) Характеристики переносу, що відповідають реакції на NO_2 . (г) Реакція на 500 ppb NO_2 залежно від робочої температури. (х) Реакція залежно від концентрації NO_2

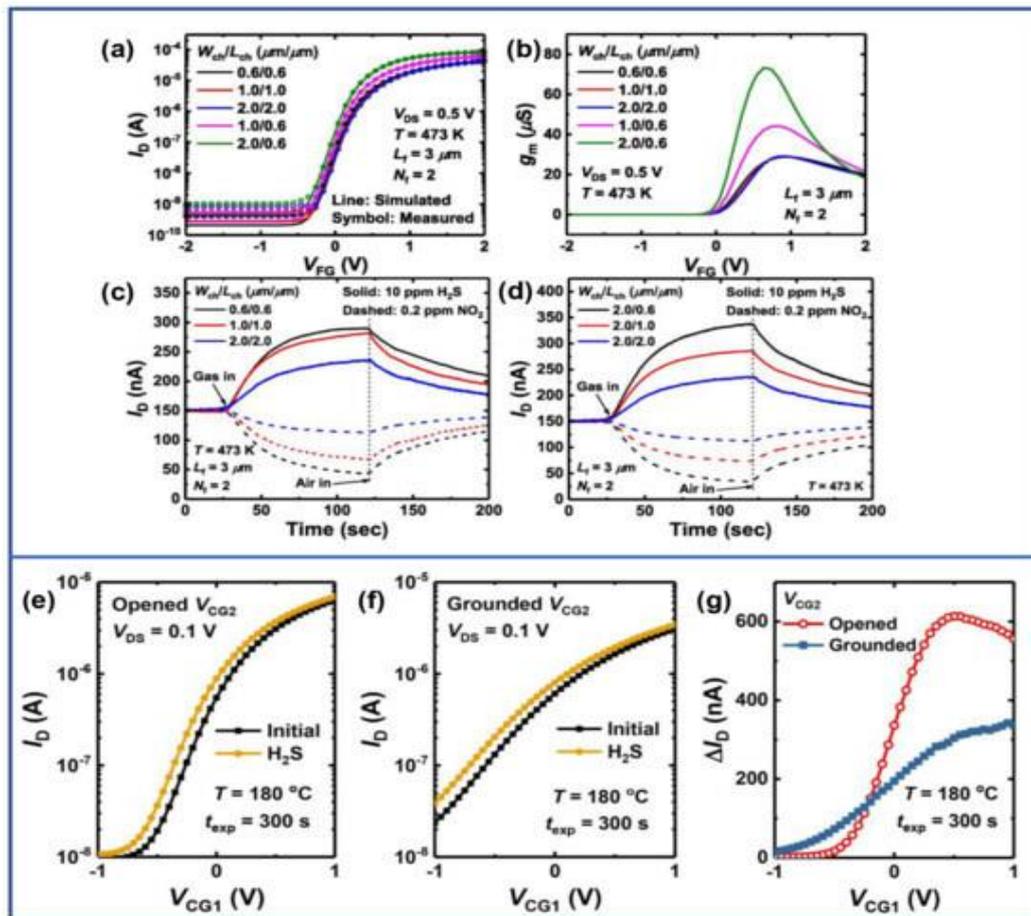


Рисунок 1.3 – (верхній графік) Газовий датчик на основі кремнієвого польового транзистора. (а) Криві $I_D - V_G$ та (б) криві $g_m - V_G$. (с) Перехідні реакції на NO_2 та H_2S при фіксованому співвідношенні W_{ch}/L_{ch} . (д) Перехідні реакції на NO_2 та H_2S при змінному співвідношенні W_{ch}/L_{ch} . Відтворено з дозволу [54]. Авторське право 2023, Elsevier. (нижній графік) Газовий датчик H_2S на основі полікремнієвого газового датчика типу польового транзистора з керуючим затвором. Криві $I_D - V_{CG1}$ з (е) відкритим та (ф) заземленим V_{CG2} відповідно. (г) ΔI_D відносно V_{CG1}

1.4 Газочутливі ТФТ-дисплеї

На відміну від згаданого вище MOSFET з плаваючою структурою затвора, тонкі плівки In_2O_3 відіграють подвійну роль як чутливого шару для газової реакції, так і каналного шару для транспорту носіїв заряду для газових сенсорів тонкоплівкового транзисторного (ТФТ) типу, які зазвичай використовують структуру зворотного затвора. У 2012 році М. Сіта та Д. Мангаларадж створили етанольні ТФТ-сенсори на основі пористих плівок оксиду індію, використовуючи розчин хлориду індію як прекурсор, а потім провели процес відпалу. Хоча пориста структура плівки призвела до

неоптимальних електричних характеристик TFT, TFT на основі цієї пористої плівки In_2O_3 досяг селективного виявлення етанолу при кімнатній температурі [24]. Вплив різного часу відпалу при $400\text{ }^\circ\text{C}$ на електричні характеристики TFT на основі нанесених спін-покриттям маслорозчинних наночастинок In_2O_3 був описаний Вангом та ін. у 2015 році. TFT In_2O_3 , відпалений протягом 10 хвилин, демонстрував найвищий вихідний струм на повітрі [24]. У 2017 році Шаріаті Мохсен продемонструвала, що на морфологію нанодротів In_2O_3 , легованих Sn, впливає температура відпалу, що, у свою чергу, впливає на електричні характеристики TFT, а також на процес відновлення після впливу H_2S . Для досягнення швидкої реакції та відновлення протягом кількох секунд для 20 ppb H_2S було використано метод лазерного збудження [25]. У 2020 році Джун та ін. виготовили етанольні сенсори на основі польових транзисторів з нановолокон InYbO_4 . Аналогічно, було проведено рентгенівську фотоелектронну спектроскопію (РФЕС) спектру O_{2s} для підтвердження місць вакансій кисню для газових реакцій та електричних характеристик, включаючи коефіцієнт перемикання, концентрацію носіїв, підпорогові коливання та порогову напругу, які були досліджені на основі TFT з нановолокон In_2O_4 з різною концентрацією легування Yb. TFT InYbO_4 з оптимальним коефіцієнтом легування Yb досяг виявлення 1 ppm етанолу при низьких температурах [26]. У тому ж році Чен та ін. виготовили газові TFT-сенсори на основі нановолокон In_2O_3 (InYbO_3), легованих Yb, шляхом повторного електроформування. Легування Yb збільшило питому площу поверхні нановолокон, що призвело до появи більшої кількості центрів адсорбції. Таким чином, TFT на основі InYbO_3 продемонстрував значну реакцію на DMF до 89 ppb [26]. Згодом, у 2022 році, Лі та ін. досліджували вплив легування Nd на питому площу поверхні та вакансії кисню In_2O_3 . нановолокна. Помірне легування Nd значно збільшило питому площу поверхні, що є корисним для газового зондування. Однак легування Nd зменшило кількість кисневих вакансій. Оптимальне співвідношення легування Nd було визначено з урахуванням цих двох факторів, згаданих вище. TFT на основі 3% InNdO продемонстрував надзвичайну продуктивність зондування для ацетону, включаючи велику чутливість, час відгуку та відновлення протягом десятків секунд, а також чудову селективність в органічних газах [27]. Після цієї роботи Син Гі Со та ін. повідомили про TFT-сенсори з гетеропереходом $\text{h-In}_2\text{O}_3/\text{SWNT}$ щодо NO_2 на Si або гнучкій підкладці, що може покращити погане відновлення SWNT за кімнатної температури. Двовимірний електронний газ, індукований гетеропереходом, та

ефективний механізм компенсації електронів сприяють відновлюваності [28]. У 2023 році Гюхо Йом та ін. запропонували метод зниження робочої температури як процесів відгуку, так і відновлення. Для покращення відгуку TFT-транзисторів In_2O_3 на NO_2 використовується підхід застосування «напруги стирання» до керуючого затвора перед початком процесу реакції. Вдосконалений метод ERS включає зміщення для перенесення збережених електронів на електроді динамічного затвора на тонку плівку, що дозволяє численним електронам швидко реагувати з NO_2 . Однак цей метод призводить до зниження як швидкості, так і ступеня відновлення. Крім того, для вирішення цієї проблеми було запроваджено метод імпульсного відновлення зміщення (PBR). Зокрема, до керуючого затвора було застосовано негативне зміщення, що змушує електрони повертатися до плаваючого затвора, тим самим сприяючи швидкій десорбції NO_2 .

Ці датчики, що базуються на польових транзисторах (FET), зазвичай мають традиційну структуру, що складається в основному з витоку, стоку та затвора, а провідність FET-каналу контролюється напругою на затворі. Навпаки, до традиційної структури для FET-пристроїв на основі плаваючого затвора додається додатковий ізольований плаваючий затвор, що дозволяє зарядам накопичуватися або вивільнятися на плаваючому затворі, що безпосередньо впливає на провідність струму. Таким чином, перенесення носіїв заряду в каналі регулюється як керуючою напругою V_{CG} , так і плаваючою напругою V_{FG} . Відповідно, газові FET-датчики з плаваючим затвором більше підходять для високочутливого виявлення газу. З іншого боку, TFT-транзистори, як найпоширеніший представник, що використовується в галузі газових датчиків, мають простішу структуру, тоді як FET-датчики з плаваючим затвором зазвичай використовують MOSFET-транзистори, які передбачають складніші виробничі процеси. MOSFET-транзистори зазвичай менші за TFT, що робить їх більш придатними для інтеграції. Однак TFT демонструють більші відгуки та вище співвідношення сигнал/шум, що призводить до нижчих меж виявлення для газових датчиків. Отже, конкретний вибір між MOSFET та TFT визначається з урахуванням вимог фактичного застосування.

1.5 Властивості газових сенсорів на основі польових транзисторів In₂O₃

Резистивні газові сенсорні на основі ZnO були ретельно досліджені, і оцінка характеристик газового зондування зазвичай включає такі показники, як чутливість, шум, час відгуку та відновлення, робочий діапазон температур, селективність, відтворюваність, лінійність та споживання енергії тощо [29-31]. Газові сенсорні на основі польових транзисторів на основі ZnO мають переваги в наступних п'яти аспектах завдяки високій концентрації та рухливості носіїв заряду, а дослідження протягом останнього десятиліття підтвердили їх широке застосування.

(1) Чутливість, межа виявлення: більша чутливість газового сенсора корелює з вищою чутливістю та нижчою межею виявлення. Як правило, більша чутливість означає, що є легше виявляти сигнали, які таким чином вважаються важливим показником для газових сенсорів.

(2) Співвідношення сигнал/шум: визначається як відношення інтенсивності прийнятого корисного сигналу до фонового шуму. Підвищена чутливість, яка зазвичай виникає через велику кількість сайтів адсорбції, часто спостерігається в дослідженнях; однак ці сайти також можуть свідчити про більшу наявність дефектів у каналі польового транзистора, що потенційно призводить до збільшення шуму та погіршення електричних характеристик. Тому чутливість не може повністю оцінити продуктивність газового сенсора, і для проектування газових сенсорів з оптимальною продуктивністю слід додатково враховувати співвідношення сигнал/шум.

(3) Швидкий час відгуку відновлення: час відгуку/відновлення здебільшого визначається енергією адсорбції газу, і вони зазвичай протилежні. Швидка реакція зазвичай являє собою повільну реакцію, і навпаки. Оптимального часу відгуку або відновлення можна досягти шляхом модифікації чутливих матеріалів, коригування структури пристрою та зовнішнього збудження пристрою.

(4) Можливість виявлення за низьких температур: металоксидні напівпровідники зазвичай працюють за високих температур, і зниження робочої температури є одним із важливих напрямків масштабних досліджень.

(5) Селективність: це залишається одним із найскладніших питань для газових сенсорів на основі металоксидних напівпровідників. Для вирішення цієї проблеми достатня увага приділяється легуванню, модифікації та іншим методам матеріалознавства чутливих матеріалів у

резистивних газових сенсорах. В галузі газових сенсорів на польових транзисторах можна спробувати більше підходів, таких як покращена структура пристрою, оптимізовані умови роботи та навіть алгоритми.

1.6 Чутливість та межа виявлення

Стандартним визначенням відгуку для газових сенсорів на польових транзисторах є співвідношення струму стоку до та після впливу тестового газу. Відповідно, зміни рухливості, крутизни, коефіцієнта перемикання, підпорогового коливання, порогової напруги тощо також можна позначити як чутливість. Чутливість стосується зміни значення відгуку, спричиненої зміною одиничної концентрації тестового газу. Межа виявлення поділяється на експериментальні та теоретичні значення, а теоретичне значення розраховується відповідно до чутливості та співвідношення сигнал/шум.

У 2020 році Джун та ін. підготували газові сенсори на основі етанолу на основі нановолокна In_2O_3 (InYbO), легованого Yb, методом електроформування, причому канал складався з мережі одновимірних нановолокон [32]. Оптимальний коефіцієнт легування 4% Yb покращив електричні властивості, включаючи стабільність позитивного напруження зміщення (PBS), високу рухливість $6,67 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, порогову напругу 3,27 В та відповідний коефіцієнт перемикання 107. Підвищена стабільність PBS зробила динамічне вимірювання характеристик газового зондування більш надійним. Посилення чутливості до етанолу легованого Yb польового транзистора In_2O_3 було вражаючим порівняно з резистивним сенсором на основі того ж чутливого матеріалу, як показано на рисунку 4. Межа виявлення резистивних сенсорів досягала лише 10 ppm, тоді як TFT могла досягати 1 ppm. Було продемонстровано значне покращення чутливості, особливо для здатності виявлення при низькій концентрації.

Наступного року Юнг та ін. використали радіочастотне магнетронне розпилення 150 Вт, співвідношення $\text{Ar}:\text{O}_2$ 10:1) для приготування плівки In_2O_3 товщиною 10 нм як чутливого до NO_2 матеріалу. Як перетворювачі використовуються резистивні та MOSFET-сенсори, і досліджуються відмінності їхньої реакції залежно від різних робочих умов.

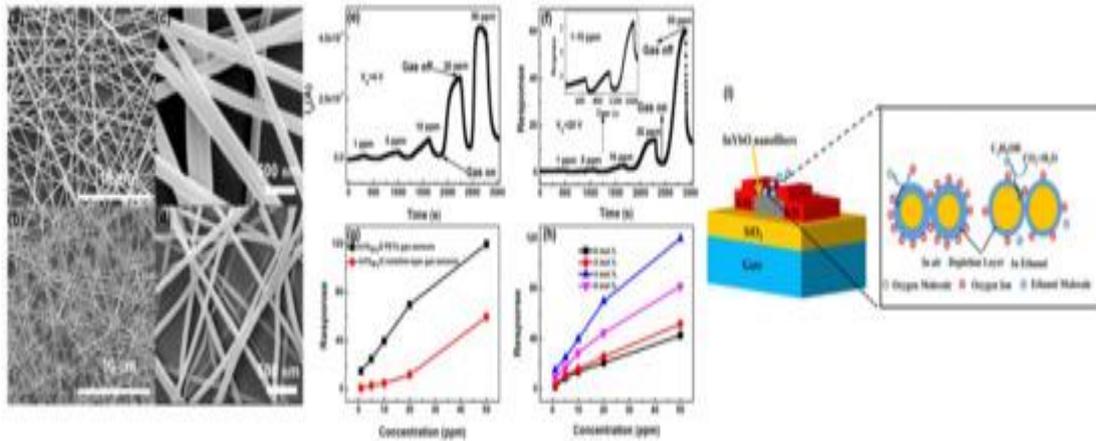


Рисунок 1.4 – Польовий транзистор та резистивний газовий сенсор на основі легovanого Yb In₂O₃. SEM-зображення (a, c) нановолокон, отриманих методом електроформування, та (b, d) відпалених 4% легovanого Yb In₂O₃. Динамічна реакція (e) польового транзистора та (f) резистивних сенсорів. (g) Порівняння реакції між польовим транзистором та резистивними сенсорами. (h) Залежність реакції від концентрації легування Yb. (i) Принципова схема механізму чутливості

Реакція резистивного газового сенсора була нечутливою до діапазону змінного робочого струму та залишалася постійною, тоді як польовий транзистор In₂O₃ демонстрував максимальну реакцію в підпороговій області. Значення струмової реакції польового транзистора In₂O₃ могло досягати $3,8 \times 10^4$, що у 8,15 рази більше, ніж у відповідного резистивного сенсора. Крім того, реакцію на NO₂ польового транзистора In₂O₃ можна додатково збільшити, подавши негативну напругу попереднього зміщення V_{pre} на затвор перед вимірюванням [31].

У 2022 році Син Гі Со та ін. повідомили про гетероструктури оксиду індію та одностінних вуглецевих нанотрубок (h-In₂O₃/SWNT), синтезовані за допомогою гідротермального підходу в одному стаціонарному режимі, та продемонстрували виготовлення газоподібних сенсорів NO₂ на основі тонкоплівкових транзисторів (TFT) h-In₂O₃/SWNT шляхом лиття краплею на кремнієві та гнучкі підкладки. Посилення значень відгуку h-In₂O₃/SWNT TFT було помітним порівняно з TFT на основі SWNT, як показано на рисунку 1.5. h-In₂O₃/SWNT TFT досяг межі виявлення 1 ppm NO₂ та демонстрував незначну деградацію під час впливу дев'яти послідовних циклів протягом 2 днів. Крім того, електрична надійність та відтворюваність h-In₂O₃/SWNT TFT на гнучких підкладках були ретельно перевірені навіть при повторних деформаціях розтягу 0,88% [32].

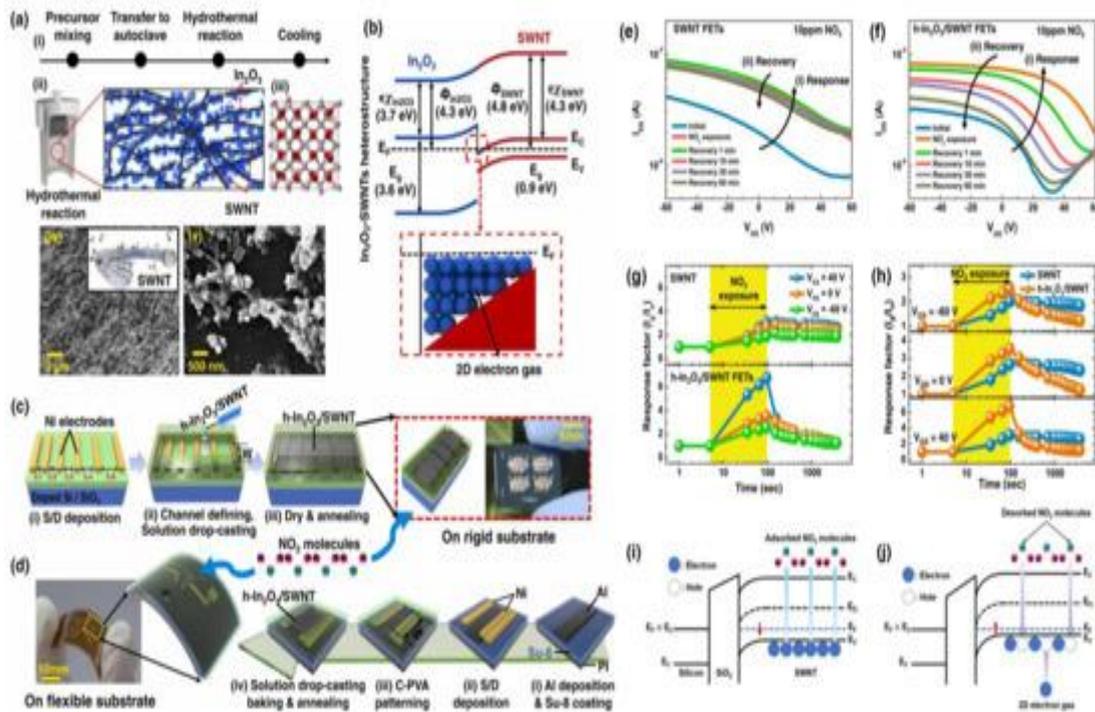


Рисунок 1.5 – Газочутливі властивості TFT h-In₂O₃ /SWNT. (а) Процес приготування h-In₂O₃ /SWNT та відповідні SEM-зображення. (i) Процес приготування h-In₂O₃ /SWNT. (ii) Принципова схема підготовленого h-In₂O₃ /SWNT. (iii) Кубічна кристалічна структура h-In₂O₃ /SWNT. SEM-зображення (iv) чистих SWNT та (v) h-In₂O₃ /SWNT. (б) Зонна структура. Виготовлення газових сенсорів на жорсткій (с) та гнучкій (d) підкладках. Передавальні характеристики (е) SWNT польових транзисторів та (f) h-In₂O₃ /SWNT польових транзисторів з відгуком на NO₂. (г) Значення відгуку, отримані при динамічних вимірюваннях. (h) Порівняння значень відгуку з різними V_{GS}. Діаграми зонних структур відгуку NO₂ (і) та (j) відновлення

1.7 Співвідношення сигнал/шум в газочутливих сенсорах

Співвідношення сигнал/шум (SNR) стосується співвідношення інтенсивності прийнятого корисного сигналу до інтенсивності заважаючого шуму. У контексті газових сенсорів на польових транзисторах обговорення SNR зазвичай зосереджується на характеристиках низькочастотного шуму, які можуть впливати на точність і стабільність датчика. Тому продуктивність газових сенсорів на польових транзисторах можна покращити, розуміючи та контролюючи характеристики низькочастотного шуму.

У 2020 році Вонджун Шін та ін. досліджували вплив потужності радіочастотного розпилення на швидкість осадження та питомий опір сформованих тонких плівок In_2O_3 . Резистивний датчик та MOSFET використовуються як перетворювачі для виявлення H_2S з метою дослідження впливу на співвідношення сигнал/шум (SNR). Найвище SNR, що спостерігалось в резистивному датчику на основі тонкої плівки In_2O_3 , спостерігалось при потужності розпилення, яка забезпечувала найнижчий питомий опір, незважаючи на те, що відгук пристрою не був максимальним за цих умов. Однак швидкість осадження та питомий опір, на які впливала потужність розпилення, не впливали на низькочастотні шумові характеристики MOSFET In_2O_3 , які визначаються каналом MOSFET. Відповідно, SNR MOSFET, отриманого за допомогою радіочастотного розпилення.

Тонкі плівки In_2O_3 перевершили пристрої резистивного типу, як показано на рисунку 1.6. У тому ж році їхня група підготувала тонкі плівки In_2O_3 товщиною 12 нм за допомогою радіочастотного магнетронного розпилення (5 мТорр, співвідношення $\text{Ar}:\text{O}$ 2 10:1) як матеріал, чутливий до H_2S . Як резистивний датчик, так і MOSFET були використані для подальшого вивчення характеристик низькочастотного шуму, головним чином зосереджуючись на диференціації між власним шумом і додатковим шумом, спричиненим газовими реакціями. Подібно до попередньої роботи, шумові характеристики резистивних газових датчиків визначалися переважно полікристалічним сенсорним шаром і умовами осадження сенсорного матеріалу, тоді як власний шум MOSFET In_2O_3 залежав від каналу і, таким чином, не залежав від сенсорного матеріалу. Інтенсивність низькочастотного шуму в підпороговій області MOSFET на основі тонких плівок In_2O_3 , нанесених радіочастотним розпиленням, приблизно в десять разів нижча, ніж у резистивного датчика. Крім того, додатковий шум, що генерується газовими реакціями, вимірювався за допомогою тонких плівок In_2O_3 , виготовлених з різними співвідношеннями Ar до O_2 . Тонкі плівки, сформовані в атмосферах з вищими співвідношеннями O_2 , демонстрували сильнішу реакційну здатність до H_2S . Значення співвідношення шуму газ-повітря (GANR) для резистивних сенсорів, що реагують з H_2S , виготовленим у змішаних атмосферах Ar та Ar/O_2 , становили 1,9–2,3 та 3,8–4,1 відповідно, що вказує на значне збільшення додаткового шуму внаслідок газових реакцій. Натомість відповідні значення GANR для MOSFET становили приблизно 1, що свідчить про майже повну відсутність збільшення додаткового шуму. Таким чином, MOSFET на основі тонких плівок In_2O_3 , нанесених методом ВЧ-розпилення,

продемонстрував нижчий власний шум і навіть відсутність додаткового шуму, ніж відповідні резистивні газові сенсори, як показано на рисунку 1.7.

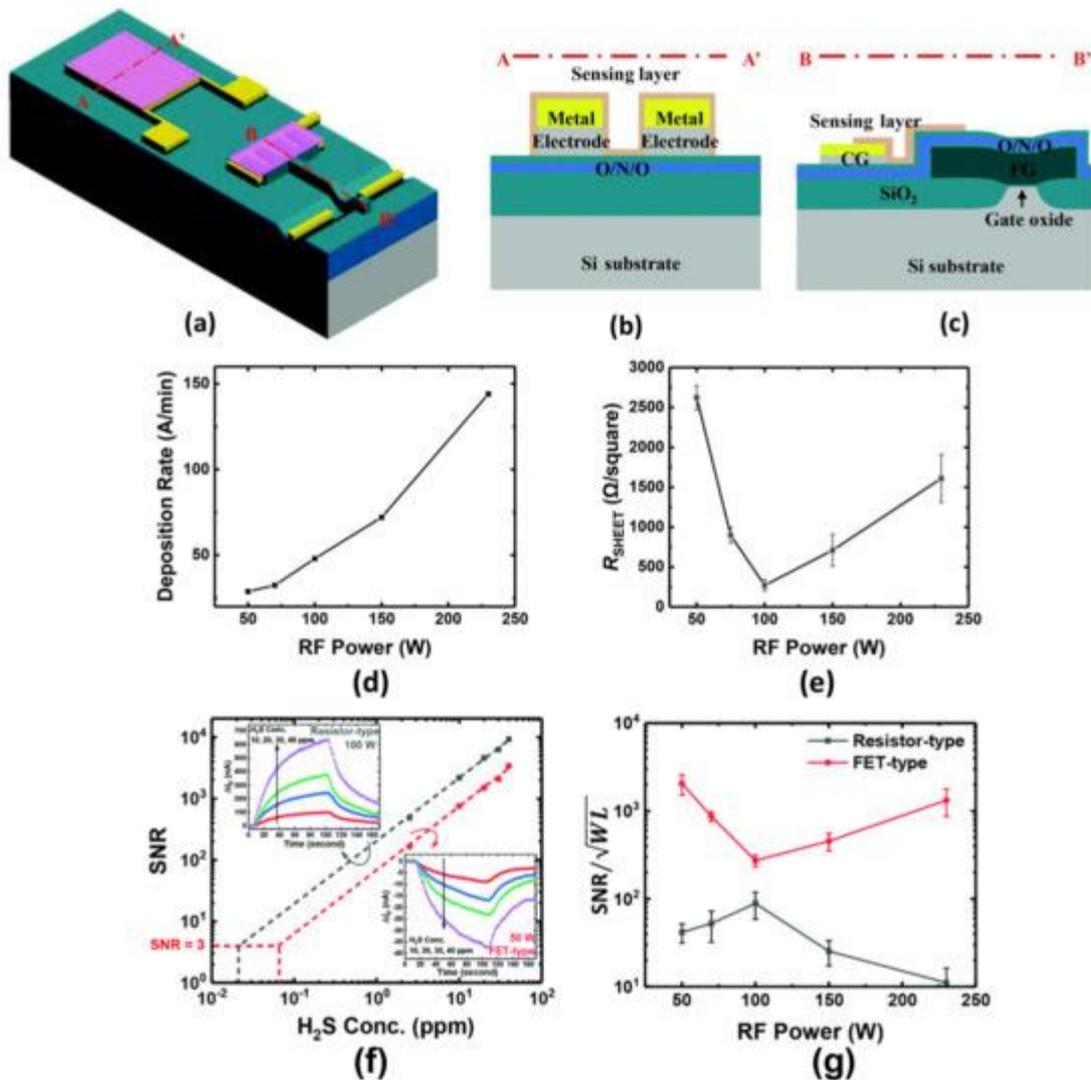


Рисунок 1.6 – Вплив швидкості осадження на співвідношення сигнал/шум.

(a – c) Принципова схема резистивних та польових транзисторних сенсорів. (d) Швидкість осадження в залежності від потужності радіочастотного розпилення. (e) Питомий опір в залежності від потужності радіочастотного розпилення. (f) Співвідношення сигнал/шум в залежності від концентрації H₂S. (g) Співвідношення сигнал/шум на одиницю площі каналу в залежності від потужності радіочастотного розпилення

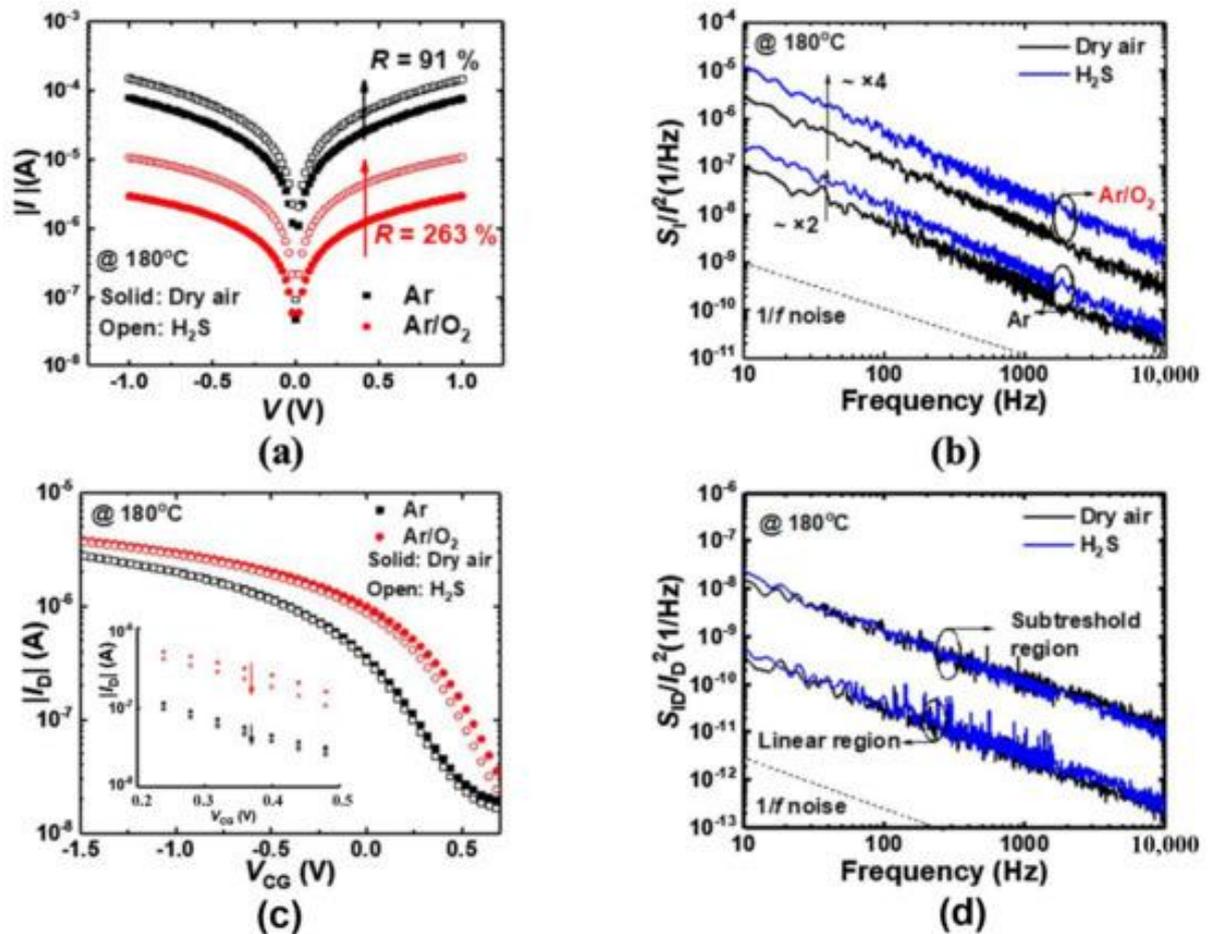


Рисунок 1.7 – Характеристики низькочастотного шуму для газових сенсорів на основі In₂O₃. (а) Передавальні характеристики резистивних сенсорів у відповідь на 50 ppm H₂S. (б) Нормалізовані спектри низькочастотного шуму резистивних сенсорів у відповідь на 50 ppm H₂S. (с) Передавальні характеристики польових транзисторів у відповідь на 50 ppm H₂S. (д) Нормалізовані спектри низькочастотного шуму польових транзисторів у відповідь на 50 ppm H₂S

Наступного року їхня група виготовила тонкі плівки In₂O₃ товщиною 12 нм методом радіочастотного магнетронного розпилення (50 Вт, 5 мТорр) знову як матеріали, чутливі до NO₂, з MOSFET як перетворювачем, вивчаючи вплив напруги зміщення переходу об'єм - витік на співвідношення сигнал/шум (SNR). Флуктуації числа носіїв домінували в шумі 1/f польового транзистора у всіх робочих областях, а шум 1/f зменшився приблизно в 10 разів, коли було застосовано відповідне $V_{BS} = 0,5$ В [34]. Тим часом SNR подвоїлося, що означає, що межа виявлення NO₂ зменшилася вдвічі, з 0,55 ppb до 0,27 ppb, як показано на рисунку 1.8. Дослідження, проведене групою для покращення співвідношення сигнал/шум, еволюціонувало від осадження матеріалу до порівняння

перетворювачів, що зрештою завершилося оптимізацією робочих умов перетворювача.

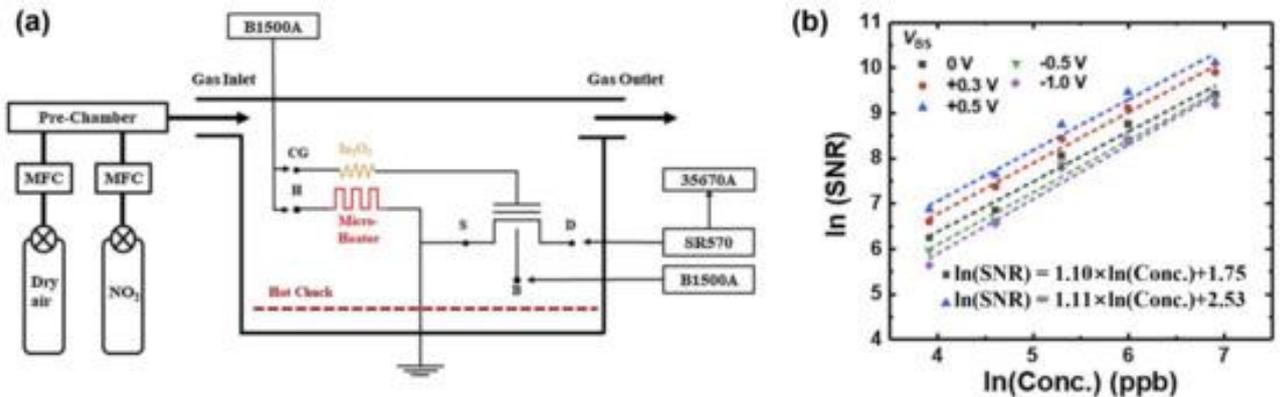


Рисунок 1.8 – (а) Схема системи газового зондування та вимірювання низькочастотного шуму. (б) Співвідношення сигнал/шум у залежності від концентрації NO₂ у логарифмічному масштабі

1.8 Реагування та відновлення газочутливих сенсорів

Час відгуку та відновлення є важливими показниками для газових сенсорів, і існує високий попит на швидку реакцію та відновлення в різних сценаріях, таких як запобігання токсичним, небезпечним та вибуховим речовинам. У 2019 році Сонбін Хонг та ін. застосували Pt-модифікований In₂O₃ до MOSFET, використовуючи технологію струменевого друку. Було визначено оптимальну концентрацію легування Pt 5% та найкращу температуру чутливості 200 °C для виявлення CO. Час відгуку, час відновлення та чутливість Pt-In₂O були значно покращені. Крім того, час відгуку можна ще більше зменшити, застосувавши V_{pre} до керуючого затвора, хоча й за рахунок певного ступеня чутливості. Час відновлення можна скоротити приблизно до 10 с, коли V_{pre} було зафіксовано на рівні -2 В, як показано на рисунку 1.9 [35].

У 2022 році Лі та ін. виготовили датчик газу ацетону на основі польового транзистора In₂O₃ (InNdO), легованого Nd, а канал складався з одновимірних нановолокон InNdO з сітчастою структурою, отриманою за допомогою електроформування. Оптимальний коефіцієнт легування Nd був визначений на рівні 3%, враховуючи питому площу поверхні синтетичних нановолокон, перемикальний коефіцієнт та концентрації носіїв заряду в транзисторі з покриттям InNdO. Датчик продемонстрував видатні електричні характеристики, що характеризуються високою рухливістю 5,5 см² В⁻¹ с⁻¹ та коефіцієнтом струму ввімкнення/вимкнення 107. Крім того, транзистор з покриттям InNdO з 3% продемонстрував

високу реакцію від 88 до 4 ppm ацетону при кімнатній температурі, з часом реакції 31 с та часом відновлення 53 с, як показано на рисунку 1.10 [36].

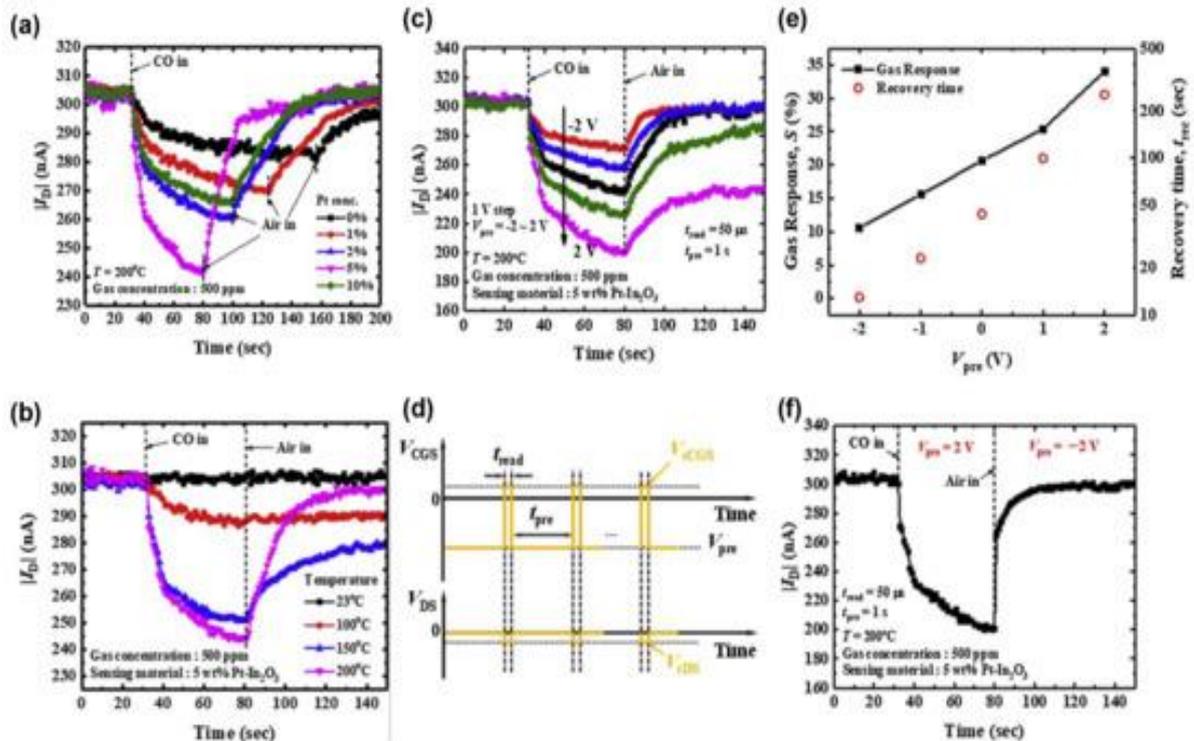


Рисунок 1.9 – Газовий датчик Si MOSFET на основі Pt–In₂O₃ зі скороченим часом відновлення. (а) Залежність перехідної реакції CO виготовленого MOSFET-транзистора від концентрації Pt. (б) Залежність перехідної реакції CO датчика з вмістом 5 мас.% Pt–In₂O₃ від температури. (с) Залежність перехідної реакції CO датчика з вмістом 5 мас.% Pt–In₂O₃ від V_{pre} . (д) Схема імпульсного вимірювання перед зміщенням. (е) Значення реакції та час відновлення від V_{pre} . (ф) Покращений процес реакції та відновлення завдяки V_{pre}

У 2023 році Гюхо Йом та ін. підготували 12 нм тонкі плівки In₂O₃ методом магнетронного розпилення ВЧ (5 мТорр, 50 Вт, співвідношення Ag:O₂ 15:1) для виявлення NO₂. Для виявлення NO₂ зі швидкою реакцією та відновленням при 75 °С було використано TFT з плаваючим затвором як перетворювач. Швидка реакція була пояснена методом стирання зміщення (V_{ers}), який переносив електрони, що зберігалися на плаваючому затворі, на чутливу плівку, дозволяючи достатній кількості електронів швидко реагувати з NO₂ та одночасно підвищуючи чутливість датчика. Крім того, швидке відновлення було сприяно методом імпульсного зміщення. Електрони переносилися назад до затвора при застосуванні негативного зміщення до керуючого затвора, що

призводило до швидкої десорбції NO₂–, і NO₂ міг швидко десорбуватися навіть при низькій температурі 75 °С, як показано на рисунку 1.11.

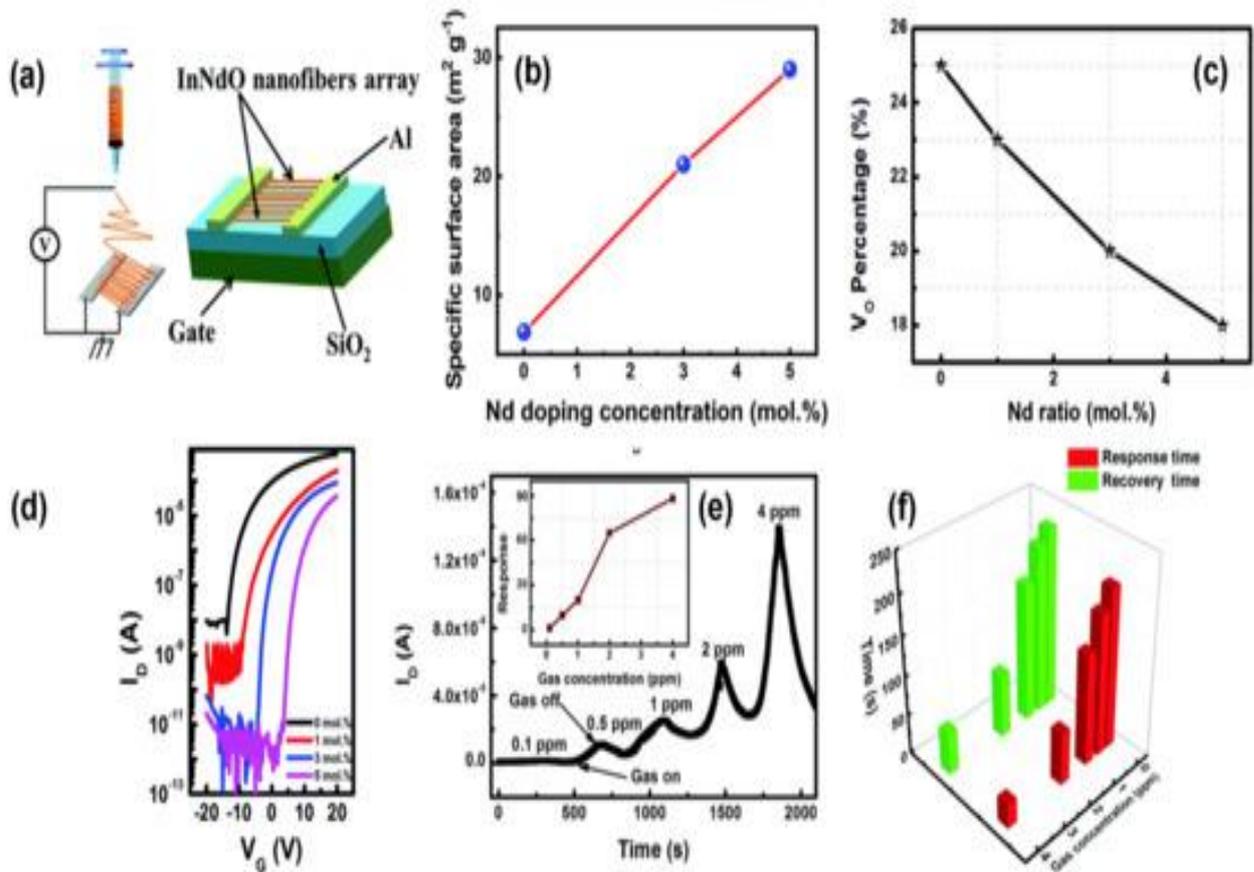


Рисунок 1.10 – Ацетоновий сенсор на основі польового транзистора In₂O₃, легованого Nd. (а) Схема електроспінінгу. (б) Кореляція між питомою площею поверхні нановолокон InNdO та концентрацією легування Nd. (с) Концентрації кисневих вакансій для різного вмісту Nd. (д) Характеристики переносу в залежності від концентрації легування Nd. (е) Динамічна реакція польових транзисторів з нановолокон InNd3 % O. (ф) Час реакції та відновлення в залежності від концентрації ацетону

Очевидно, що чим більше імпульсне зміщення, тим швидша швидкість десорбції NO₂ [35]. Щодо реалізації швидкого часу відгуку та відновлення в газових сенсорах, більше уваги приділяється модифікації матеріалів на додаток до традиційних методів зовнішнього збудження, таких як освітлення та нагрівання. Крім того, польові транзистори також можна оптимізувати, регулюючи умови експлуатації.

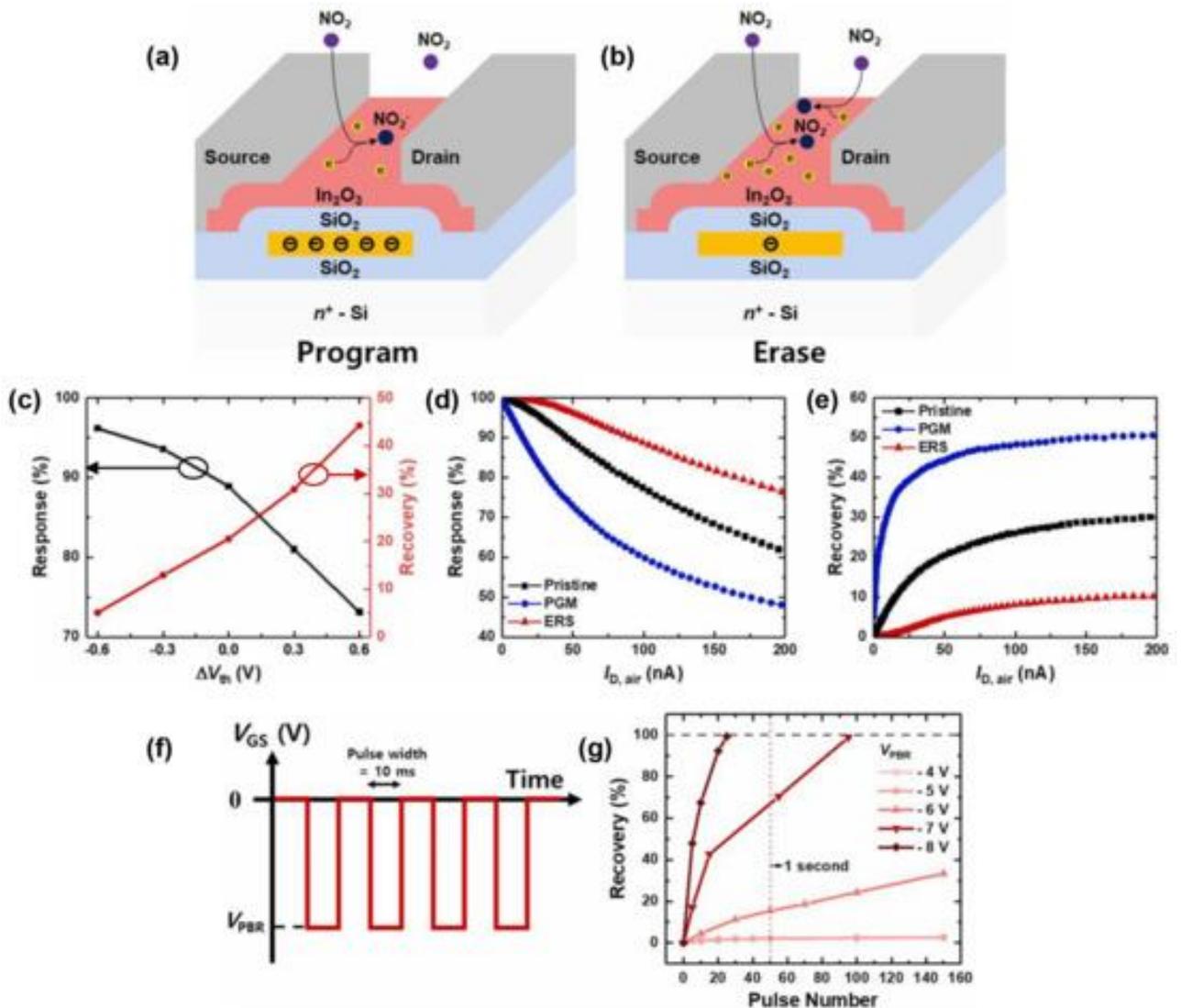


Рисунок 1.11 – Швидкодіючий/відновлювальний NO_2 - сенсор на основі In_2O_3 TFT. Схема системи детектування газу NO_2 у станах (а) програмування та (б) стирання. (с) Залежність реакції та відновлення від ΔV_{th} . (d) Залежність реакції та (е) відновлення від $I(D)$. (f) Імпульсна схема методу PBR. (г) Залежність реакції та (е) відновлення від V (PBR)

1.9 Можливість роботи газочувливих сенсорів при низьких температурах

Газометричні датчики на основі оксидів металів зазвичай потребують роботи за високих температур, що не сприяє збереженню енергії та захисту навколишнього середовища, особливо в довгострокових застосуваннях, таких як системи моніторингу газу. Тривала експлуатація за високих температур у деяких випадках може навіть створювати додаткові ризики. І навпаки, зниження робочої температури може вирішити ці проблеми та розширити діапазон застосувань. Тому досягнення

можливості виявлення низьких температур для газометричних датчиків на основі оксидів металів є одним з основних завдань у цій галузі.

У 2012 році пористі TFT-сенсори на основі оксиду індію досягли прийнятної селективності етанолу за температур нижче 100 °С. У 2013 році масиви польових транзисторів Mg-In₂O₃ з модифікованими наночастинками золота реалізували розпізнавання CO у змішаному газі за кімнатної температури [37]. У 2015 році Ван та ін. розчинили маслянисті наночастинки In₂O₃ в органічних розчинниках та приготували TFT In₂O₃ шляхом нанесення покриття методом центрифугування та відпалу на кремнієвих підкладках. Значні зміни в рухливості електронів та коефіцієнті перемикання струму спостерігалися шляхом порівняння електричних характеристик TFT у повітрі та азоті, що вказує на чутливість TFT In₂O₃ до O₂ за кімнатної температури [37]. У 2017 році TFT з 1D-структурою нанодротяної сітки на основі легованого оловом In₂O₃ як провідного каналу досяг виявлення 20 ppm H₂S з динамічним часом відгуку кілька секунд за кімнатної температури, чому сприяло лазерне випромінювання [38]. У 2018 році Сонбін Хонг та ін. підготували леговані платиною MOSFET -сенсори O₂ на основі Pt-транзистора In₂O₃ за допомогою струменевого друку. Відчуття кисню за кімнатної температури було досягнуто після оптимізації концентрації легування Pt. Поведінка відчуття кисню за кімнатної температури була зумовлена фізичною адсорбцією, що демонструє чудову повторюваність, як показано на рисунку 1.12. Крім того, імпульсні напруги зміщення, які зазвичай впливають на хімічну адсорбцію, не впливали на фізичну адсорбцію. У 2020 році датчик газу етанолу на основі легованого Yb In₂O₃ (InYbO) нановолокнистого TFT досяг межі виявлення 1 ppm для етанолу за температур нижче 80 °С. 3% InNdO TFT забезпечив високу реакцію від 88 до 4 ppm ацетону за кімнатної температури, з часом реакції 31 с та часом відновлення 53 с [38]. У 2022 році газовий TFT-сенсор на основі нановолокон In₂O₃ (InYbO₃), легованих Yb, для виявлення DMF також продемонстрував швидку реакцію та відновлення до 89–2000 ppb DMF нижче 80 °С [37]. У тому ж році газовий сенсор ah-In₂O₃ / SWNT FET на основі кремнію та гнучкої підкладки досяг межі виявлення 1 ppm NO₂ за кімнатної температури [36]. У 2023 році NO₂ Газовий сенсор, що демонструє можливості швидкої реакції та відновлення, був розроблений при 75 °С завдяки механізму переносу електронів між затвором і каналом, що пояснюється швидкою десорбцією NO₂–, що виникає внаслідок руху електронів під впливом електричного поля [37]. Досягнення в поведінці газових сенсорів за кімнатної

температури головним чином пов'язані з модифікаціями матеріалів, включаючи методи підготовки та композити. Традиційні зовнішні подразники, такі як вплив світла, в останні роки були менш досліджені в галузі газових сенсорів на польових транзисторах, тоді як здатність досягти цієї мети шляхом модуляції напруги затвора польовими транзисторами поступово набирає обертів.

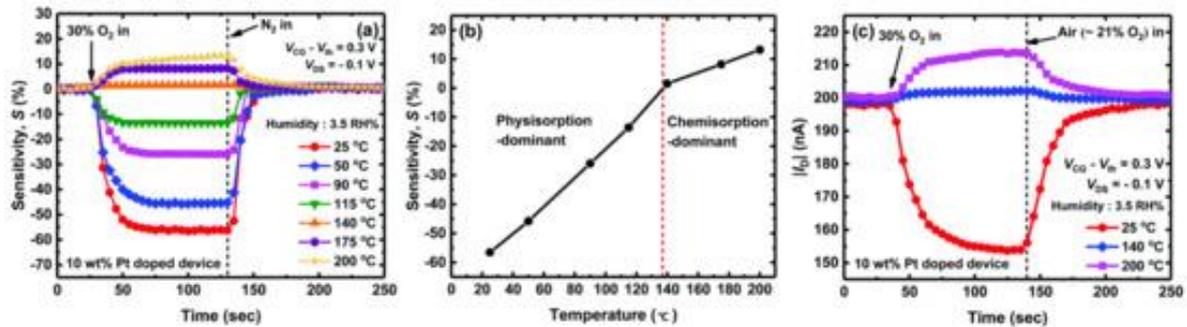


Рисунок 12. Фізисорбція в кисневому датчику високопродуктивного польового транзистора In₂O₃, що працює за кімнатної температури. (а) Динамічна характеристика 30% O₂. (б) Чутливість залежно від температури. (с) Динамічна характеристика 30% O₂ з ~21% O₂, встановленим як еталонний газ

1.10 Вибірковість сенсорів газу

Селективність газового датчика стосується його здатності ідентифікувати конкретні гази та залежить від принципів роботи, матеріалів та конструкції. Нижче наведено поширені методи підвищення селективності газових датчиків. По-перше, вибір чутливих матеріалів є універсальним. Різні елементи газових датчиків демонструють різну селективність до різних газів, тому вибір відповідного сенсорного матеріалу може покращити здатність розпізнавати цільовий газ. По-друге, методи фільтрації за допомогою адсорбентів або мембран є корисними для усунення газів, що заважають. Навколо датчика можна встановити селективний бар'єр, що пропускає лише цільовий газ, тим самим підвищуючи селективність. По-третє, зміна температури датчика не тільки змінює режим вимірювання фізичної або хімічної адсорбції на датчику, але й модифікує механізми, що беруть участь у хімічних реакціях. Отже, селективність можна контролювати робочою температурою. По-четверте, алгоритм обробки даних відповідає вимогам електронного носа. Точність та селективність можна покращити, використовуючи алгоритми обробки даних для аналізу коливальних сигналів, зібраних датчиком. По-п'яте, для усунення перешкод та підвищення селективності можна використовувати

масиви газових датчиків та диференціальну обробку сигналів. По-шосте, напруга на затворі може забезпечити додаткову модуляцію внутрішніх носіїв заряду та дозволити вибіркові схеми проектування газових сенсорів на польових транзисторах.

У 2012 році М. Сіта та Д. Мангаларадж підготували етанольний TFT-сенсор на основі пористих тонких плівок оксиду індію, використовуючи розчин хлориду індію як прекурсор методом крапельного покриття. Сенсор продемонстрував значно вищу реакцію на етанол порівняно з аміаком та ацетоном, демонструючи мінімальну варіацію реакції в діапазоні відносної вологості 40–60% [30]. У 2013 році Зоу та ін. запропонували газовий сенсор на польовому транзисторі з питомою селективністю для різних газів на основі квазіодновимірної наноструктури оксиду індію, легованого Mg, модифікованої різними металевими наночастинками. Традиційний газовий сенсор на польовому транзисторі In_2O_3 реагує як на окислювальні, так і на відновлювальні гази, але описаний E-режим підготовленого польового транзистора не здатний реагувати на окислювальні гази через високу порогову напругу, як показано на рисунку 1.13а. Таким чином, однозначне підвищення селективності для відновлювальних газів може бути досягнуто шляхом навмисної модифікації чутливих до каналу матеріалів спеціальними металевими наночастинками. Модифікований нанодротяним польовим транзистором Mg– In_2O_3 золота демонстрував відгук понад три порядки величини на 100 ppm CO , що піддається впливу змішаного газу в E-режимі, з часом відгуку 4 с та межею виявлення 500 ppb. Аналогічно, модифіковані наночастинками срібла та наночастинками платини польові транзистори Mg– In_2O_3 показали підвищену селективність до етанолу та водню в E-режимі, як показано на рисунку 1.13 б,с.

У 2020 році Чен та ін. підготували газовий TFT-сенсор до N,N-диметилформаміду (ДМФ) з використанням методу електроспінінгу, причому матеріал каналу складався з сітчастої структури одновимірних нановолокон. Відпалені нановолокон мали високу питому площу поверхні, а польові транзистори на основі нановолокон демонстрували чудові електричні характеристики. Отже, датчик демонстрував значну відгук на 89–2000 ppb ДМФ з часом відгуку та відновлення 36 та 67 с відповідно. Зокрема, виняткову селективність щодо ДМФА було доведено під час випробувань п'яти органічних газів, що містять ДМФА, толуол, ксилол, етанол та ацетон, як показано на рисунку 1.13 (правий графік).

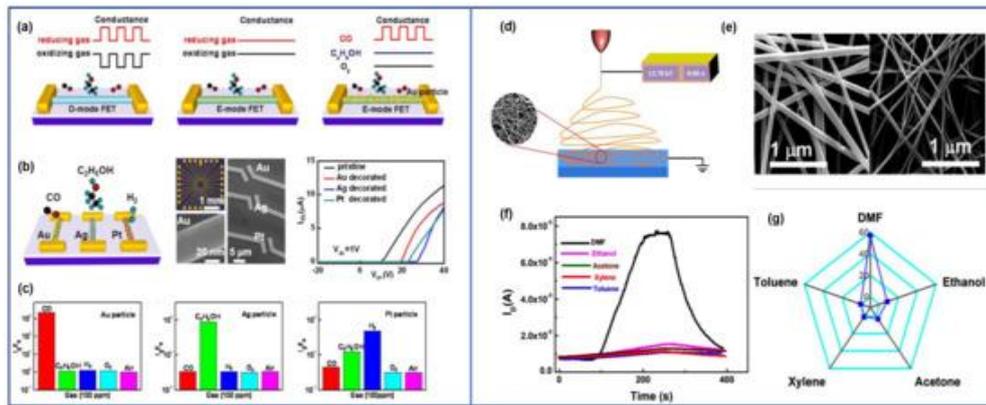


Рисунок 1.13 – (ліва сторона графіка) (а) Діаграма, що ілюструє конфігурацію датчика для концепції дизайну «один замок до одного ключа». (б) Гібридні польові транзистори на основі нановолокна In_2O_3 , леговані Mg, декоровані наночастинками Au, Ag та Pt відповідно. (с) Чутливість трьох польових транзисторів, декорованих наночастинками Au, Ag та Pt, у відповідь на різні гази. (d) Підготовка до електроформування. (е) SEM-зображення нановолокон, легованих Yb, до та після процесу відпалу. (f) Перехідна реакція TFT, легованого Yb, In_2O_3 , на різні гази. (g) Селективність датчика

Польові транзисторні газові сенсори можуть досягти підвищеної селективності не лише завдяки врахуванню матеріалів, але й завдяки синергетичному поєднанню конструкцій на основі механізму та матеріалу, що контрастує з широко дослідженими резистивними сенсорами.

1.11 Оптимізація продуктивності газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3

Оптимізація структури польового транзистора

Застосування газових сенсорів на основі In_2O_3 добре відоме, але більшість сучасних досліджень переважно зосереджені на модифікації чутливих матеріалів. Структура газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 , включаючи матеріали затворів, контакти витік-стік, вбудовані нагрівачі та електричні поля, суттєво впливає на продуктивність газового зондування. Раніше згадувалося, що полікристалічні кремнієві затвори можуть покращити вихідний струм насичення, крутизну та відгук на H_2S порівняно зі звичайними металевими затворами в MOSFET [38]. У 2017 році Цзен та ін. представили сильно легований АТО (легований сурмою оксид олова) як електроди стоку та витоку в контакт з нанодротами оксиду металу, демонструючи більш стабільний та нижчий контактний опір порівняно з ситуаціями, заснованими на традиційних Ti-контактах, як показано на рисунку 1.14e. Крім того, стабільність та

низький контактний опір АТО зберігалися протягом щонайменше 1960 годин у відкритому повітрі при температурі 200 °С, зберігаючи при цьому чутливість та відгук на NO₂ без деградації. Оптимізація довготривалої стабільності була досягнута шляхом заміни традиційних металевих матеріалів витік-стік на оксиди металів у газовому польовому транзисторі, як показано на рисунку 1.14 f–h [36]. Крім того, MOSFET-транзистори з плаваючою структурою затвора демонструють потенційне застосування газових польових транзисторів. Крім того, навіть такі параметри, як співвідношення сторін та ширина поперечно-пальцевих електродів у каналах польового транзистора, впливають на продуктивність пристрою та властивості датчиків газу.

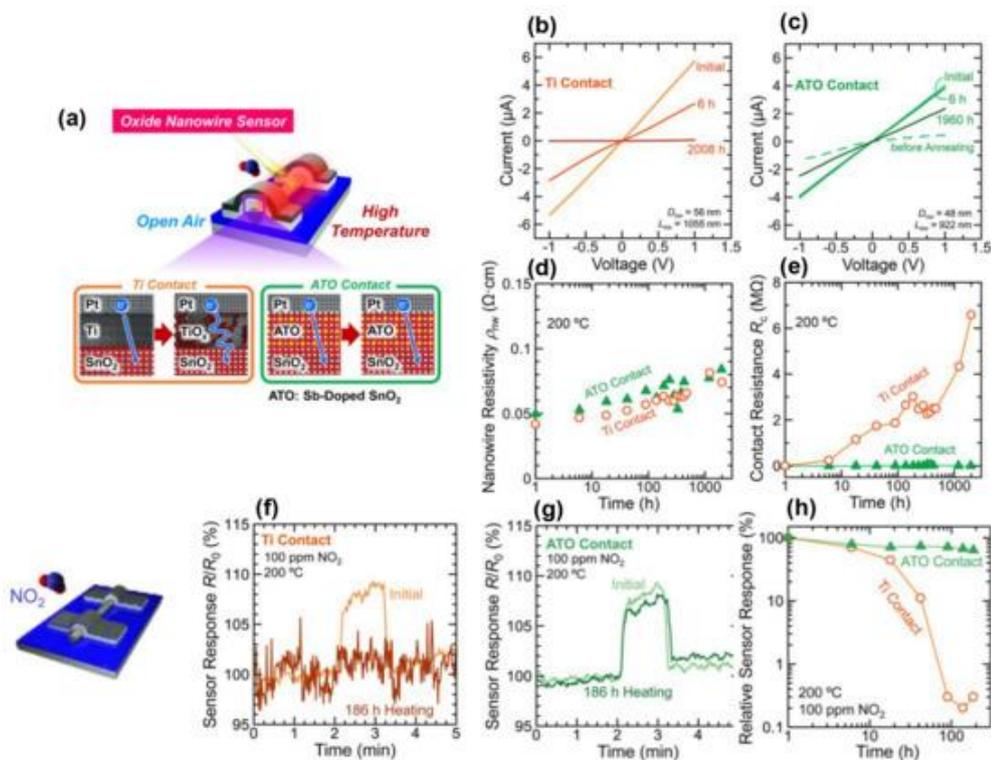


Рисунок 1.14 – Покращення довготривалої стабільності шляхом заміни традиційних металевих контактів сильно легованими оксидами металів. (а) Діаграма причин покращення довготривалої стабільності. Криві вольт-амперної залежності (б) контактних пристроїв Ті та (с) АТО. (д) Питомий опір нанодротів з оксиду металу в залежності від часу старіння. (е) Контактний опір нанодротів з оксиду металу в залежності від часу старіння. Відгук датчика на NO₂ у порівнянні зі старінням після 186 годин контактних пристроїв Ті та (г) АТО. (h) Змінні значення відгуку, що змінюються з часом старіння. Відтворено з дозволу

Оптимізація каналу для газових TFT-сенсорів має вирішальне значення, оскільки він служить як шаром переносу носіїв заряду, так і

шаром, чутливим до цільового газу. Таким чином, канал не тільки визначає електричні характеристики польових транзисторів, але й фундаментально впливає на реакції з цільовими газами. Одновимірні (1D) нанодроти мають переваги як канали газових польових транзисторів з кількох причин. По-перше, високе співвідношення площі поверхні до об'єму 1D нанодротів може збільшити кількість місць взаємодії з молекулами газу, що призводить до покращення чутливості в застосуваннях для газових датчиків. По-друге, рухливість носіїв заряду може бути покращена завдяки їх малому розміру та високій кристалічності, а 1D нанодроти можуть сприяти ефективному переносу носіїв заряду, що призводить до покращення електропровідності та продуктивності пристрою. По-третє, такі властивості, як провідність та ширина забороненої зони, налаштовуються та можуть бути адаптовані шляхом регулювання розміру, складу та морфології, що дозволяє оптимізувати їх для конкретних вимог застосування. По-четверте, 1D нанодроти можуть бути інтегровані в масштабовані виробничі процеси, сумісні з існуючими напівпровідниковими технологіями, що дозволяє їх вбудовувати в складні електронні пристрої та системи. Загалом, 1D нанодроти представляють перспективні можливості для реалізації високопродуктивних каналів польових транзисторів з розширеною функціональністю та універсальністю.

У 2013 році Цзоу та ін. запропонували конфігурацію гібридного сенсора «один ключ до одного замка» на основі 1D нанодротів Mg–In₂O₃ для селективного виявлення певних відновлювальних газів у складних умовах навколишнього середовища. Традиційні польові транзистори In₂O₃ в D-режимі реагують як на окислювальні, так і на відновлювальні гази. Однак порогову напругу польового транзистора можна збільшити для формування E-режиму, регулюючи концентрацію легування Mg, в якому пристрій не реагує на окислювальні гази. Подальше селективне виявлення відновлювальних газів досягається шляхом специфічних модифікацій різними металевими наночастинками. Зокрема, нанодроти, модифіковані наночастинками Au, Ag та Pt, були чутливими до CO, етанолу та H₂ відповідно [39].

Одновимірні нанодроти з оксиду металу слугують чудовими функціональними одиницями для інтегрованих та прозорих електронних пристроїв. Однак методи синтезу зазвичай неконтрольовані та передбачають випадковий розподіл, що створює труднощі для масового виробництва. У 2019 році Те-Сік Кім та ін. представили підхід прямого друку великомасштабних матеріалів для універсальних нанорозмірних

електронних пристроїв з нанодротів з оксиду металу. Цей підхід пропонує кілька переваг, таких як високо вирівняні, цифрово керовані та довільно довгі масиви дротів з оксиду металу (MOW), як показано на рисунку 1.15. Крім того, було перевірено їх застосування в газових датчиках. Метод включає прямий друк під високим тиском розчинів жертвовного полімеру та прекурсорів на кремнієвій підкладці з подальшим спіканням для формування масиву MOW. Верхній контактний електрод виготовляється за допомогою звичайного процесу термічного випаровування металу. Масштабне виробництво та точний контроль процесу MOW можуть бути досягнуті завдяки цьому підходу прямого друку, що призводить до покращення стабільності та надійності газових сенсорів на польових транзисторах. Контрольоване приготування 1D нанодротів великої площі є одним із напрямків розвитку майбутнього.

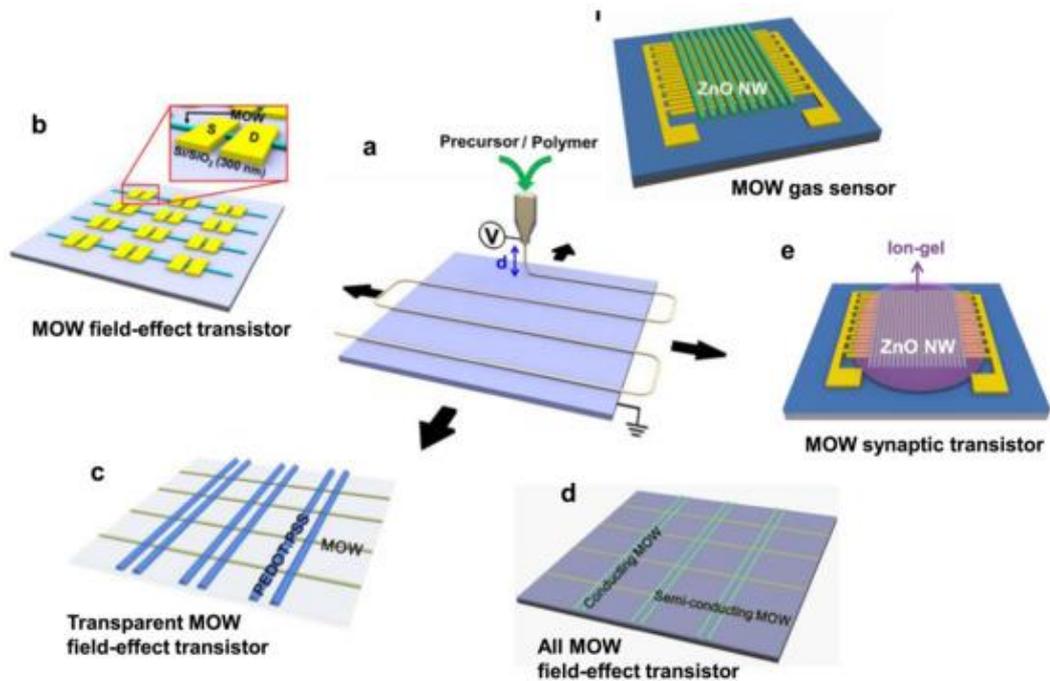


Рисунок 1.15 – Схема нанорозмірних схем MOW, надрукованих безпосередньо на підкладці. (а) Друк під цифровим контролем. (б) Польовий транзистор з нанодроту з оксиду металу. (с) Прозорий польовий транзистор з нанодроту з оксиду металу. (д) Польовий транзистор з повністю нанодроту з оксиду металу. (е) Синаптичні транзистори з нанодроту з оксиду металу. (ф) Газові сенсори з нанодроту з оксиду металу

Оптимізація умов експлуатації

Оптимізація умов роботи датчиків для покращення продуктивності газового зондування є поширеним підходом для польових транзисторів. Конструкція польових транзисторів спрямована на посилення струму під

впливом електричного поля затвора, що ефективно підсилює реакцію газового зондування. По-перше, позитивне або негативне зміщення напруги керування затвором V_{pre} , що застосовується перед вимірюванням газу, може вибірково посилити реакцію на окислювальні гази, такі як NO_2 , або відновні гази, такі як H_2S . Крім того, вибір відповідної полярності зміщення напруги затвора після випробування газу може прискорити десорбцію та скоротити час відновлення. По-друге, інтеграція мікронагрівача в польові транзистори сприяє роботі за оптимальної температури для досягнення найкращої реакції, чутливості та часу реакції або відновлення. По-третє, зміщення імпульсною напругою замість постійної напруги може загалом покращити електричні характеристики польових транзисторів, тим самим покращуючи продуктивність газового зондування. По-четверте, відповідне зміщення переходу тіло-витік може не тільки збільшити співвідношення сигнал/шум газових MOSFET-датчиків, але й частково відновити повторюваність та стабільність, спричинені пошкодженням від напруги у вимкненому стані. Зрештою, зовнішні подразники, такі як вплив світла, можуть значно покращити ефективність газочутливості.

У 2021 році Донсок Квон та ін. використали той самий датчик для прогнозування концентрацій NO_2 та H_2S за допомогою алгоритмів навчання, що включають рекурентні нейронні мережі (RNN) та повністю зв'язані нейронні мережі (FCNN), причому перехідні реакції відображають концентрації цільових газів та робочі температури. Навіть з меншою кількістю входних нейронів, RNN з коефіцієнтом помилок 1,94% перевершила FCNN з коефіцієнтом помилок 3,02% після навчання RNN та FCNN у фреймворку PyTorch [38]. Після цієї роботи їхня група створила MOSFET на основі тонкої плівки In_2O_3 , а реакції на NO_2 та H_2S за різних робочих температур, напруг на затворі та концентрацій газу були використані як навчальний набір. Низький коефіцієнт помилок прогнозування, приблизно 3%, для концентрації газу був досягнутий завдяки використанню алгоритму спайкових нейронних мереж (SNN). Крім того, час роботи SNN становив близько 5 с, що робить його придатним для швидкого виявлення [31]. Обидві спроби прогнозування концентрації газу, як показано на рисунку 1.16, базувалися на динамічній перехідній реакції газових сенсорів на польових транзисторах, подібній до вилучення параметрів резистивних сенсорів.

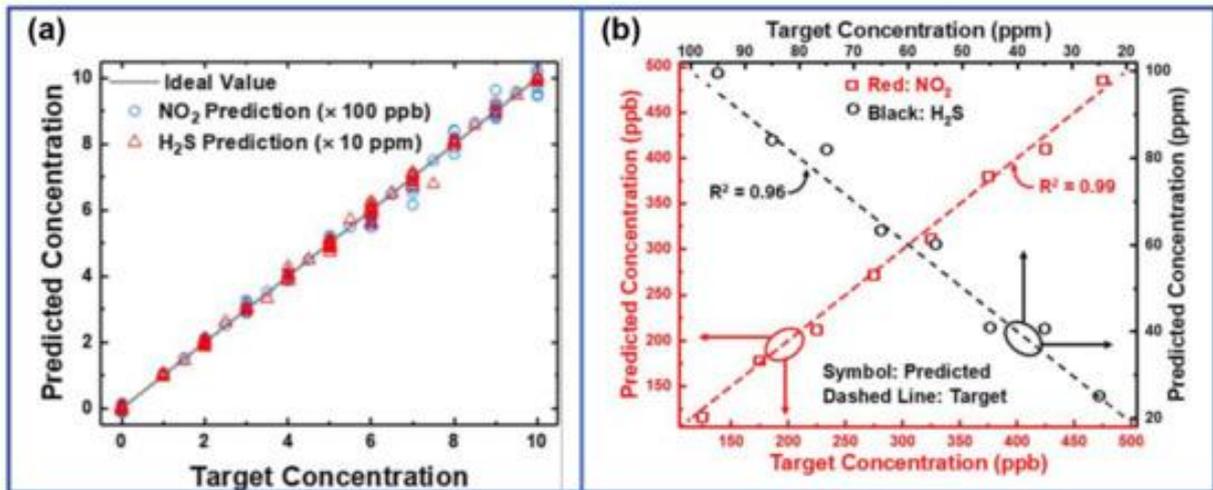


Рисунок 1.16 – (ліва частина графіка) (a) Прогнозована концентрація NO₂ та H₂S з використанням послідовності RNN протягом 500 епох порівняно з цільовою концентрацією. Відтворено з дозволу [77]. Авторське право 2021, Elsevier. (права частина графіка) (b) Прогнозовані концентрації H₂S та NO₂ за допомогою SNN

Вилучення кількох параметрів з характеристик передачі та виходу польових транзисторних газових сенсорів пропонує переваги в прогнозуванні типів та концентрацій газу за допомогою алгоритмів. На відміну від резистивних газових сенсорів, що залежать від параметрів динамічної характеристики перехідних процесів, таких як значення відгуку та час відгуку, польові газові сенсори пропонують ширший діапазон параметрів, що вилучаються з кривих передачі та виходу перехідних процесів, таких як вихідний струм насичення, коефіцієнт перемикавання, порогова напруга, концентрація та рухливість носіїв заряду, підпорогові коливання тощо. Варіації зміщення затвора призводять до змін кількох параметрів вимірювання, і ці параметри можуть забезпечувати незалежні або частково незалежні виходи, що призводить до двовимірних та тривимірних розподілів відгуку. Прогнози, засновані на тривимірних розподілах, зазвичай дають точніші оцінки концентрації газу порівняно з тими, що базуються на двовимірних розподілах.

1.12 Перспективи розвитку газочутливих сенсорів

Висока концентрація носіїв заряду та рухливість оксиду індію є ключовими причинами його високої чутливості до газових датчиків. У таблиці 1.1 наведено кілька типів транзисторів In₂O₃ з високою рухливістю. Газові датчики на основі польових транзисторів In₂O₃ викликали значний інтерес завдяки

потенціалу високої чутливості, низького енергоспоживання та сумісності з технологією інтегральних схем [40, 41]. Однак вони також стикаються з проблемами, як і будь-яка технологія, і пропонують перспективи на майбутнє.

Таблиця 1.1 - Транзистори In₂O₃ з високою рухливістю

Type	Preparation Method	Mobility/ $\mu\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Commercial IGZO thin film	PVD	10
Unpassivated In ₂ O ₃ thin film	PVD	85
In ₂ O ₃ nanowires	CVD	>200
Zn-doped In ₂ O ₃ nanowires	CVD	139
PVA-doped In ₂ O ₃ thin film	Solution processed	4
PEI-doped In ₂ O ₃ thin film	Solution processed	9

Основна проблема полягає в досягненні високої селективності для конкретних цільових газів при одночасному ефективному мінімізації перешкод від інших газів навколишнього середовища. Підвищення селективності часто вимагає інтеграції додаткових сенсорних матеріалів або передових методів обробки сигналів [40]. По - перше, різні методи підготовки забезпечують різноманітні характеристики сенсорних датчиків матеріалів та газів, що складаються переважно з In₂O₃. Включення металевих наночастинок, легування рідкісноземельними елементами, композитів на основі оксидів звичайних металів та композитів, включаючи сполуки на основі вуглецю, графен та MXene тощо, певною мірою підвищують селективність. Тому подальші дослідження в галузі матеріалознавства, включаючи вивчення нових наноструктур, методів легування та методів функціоналізації поверхні, мають вирішальне значення для підвищення селективності газових сенсорів на основі польових транзисторів In₂O₃ [41]. По -друге, зовнішні подразники, такі як температура та освітлення, можуть змінювати режими сенсорних реакцій газових реакцій шляхом фізичної або хімічної адсорбції. По-третє, використання напруги на затворі може забезпечити додаткову модуляцію носіїв заряду в каналі, тим самим посилюючи або пригнічуючи реакції в бік окислювальних або відновних газів [42]. По-четверте, аналіз головних компонентів (PCA), реалізований за допомогою алгоритмів на тестових даних газових сенсорів, є основним методом ефективного підвищення селективності польових транзисторів In₂O₃. Багатопараметрична

екстракція польових транзисторів є корисною для досягнення тривимірного розподілу PCA та точнішого прогнозування типів і концентрацій газів [43].

Хоча стабільні властивості In_2O_3 були підтверджені, довгострокова стабільність композитів потребує дослідження. Ці газові сенсори на польових транзисторах можуть з часом погіршуватися через фактори навколишнього середовища, такі як вологість, коливання температури та вплив цільових газів. Забезпечення довгострокової стабільності та надійності має вирішальне значення для практичного застосування [42]. Іншим нестабільним фактором є контакт між електродами витік/стік та матеріалом каналу, In_2O_3 . Ti або Cr зазвичай використовуються як метал для прямого контакту з In_2O_3 через вплив контактного опору. Однак ці два метали можуть окислюватися з часом, що призводить до нестабільності та ненадійності польових транзисторів. Дослідження легованих оксидів металів, що замінюють звичайні Ti/Cr, продемонстрували стабільніший контакт витік/стік. Тому необхідні подальші дослідження для вивчення стабільного контакту [41].

Незважаючи на прогрес у мініатюризації газових сенсорів на основі польових транзисторів In_2O_3 , необхідні додаткові зусилля для їх інтеграції в компактні та портативні пристрої для реальних застосувань. Це вимагає вирішення проблем, пов'язаних з технологіями виготовлення, схемами обробки сигналів та управлінням живленням. Як правило, MOSFET менші за TFT, що робить їх більш сприятливими для інтеграції. TFT демонструють більші характеристики та вище співвідношення сигнал/шум, а також менші межі виявлення газу. Конкретний тип сенсора визначається шляхом всебічного врахування вимог практичного застосування [39].

Збільшення часу відгуку та відновлення є критично важливим для застосувань, які вимагають швидкого виявлення та моніторингу концентрацій газу. Швидкість та кількість перенесених електронів, які впливають на час відгуку та відновлення, відіграють вирішальну роль у реакціях окислення або відновлення, що часто відбуваються в газових сенсорах. Оптимізація часу відгуку та відновлення може бути досягнута за допомогою інженерії матеріалів, такої як легування, модифікація, композити, зовнішні подразники та внутрішні електричні поля через напругу на затворі [38].

Газові датчики на основі польових транзисторів (FET) регулярно демонструють температурно-залежну поведінку, що суттєво впливає на їхню продуктивність та надійність, особливо в умовах коливань або

екстремальних температур. Розробка стратегій для пом'якшення температурних впливів або впровадження методів температурної компенсації є надзвичайно важливим. Тривала робота за високих температур негативно впливає на стабільність, надійність та термін служби пристрою. Тому досягнення цільового газоаналізу за низьких температур або навіть за кімнатної температури стає особливо важливим. Досягнення в матеріалознавстві, у поєднанні з внутрішніми електричними полями, що генеруються властивостями польового ефекту, надають можливості для досягнення чутливості за нижчих температур [42].

Загалом, майбутні перспективи газових сенсорів на основі In_2O_3 FET повинні зосереджуватися на матеріалознавстві, інтелектуальних сенсорних системах, гнучких та носимих пристроях, а також міждисциплінарній співпраці. Поточні дослідження в галузі матеріалознавства мають вирішальне значення для підвищення продуктивності сенсорних датчиків на основі In_2O_3 FET, що включає вивчення нових наноструктур, методів легування та методів функціоналізації поверхні для покращення чутливості, селективності та стабільності. Інтеграція з передовими алгоритмами обробки сигналів, методами машинного навчання та можливостями бездротового зв'язку може дозволити розробку інтелектуальних сенсорних систем, здатних здійснювати моніторинг у режимі реального часу, аналізувати дані та автономно приймати рішення. Розширення сфери застосування газових сенсорів на основі In_2O_3 FET до гнучких та носимих пристроїв має потенціал для революціонізувати охорону здоров'я, моніторинг навколишнього середовища та застосування в сфері особистої безпеки. Дослідницькі зусилля повинні бути зосереджені на розробці гнучких підкладок, масштабованих процесів виготовлення та біосумісних інтерфейсів сенсорів. Співпраця між дослідниками в галузі матеріалознавства, електротехніки, хімії та інших суміжних галузей є важливою для стимулювання інновацій у технології газових сенсорів на основі In_2O_3 FET. Міждисциплінарні підходи можуть призвести до проривів у проектуванні, виготовленні та інтеграції сенсорів з додатковими технологіями. З подальшим розвитком ці датчики можуть відігравати ключову роль у вирішенні екологічних проблем.

1.13 Висновки до розділу

У цьому огляді представлено порівняльний аналіз сенсорів газу на основі In_2O_3 . Відмінна стабільність, низька вартість, висока чутливість та

оксид індію (In_2O_3), напівпровідника на основі оксиду металу, були підтверджені в галузі газових датчиків. Звичайні газові датчики на основі In_2O_3 використовують прості та легкі у виготовленні резистивні компоненти як перетворювачі. Однак швидкий розвиток Інтернету речей висунув вищі вимоги до газових датчиків на основі оксидів металів, включаючи, перш за все, зниження робочих температур, покращення селективності та реалізацію інтегрованості. У відповідь на ці три основні проблеми, газові датчики на основі польових транзисторів (FET) викликали зростаючий інтерес протягом останнього десятиліття. Порівняно з іншими напівпровідниками на основі оксиду металу, In_2O_3 демонструє більшу концентрацію та рухливість носіїв заряду. Ця властивість є перевагою для виробництва польових транзисторів з винятковими електричними характеристиками, за умови, що струм у вимкненому стані контролюється на достатньо низькому рівні. У цьому огляді представлено значний прогрес, досягнутий у газових датчиках на основі польових транзисторів In_2O_3 за останні десять років, охоплюючи типові конструкції пристроїв, показники продуктивності газових датчиків, методи оптимізації та стратегії майбутнього розвитку на основі газових датчиків на основі польових транзисторів In_2O_3 .

2 РОЗРОБКА СЕНСОРА З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ (SAW)

У контексті автономного моніторингу навколишнього середовища, це дослідження досліджує датчик поверхневих акустичних хвиль (SAW), призначений для селективного виявлення вуглекислого газу (CO₂). Датчик базується на п'єзоелектричній підкладці LiTaO₃ з мідними міжпальцевими перетворювачами та шаром полієфірїміду (PEI), обраним за його високий електромеханічний зв'язок та сильну спорідненість до CO₂. Було проведено моделювання методом скінченних елементів для аналізу резонансної частотної характеристики при різних концентраціях газу, товщині плівки, тиску та температурі. Результати демонструють лінійний та чутливий зсув частоти, з можливістю виявлення, починаючи з 10 ppm. Автономність датчика забезпечується п'єзоелектричним збирачем енергії, що складається з консольної балкової конструкції з прикріпленою сейсмичною масою, де механічні коливання викликають напругу в п'єзоелектричному шарі (PZT-5H або PVDF), генеруючи електричну енергію за допомогою прямого п'єзоелектричного ефекту. Було проведено аналітичний та числовий аналізи для оцінки впливу частоти збудження, властивостей матеріалу та оптимального навантаження на вихідну потужність. Ця інтегрована конфігурація пропонує компактне та енергонезалежне рішення для моніторингу CO₂ у режимі реального часу в умовах низької потужності або важкодоступних середовищ.

2.1 Основні напрямки побудови сенсорів з автономним живленням для моніторингу вуглекислого газу

В останні роки розробка автономних [43], енергоефективних пристроїв набула дедалі більшого значення [44], особливо в контексті моніторингу навколишнього середовища, носимої електроніки та бездротових сенсорних мереж. Ці системи часто працюють у віддалених або важкодоступних місцях [45], де залежність від традиційних джерел живлення є недоцільною [46]. Отже, збирання енергії навколишнього середовища та інтеграція технологій інтелектуального зондування в єдину платформу стали перспективною стратегією для живлення пристроїв з низьким споживанням енергії без необхідності зовнішніх батарей.

Енергія навколишнього середовища присутня в різних формах [45]: світло, тепло, вібрації та електромагнітне випромінювання [46], всі з яких

можна перетворити на електричну енергію за допомогою відповідних механізмів перетворення. Серед них вібраційна енергія виділяється своєю доступністю в багатьох практичних середовищах, від руху людини до структурних вібрацій у промисловому обладнанні. П'єзоелектричні матеріали, здатні перетворювати механічне напруження на електричний заряд, виявилися дуже перспективними в цьому відношенні [47]. Їхнє властиве електромеханічне з'єднання не тільки дозволяє збирати енергію, але й пропонує можливість сенсорних застосувань, що робить їх привабливими кандидатами для багатофункціональних систем.

Паралельно з цим, технології виявлення газів значно розвинулися, особливо для застосувань, що вимагають чутливості, селективності та низького енергоспоживання [45]. Загальні підходи включають МОН-сенсори (МОН), електрохімічні елементи, методи оптичної абсорбції та ємнісні сенсори. Хоча кожен метод має свої сильні сторони, залишаються проблеми щодо їхньої довгострокової стабільності, потенціалу мініатюризації та сумісності з автономними системами. У цьому контексті сенсори поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) привернули значну увагу завдяки своїй високій чутливості до поверхневих збурень, швидкому часу відгуку та сумісності з бездротовим зв'язком та роботою без батарейок [46].

Наприклад, датчики поверхневих акустичних хвиль (SAW) широко використовуються для виявлення токсичних газів та біологічних агентів у рідинах. Протягом останніх двох десятиліть біосенсори на основі SAW, включаючи горизонтально поляризовані зсувні хвилі (SH-SAW), датчики хвиль Лява [22] та датчики хвиль Релея [25], були широко досліджені. Ці високочастотні (100 МГц–1 ГГц) масочутливі пристрої використовують міжпальцеві перетворювачі (IDT) для обмеження акустичної енергії поблизу поверхні п'єзоелектричних підкладок [37].

Хоча традиційні резонатори на поліахорових хвиль (ПАХ) продемонстрували надзвичайну чутливість у застосуваннях для вимірювання газу, їхня залежність від резонансних структур з високим Q (що потребують сотень пар електродів, наприклад, $N > 342$ для LiTaO_3 χ_x -зрізу [38]) вносить невід'ємні компроміси в енергоефективності та складності виготовлення. Недавні дослідження показують, що такі системи зазвичай вимагають стабільного високовольтного збудження (15–20 В) для підтримки різких резонансних піків, що обмежує їх сумісність з середовищами з обмеженою енергією. Наприклад, Wang та ін. (2023) продемонстрували, що резонансні газові сенсори SAW споживають >25

мВт, що робить їх непрактичними для безбатарейних застосувань Інтернету речей [47].

На відміну від цього, спрощені архітектури SAW ($N > 40$ електроди) у поєднанні з низьковольтними п'єзоелектричними мікрогенераторами стали життєздатною альтернативою. Як показали Чен та ін. (2022), зменшення кількості електродів IDT до $N < 100$ зменшує омичні втрати на 60% порівняно зі звичайними конструкціями, без шкоди для чутливості виявлення CO₂ [29]. Це узгоджується з електромеханічними перевагами LiTaO₃ ($k^2 \approx 5\%$), що дозволяє ефективно генерувати SAW навіть за зниженої напруги [30]. Крім того, CO₂-селективна адсорбція шарів полієфіріміду (PEI), як підтверджено Zhang et al. (2023), дозволяє безпосередньо модулювати швидкість SAW через взаємодію аналіту, усуваючи необхідність у складних схемах узгодження імпедансу.

Кількісні досягнення в таких архітектурах є помітними. Наприклад, Gupta et al. (2024) повідомили про 92% скорочення споживання енергії (з 25 мВт до 2 мВт) у сенсорах CO₂ на основі SAW, що використовують аналогічні низьковольтні стратегії, досягнувши меж виявлення 10 ppm [41]. Ці переваги зумовлені синергією між збором енергії та зондуванням: п'єзоелектричні мікрогенератори, оптимізовані Lee et al. (2023), безпосередньо живлять вдвоє діаграмні перетворювачі (ВДП), минаючи енергоємні радіочастотні джерела.

Ця зміна парадигми відповідає стандартам Інтернету речей, що підкреслюють простоту, роботу з наднизьким енергоспоживанням та масштабоване виробництво. Відокремлюючи чутливість від умов строгого резонансу, нещодавня робота усуває розрив між високопродуктивним зондуванням SAW та сталим автономним режимом роботи, як продемонстрували Рахман та ін. (2024) [48] у польових дослідженнях.

Датчики SAW для хімічного та біологічного виявлення спираються на взаємодію між шаром перетворювача та цільовими аналітами, перетворюючи її на вимірювані механічні або електричні реакції.

Як зазначали Хуммаді та ін. (1997) [38], якщо припустити, що v являє собою швидкість SAW у підкладці та є функцією кількох фізичних та екологічних параметрів, таких як маса (m), електричні властивості (E), такі як провідність, механічні властивості (Mi), такі як модуль пружності та в'язкості, а також середовище (ev), включаючи температуру, тиск та вологість. Крім того, якщо dv представляє зміну або збурення швидкості хвилі, дотримуючись ланцюгового правила [39] d можна виразити наступним чином:

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial m} \cdot dm + \frac{\partial v}{\partial E} \cdot dE + \frac{\partial v}{\partial M_i} \cdot dM_i + \frac{\partial v}{\partial e_v} \cdot de_v \right) \quad (2.1)$$

Кілька досліджень [39-41] продемонстрували ефективність та чутливість поглиначів CO₂, зокрема тих, що базуються на полієфіриміді (PEI), у складних середовищах. У цьому дослідженні розроблено датчик SAW з використанням інноваційної комбінації матеріалів: танталату літію (LiTaO₃), як п'єзоелектричної підкладки та полієфіриміду (PEI) як шару, що поглинає CO₂. Це поєднання є особливо новим; LiTaO₃ пропонує вищий коефіцієнт електромеханічного зв'язку, ніж кварц, що підвищує чутливість, тоді як PEI продемонстрував сильну спорідненість та селективність до CO₂ за різних умов навколишнього середовища. Використання мідних переплетених перетворювачів (IDT) додатково сприяє економічно ефективному виготовленню без шкоди для продуктивності.

У цій роботі пропонується платформа з подвійною функцією, яка поєднує п'єзоелектричний збір енергії з детектуванням CO₂ на основі полімерного хвильового перетворення (ПХП). Підхід побудований на двох основних компонентах. По-перше, п'єзоелектричний збір енергії моделюється та аналізується за допомогою аналітичних та числових методів для визначення оптимального матеріалу та конфігурації для перетворення механічної енергії в електричну. Проводиться порівняльне дослідження кераміки PZT-5H та полімеру PVDF. По-друге, дослідження зосереджено на моделюванні та аналізі продуктивності мікросенсора ПХП PEI/Cu/LiTaO₃. Моделювання методом скінченних елементів використовується для дослідження того, як резонансна поведінка датчика змінюється залежно від концентрації CO₂, тиску навколишнього середовища, температури та товщини шару поглиначя. Датчик демонструє чудову лінійність у характеристиках зсуву частоти в широкому діапазоні концентрацій, з чутливістю до 10 ppm. Ці результати підкреслюють потенціал датчика для виявлення низьких рівнів CO₂ в автономних системах моніторингу навколишнього середовища.

Новизна цього дослідження полягає не лише в інтеграції функцій збору енергії та газового зондування в єдину систему з автономним живленням, але й у використанні LiTaO₃ та PEI в структурі SAW-сенсора, що забезпечує як покращені електромеханічні характеристики, так і специфічну хімічну спорідненість до CO₂. Результати дослідження сприяють розвитку бездротових сенсорних систем наступного покоління,

які є енергоавтономними, компактними та здатними працювати в різноманітних та вимогливих середовищах.

2.2 Система виявлення CO₂, принцип функціонування

Опис системи

Робота датчика CO₂ з автономним живленням залежить від двох основних компонентів. По-перше, живлення забезпечується п'єзоелектричним мікрогенератором (рис. 2.1). Ця система використовує гнучку механічну структуру у формі балки (рис. 2.2), оснащену масою на своєму вільному кінці. Під впливом навколишніх коливань інерційні сили підсилюють коливання балки, генеруючи механічну енергію [43]. Ця енергія перетворюється на електрику за допомогою прямого п'єзоелектричного ефекту: структурні деформації напружують п'єзоелектричний матеріал, створюючи змінний струм [47]. Для накопичення цієї енергії необхідний випрямний міст або схема перетворення змінного/постійного струму. Недавні дослідження підкреслюють ефективність схем SSHI (синхронізоване перемикання на індуктивності) та DSSH (подвійне синхронізоване перемикання) [43], оптимізованих для середовищ зі змінною частотою. Ці мікрогенератори досягають вихідної потужності від 1 мкВт до 10 мВт, що достатньо для живлення пристроїв з низьким споживанням енергії.

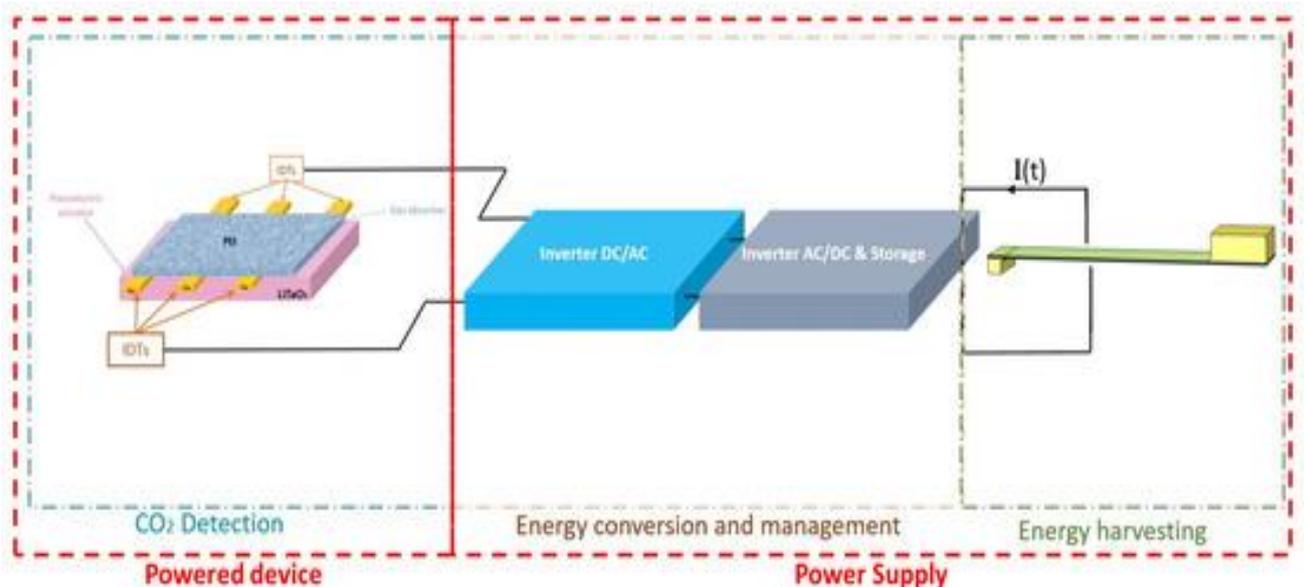


Рисунок 2.1 – Автономний датчик для виявлення вуглекислого газу

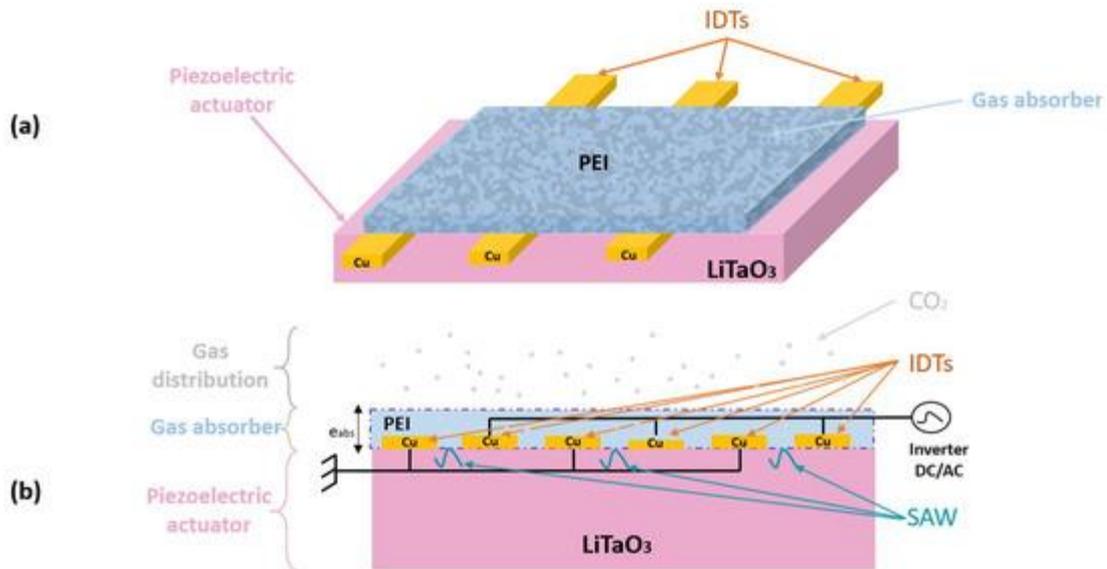


Рисунок 2.2 – 3D (а) та 2D (б) конфігурації SAW-сенсора зі структурою (PEI/Cu/LiTaO₃)

Генерація високочастотних сигналів змінного струму з накопиченої енергії постійного струму для збудження пристроїв на поляхорових хвилях (ПАХ) була ретельно досліджена в літературі. Детальні архітектури генераторів, включаючи конструкції на основі Колпітса та ФАПЧ, оптимізовані для бездротового збудження ПАХ, були запропоновані Шоллем та ін.

У сенсорних системах на основі SAW резонансна частота чутлива до фізичних змін у пристрої SAW, спричинених такими параметрами навколишнього середовища, як тиск, температура або концентрація газу. Ці збурення викликають зсув частоти. Δf пропорційно вимірюваній величині. Для забезпечення безперервного відстеження резонансу використовуються фазово-підстроєні контури (ФАПЧ) або генератори, керовані напругою (ГУН), для динамічного регулювання частоти збудження. Отриманий зсув частоти потім витягується за допомогою схем детектування частоти та обробляється малопотужними мікроконтролерами для генерації цифрових вихідних сигналів, що дозволяє здійснювати автономне зондування на основі ПАВ.

По-друге, виявлення CO₂ здійснюється за допомогою датчика поверхневої акустичної хвилі (SAW). Ці пристрої на основі акустичних хвиль вирізняються наднизьким енергоспоживанням. Вони працюють на високих частотах (100 МГц–1 ГГц) за допомогою міжпальцевих перетворювачів (IDT), розташованих на п'єзоелектричній підкладці. Ці перетворювачі утримують акустичну енергію поблизу поверхні, де функціоналізований шар адсорбенту взаємодіє з молекулами цільового

газу. У присутності CO₂ адсорбція локально змінює масу або жорсткість шару, порушуючи поширення акустичної хвилі. Це збурення генерує вимірювану варіацію (зсув частоти або ослаблення сигналу), безпосередньо корелюючи з концентрацією газу, досягаючи чутливості до кількох ppm.

Поєднуючи ці два компоненти, автономна система забезпечує як збір енергії навколишнього середовища, так і точне виявлення CO₂, усуваючи залежність від зовнішніх джерел живлення. Таким чином, п'єзоелектричні підкладки відіграють подвійну роль:

- Генерація енергії: Збір механічної енергії від вібрацій для електричної підтримки системи.
- Сенсорна платформа: служить активним субстратом для перетворення хімічного сигналу в електричний за допомогою збурень на поверхнево-акумуляуючому хвильовому повітрі (ПВ).

Ця інтегрована архітектура забезпечує повністю самостійне рішення для моніторингу навколишнього середовища, поєднуючи автономність від відновлюваної енергії з високочутливим виявленням газів.

Принцип функціонування

П'єзоелектрична підкладка LiTaO₃ (рис. 2.2) утворює активну основу всього пристрою. Цей кристалічний матеріал ретельно підібраний завдяки своїм винятковим п'єзоелектричним властивостям та низькому затуханню поверхневих акустичних хвиль. При подачі електричної напруги він генерує поверхневі акустичні хвилі (ПАХ), що поширюються на високих частотах, зазвичай в діапазоні від 100 МГц до кількох ГГц. Кристалографічна орієнтація LiTaO₃, зокрема зріз YX (рис. 2.2b), оптимізована для підвищення ефективності перетворення та чутливості до поверхневої взаємодії, забезпечуючи точну реакцію на зовнішні подразники.

Виявлення CO₂ базується на використанні поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), що генеруються та реєструються міжпальцевими перетворювачами (ВШП) (рис. 2.2, а), виготовленими з міді та нанесеними на поверхню підкладки. Ці періодичні металеві електроди виконують подвійну роль:

- Передача: Перетворення електричного сигналу на механічну акустичну хвилю.
- Прийом: Перетворення хвильових збурень (амплітуди, швидкості або коливань частоти) у вимірюваний електричний сигнал, як показано на рисунку 2.2b.

Пристрій SAW, змодельований у цьому дослідженні, базується на простій структурі взаємопов'язаного перетворювача (ВПХ) на основі підкладки з танталату літію (LiTaO_3), без додаткових брегівських відбиваючих ґраток. ВПХ призначені для генерації поверхневих акустичних хвиль релеївського типу, використовуючи оптимальні п'єзоелектричні властивості підкладки в діапазоні 800 МГц–1 ГГц. Довжина хвилі (λ) було встановлено на 4 мкм, орієнтуючись на резонансну частоту близько 850 МГц згідно зі співвідношенням $v_{\text{Rayleigh}} = f \times \lambda$, з $v_{\text{Rayleigh}} = 3400$ м/с для (LiTaO_3). Кожна пара електродів була виконана з шириною отвору 100 мкм, а структура включає понад 40 пар електродів для забезпечення стабільного резонансу. Як матеріал електрода була обрана мідь (Cu) товщиною 300 нм, щоб поєднати високу провідність та технологічність. Ця конфігурація, що базується лише на внутрішньому детекторі, генерує псевдорезонансну поведінку завдяки конструктивній інтерференції випромінюваних поверхневих хвиль.

Продуктивність датчика критично залежить від геометрії внутрішнього перетворювача труби (ВПТ), зокрема від кількості пальців та відстані між ними, що визначає центральну частоту пристрою (наприклад, 433 МГц) та робочу смугу пропускання. Така гнучкість конструкції дозволяє точно налаштувати датчик для конкретних цільових застосувань виявлення газу.

Щоб зробити сенсор селективним до CO_2 , тонкий адсорбційний шар поліетиленіміну (PEI) наноситься на певну область підкладки або між вдвоє розгалуженими контактними транзисторами (рисунок 2.2). Цей полімер, багатий на амінні групи ($-\text{NH}_2$), селективно взаємодіє з молекулами CO_2 (розподіл газу показано на рисунку 2.2b). Адсорбція відбувається переважно через:

- Водневий зв'язок між групами $-\text{NH}_2$ та CO_2 .
- Кислотно-основні реакції, що утворюють карбаматні комплекси ($-\text{NHCOO}-$).

Ця хімічна взаємодія локально змінює масу або жорсткість поверхні, порушуючи поширення акустичної хвилі. Результуюче збурення проявляється як вимірюваний зсув частоти або ослаблення сигналу, що безпосередньо корелює з концентрацією газу, досягаючи чутливості до кількох частин на мільйон (ppm).

2.3 Математична модель механізму виявлення CO₂

Коли до вдовоєрозмірних транзисторів подається високочастотний електричний сигнал, він індукує періодичну деформацію підкладки LiTaO₃, генеруючи поверхневу акустичну хвилю (ПАХ). Ця хвиля поширюється вздовж поверхні підкладки зі швидкістю (v) та частотою (f), що визначаються механічними властивостями матеріалу та геометрією ВДТ.

У присутності CO₂ молекули газу зв'язуються з амініними групами шару PEI за допомогою реакції:



Ця адсорбція змінює ефективну масу та жорсткість поверхні, порушуючи поширення ПАВ. Результуючий зсув частоти (Δf) або фазовий перехід пропорційний концентрації CO₂, що дозволяє кількісне виявлення з роздільною здатністю субпроміжних ppm. Кількість адсорбованого CO₂ безпосередньо залежить від його концентрації в навколишньому середовищі. Додаткова маса (δm) а зміни жорсткості змінюють поширення ПАВ. Відповідно до ефекту маси, швидкість хвилі (v) зменшується пропорційно до (δm), дотримуючись співвідношення:

$$\frac{\delta v}{v} = -k \cdot \delta m \quad (2.2)$$

де k — константа, що залежить від підкладки та частоти. Це збурення призводить до вимірюваного зсуву частоти (δf) між передавальною та приймаючою IDT.

Приймальні вшпорні транзистори перетворюють акустичні збурення на модифікований електричний сигнал. Електронна система аналізує (δf), що лінійно корелює з концентрацією CO₂. Наприклад, зсув на 1 кГц може відповідати збільшенню CO₂ на 10 ppm.

Для дослідження реакції п'єзоелектричного матеріалу, що піддається механічному напруженню, використовується система рівнянь (2.1), де S , T , E та D — це відповідно тензор деформації, тензор напруження, електричне поле та електричне зміщення:

$$\begin{cases} S = s_E \cdot P + d^t \cdot E \\ D = d \cdot P + \varepsilon_P \cdot E \end{cases} \quad (2.3)$$

У динамічному режимі флуктуація тензора деформації та електричного зміщення з часом виражається наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} = s_E \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + d^t \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \\ \frac{\partial D}{\partial t} = d \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \varepsilon_P \cdot \frac{\partial E}{\partial t} \end{cases} \quad (2.4)$$

Електричний баланс між зовнішніми вільними зарядами та внутрішніми зв'язаними зарядами у відкритому колі можна виразити наступним рівнянням:

$$\sigma E_c + \frac{\partial D_p(t)}{\partial t} = j_0 = cte \quad (2.5)$$

де E_c – це електричне поле, створене фіксованими зарядами, D_p – вектор електричного зміщення.

Такий баланс можливий лише за умови $j_0 = 0$, що призводить до нового виразу для індукованого струму.

$$w_{plate} \cdot L \left(d \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \right) = \left(\frac{V_T(t)}{R_p} + C_p \cdot \frac{\partial V_T(t)}{\partial t} \right) \quad (2.6)$$

де w_{plate} – ширина, L – довжина, R_p та C_p – відповідно еквівалентний опір та ємність п'єзоелектричного матеріалу.

Що еквівалентно:

$$i_p(t) = i_{R_p}(t) + i_{C_p}(t) \quad (2.7)$$

Рівняння (2.5) та (2.6) показують, що в перехідному режимі п'єзоелектричний матеріал еквівалентний джерелу струму, підключеному паралельно з певним опором R_p і зазначена ємність C_p .

Потужність, що споживається на виводах чисто омичного резистора, позначеного як R , виражається наступним чином:

$$P_{piezo}(t) = R \cdot \left(\frac{R_p^2}{(R + R_p)^2 + (C_p \cdot \omega \cdot R \cdot R_p)^2} \right) \cdot i_p^2(t) \quad (2.8)$$

де $\omega = 2\pi \cdot f$ – циклічна частота.

Максимальна рекуперована потужність визначається за формулою:

$$\frac{\partial P_p(t)}{\partial R} = 0 \quad (2.9)$$

Система рівнянь, задана (2.1)–(2.7), дозволяє знайти оптимальний електричний опір.

$$C_p \cdot \omega \cdot R_p \gg \gg 1$$

$$R_{opt} = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \quad (2.10)$$

Цей вираз показує, що оптимальний опір обернено пропорційний механічній пульсації.

Оптимальна п'єзоелектрична потужність, що відновлюється генератором, виражається через геометричні, фізичні параметри та швидкість зміни механічного напруження, що задається наступним рівнянням:

$$P_{opt}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C_p \cdot \omega} \cdot ((w_{plate} \cdot L) \cdot d \cdot \frac{\partial P(t)}{\partial t})^2 \quad (2.11)$$

2.4 Чисельне моделювання п'єзоелектричного генератора

У цьому підрозділі детально описано числове моделювання двох пов'язаних систем: п'єзоелектричного збирача, призначеного для перетворення механічних коливань в електричну енергію, та датчика SAW CO₂, що живиться від цієї зібраної енергії. У дослідженні перевіряється, чи

відповідає згенерована напруга робочим потребам датчика, а потім оцінюється реакція датчика за різних газових та температурних умов.

Систему збору енергії, проілюстровану на рисунку 2.3, було проаналізовано за допомогою моделювання скінченних елементів (МСЕ). Метою цього моделювання була оцінка електромеханічної поведінки п'єзоелектричного збирача енергії на основі консольної балки, що піддається синусоїдальному механічному збудженню.

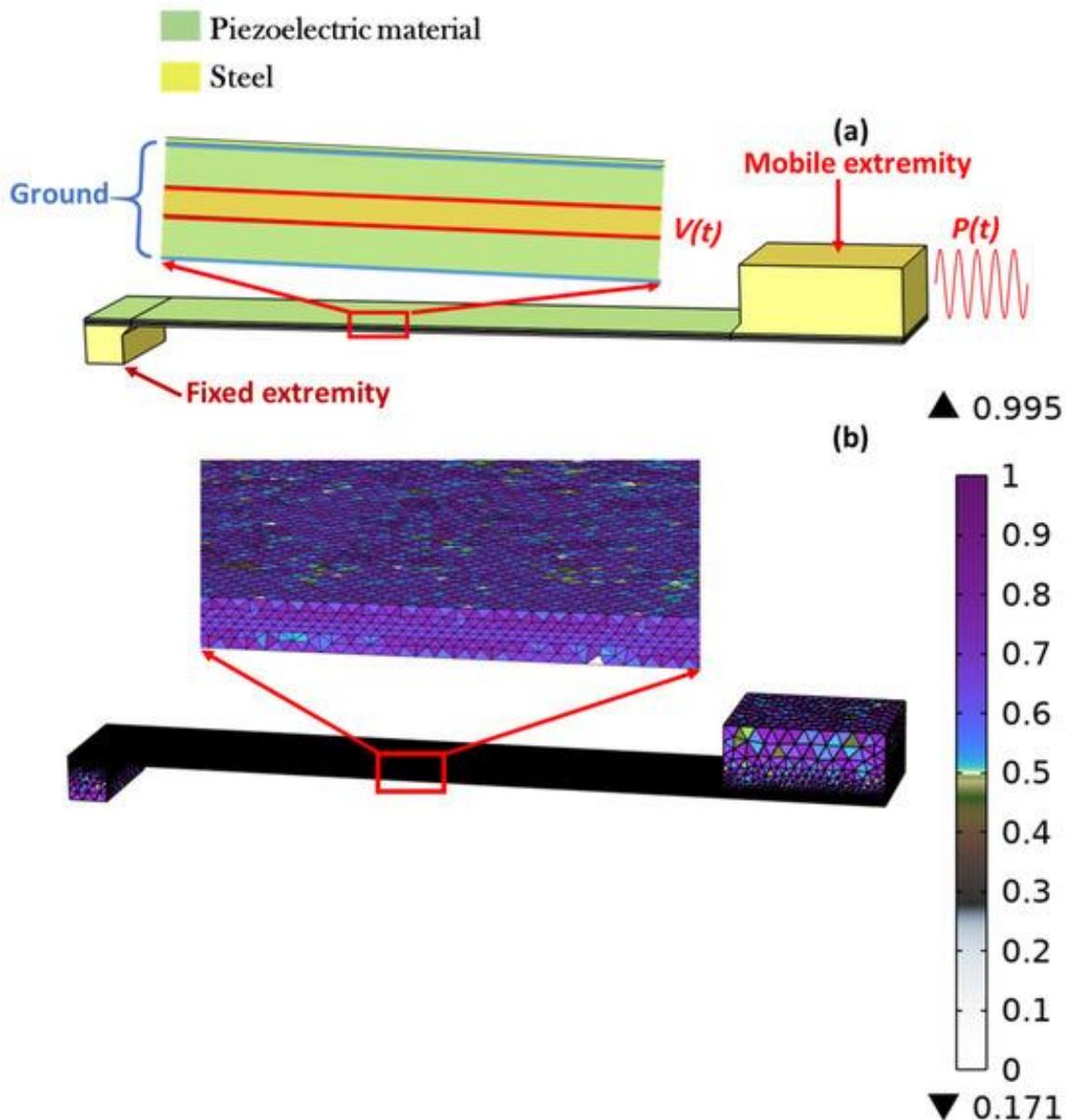


Рисунок 2.3 – 3D-конфігурація системи: (а) Електромеханічна структура, (б)

Повну 3D-модель збирача енергії було розроблено за допомогою програмного забезпечення для моделювання для прогнозування взаємодії між геометрією генератора, інтенсивністю та частотою механічних

коливань, а також вихідними характеристиками, описаними в рівнянні (2.11). Крім того, моделювання було використано для оцінки та порівняння властивостей двох п'єзоелектричних матеріалів з метою оптимізації збору енергії з механічних коливань.

Модель включає три фізичні інтерфейси: механіку твердого тіла, електростатику та зовнішнє електричне коло, щоб відобразити зв'язану реакцію полів пристрою. Геометрія складається зі сталеві підкладки, частково покритої двома шарами п'єзоелектричного матеріалу. Як показано в таблиці 2.1, геометричні параметри залишаються постійними протягом усього дослідження. Один кінець конструкції затиснутий, а інший кінець вільний і з'єднаний з рухомим навантаженням, що прикладає гармонічну силу $P(t)$ індукована напруга $V(t)$ витягується з внутрішніх електродів, тоді як заземлюючі електроди розміщені на зовнішніх поверхнях, що дозволяє збирати диференціальний заряд по п'єзоелектричних шарах.

Таблиця 2.1 - Геометричні параметри п'єзоелектричного матеріалу та сталеві балки

Dimension	Piezoelectric Material	Beam (Steel)
L (cm)	7	7
e (cm)	0.06	0.04

Генератор, зображений на рисунку 2.3, а, складається з двох п'єзоелектричних пластин, встановлених на балці зі сталевим наконечником, один кінець яких нерухомий, а інший контактує з джерелом вібрації $P(t)$, тим самим викликаючи синусоїдальні механічні коливання.

Для збору електричних зарядів, індукованих деформацією, два вихідні електроди вбудовані всередину конструкції, а два заземлювальні електроди розміщені на зовнішніх поверхнях балки. Така конфігурація забезпечує індукцію однакової напруги на вихідних електродах, навіть якщо напруження вище та нижче нейтральної осі мають протилежний знак.

Нарешті, для завершення аналізу методом скінченних елементів було використано сітку, що складається з надзвичайно дрібних вільних трикутників, як показано на рисунку 2.3b.

2.5 Чисельне моделювання датчика CO₂ методом SAW

Для дослідження електромеханічної поведінки було розроблено двовимірну модель скінченних елементів структури датчика SAW (PEI/Cu/LiTaO₃), показану на рисунку 2.2b. Модель включає шар полієфіриміду (PEI), чутливий до CO₂, мідні переплетені перетворювачі (IDT) та п'єзоелектричну підкладку LiTaO₃. Дослідження зосереджено на власній резонансній частоті датчика та її зміні залежно від температури, тиску та товщини PEI. Моделювання проводилося з використанням багатофізичного програмного забезпечення, що поєднує механіку твердого тіла, електростатику та п'єзоелектричні інтерфейси для обчислення власних частот за допомогою методу скінченних елементів

Геометрія та розмірність

Геометрія, що використовується для моделювання, відповідає двовимірному поперечному перерізу пристрою SAW, показаному на рисунку 2.2b та рисунку 2.3a.

Структура включає:

- Зверху газопоглинальна плівка PEI.
- Мідні (Cu) вбочувані транзисторні транзистори (ВТТ), періодично розташовані на п'єзоелектричній поверхні.
- Підкладка LiTaO₃, що підтримує поширення акустичної хвилі.

Модель складається з трьох елементарних комірок IDT з кроком (λ) 4 мкм та загальною шириною домену 3λ . Пальці IDT були змодельовані як електроди, що чергуються, товщиною $0,075\lambda$, що відображає реалістичні розміри літографічного виготовлення. Товщина шару PEI варіюється від 300 нм до 900 нм для оцінки чутливості як функції товщини поглинача. Загальна висота домену простягається до трьох довжин хвиль, щоб врахувати глибину загасання хвиль Релея в п'єзоелектричній підкладці.

Ми вирішили спроектувати геометрію пристрою на рисунку 2.4a таким чином, щоб типова резонансна частота (fr) хвиль Релея пристрою знаходиться в діапазоні від 800 МГц до кількох ГГц для резонатора. Отже, початкова швидкість хвиль Релея, позначена як v_r а $u = 3400 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а також довжина хвилі (λ) 4 мкм, після цього залишаються постійними. Що стосується товщини плівки PEI (що поглинає вуглекислий газ), то вона змінюється в діапазоні від 300 до 900 нм, як ми побачимо далі.

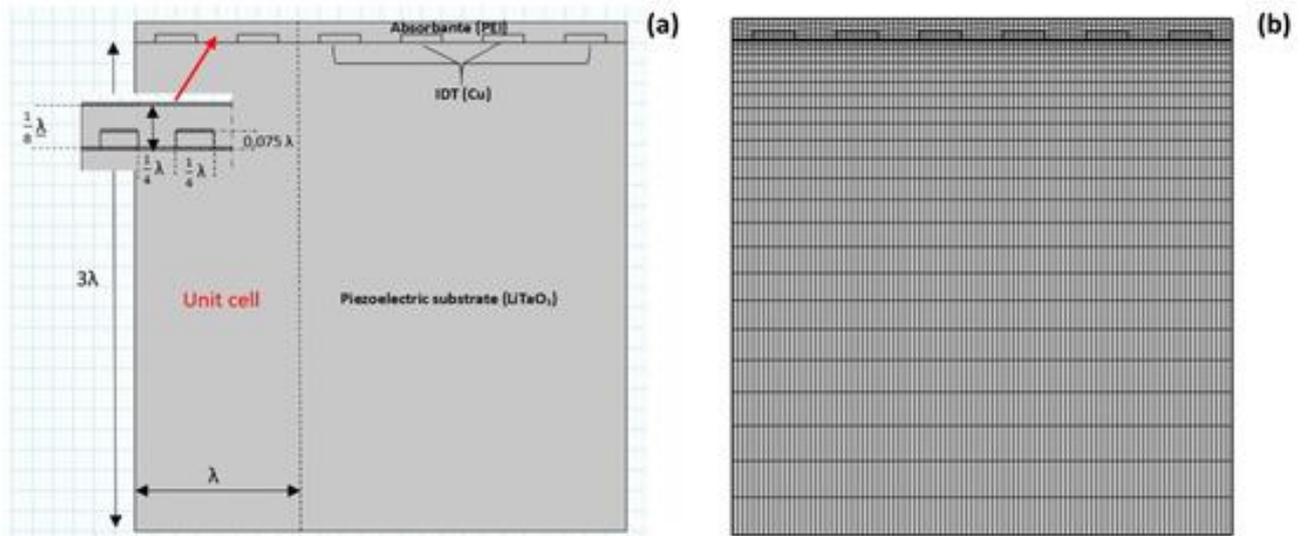


Рисунок 2.4 – Геометрія 2D-моделі: (а) Структурний склад (PEI/Cu/LiTaO₃), (б) Сітчасте представлення.

Граничні умови та створення сітки

Для визначення моделі застосовуються структурні та електричні граничні умови. Ми спостерігаємо, що поверхнева хвиля затухає на глибину трьох довжин хвиль від поверхні, а нижня межа 2D-моделі фіксована. Це призводить до нульового структурного зміщення, але не робить суттєвого внеску у відбиття від нижньої межі до об'єму п'єзоелектричної підкладки, якщо ми спостерігаємо поверхневі хвилі, зокрема хвилі Релея.

Для кожної елементарної комірки (рис. 2.4, а) електроди мають значно вищу електропровідність, ніж PEI (полімер) та LiTaO₃ (діелектрик). Тому можна очікувати, що кожен з електродів буде екіпотенціальним. Отже, ми можемо просто використовувати граничні умови на всіх зовнішніх межах кожного електрода, щоб вказати, в якому екіпотенціальному стані він знаходиться. Ліві межі елементарних комірок встановлені на електричну землю, тоді як праві межі кожної елементарної комірки призначаються плаваючому потенціалу таким чином, що накопичення електричного заряду дорівнює нулю. Ця комбінація електричних граничних умов відповідає конфігурації кола, яка зазвичай підходить для сенсорних застосувань. Аналогічно, використання періодичних граничних умов гарантує, що електричний потенціал та зміщення будуть однаковими вздовж двох вертикальних меж 2D-моделі (див. рис. 2.4, а).

Крім того, сітка, показана на рисунку 2.4b на лівих вертикальних межах елементарної комірки та правих вертикальних межах елементарної

комірки, є ідентичною. Нарешті, інші кінці залишаються за стандартних умов. Для кращого контролю над розміром та вирівнюванням елементів було використано сітку з картами, показану на рисунку 2.4b. Розмір елемента був нижчим $\lambda/10$ щоб забезпечити роздільну здатність мод хвиль Релея та уникнути числової дисперсії. Уточнення сітки було особливо застосовано поблизу меж електрода та РЕІ, де очікуються великі градієнти напружень та електричного потенціалу.

Резонансні частоти

Для датчика SAW резонансна частота визначає конкретну частоту, на якій хвилі Релея поширюються з найвищою ефективністю. Коли CO₂ поглинається чутливим шаром, він змінює масу та жорсткість поверхні, зміщуючи резонанс. Відстеження цього зсуву дозволяє точно виявляти газ. Обидві системи покладаються на точне налаштування резонансу для забезпечення ефективного перетворення енергії та продуктивності чутливості.

Швидкість SAW є важливим вимірюваним параметром для визначення резонансної частоти [42]. Прикладання електричної напруги до кінців вдвоє перетворювача-перетворювача генерує механічне напруження через зворотний п'єзоелектричний ефект, створюючи таким чином механічну хвилю на поверхні газового датчика SAW. Цей зв'язок описується рівнянням, яке поєднує швидкість акустичної хвилі (v_{ray}) з резонансною частотою (f_r) та ширина елементарної комірки (λ):

$$v_{ray} = \lambda \cdot f_r \quad (2.12)$$

Щоб скористатися періодичними та геометричними умовами, частоти, що нас цікавлять, повинні відповідати гармонікам ширини елементарної комірки (λ) у 2D-моделі. Цей метод, у поєднанні зі швидкістю хвилі Релея п'єзоелектричної підкладки, дозволяє оцінити резонансну частоту цілі, яка в нашому випадку розраховується як $f_{r0} = 850$ МГц. Ці дані можна використовувати у вирішувачі власних частот для полегшення ідентифікації резонансних частот, близьких до цієї оцінки.

У датчиках поверхневих акустичних хвиль (SAW) виявлення газу базується на принципі, що характеристики поширення хвиль Релея, такі як фазова швидкість та резонансна частота, чутливі до змін маси та механічних властивостей на поверхні п'єзоелектричної підкладки. Коли газ, такий як CO₂, поглинається поверхневим покриттям (наприклад,

полієфірїмідом, PEI), ефективна масова густина чутливого шару збільшується, тим самим змінюючи швидкість хвилі та зміщуючи резонансну частоту датчика. Це зміщення служить вимірюваним показником присутності та концентрації газу. Для моделювання цього ефекту поглинання CO₂ шаром PEI розглядається як локальна модифікація густини. Ефективна густина плівки, ρ_{abs} , виражається як:

$$\rho_{abs} = \rho_{PEI} + \delta \cdot \rho_{CO_2} \quad (2.13)$$

де ρ_{PEI} – власна густина PEI, а ρ_{CO_2} являє собою внесок щільності від поглиненого CO₂. Коефіцієнт δ визначається як:

$$\delta \begin{cases} 0 & \text{Absence de CO}_2 \\ 1 & \text{Absorption de CO}_2 \end{cases} \quad (2.14)$$

За атмосферного тиску та температури густина поглиненого CO₂ у матриці PEI розраховується з використанням модифікованої форми закону ідеального газу, що включає коефіцієнт розподілу між повітрям та PEI:

$$\rho_{CO_2} = K \cdot M(\text{CO}_2) \cdot c \quad (2.15)$$

з:

$$c = \frac{c_0 \cdot P}{R \cdot T} \quad (2.16)$$

де P – тиск навколишнього середовища, T – абсолютна температура, R – універсальна газова стала, M – молярна маса CO₂, c_0 – еталонна концентрація в ppm, а c – нормалізована концентрація газу в навколишньому повітрі. Параметр $K = 10\text{--}12$ представляє *air/PEI* коефіцієнт розподілу для CO₂, що характеризує спорідненість полімерного шару до молекул CO₂.

Ці зміни щільності безпосередньо впливають на швидкість хвилі в п'єзоелектричній підкладці, що робить систему дуже чутливою до незначних коливань концентрації CO₂. Отже, зсув резонансної частоти служить кількісним показником присутності газу.

У таблиці 2.2 наведено механічні та фізичні властивості матеріалів, що використовуються в моделі, включаючи поглинач PEI та мідні переплетені перетворювачі (IDT), обидва з яких є критично важливими для визначення поведінки поширення хвиль у датчику.

Таблиця 2.2 - Властивості матеріалів полієфіриміду (PEI) та міді (Cu)

Material	Poisson's Ratio (ν)	Young's Modulus (GPa)	Density (kg/m ³)
Polyetherimide (PEI)	0.4	3	1270
Copper (Cu)	0.34	120	8960

Такий підхід до моделювання забезпечує кількісний зв'язок між концентрацією газу та механічним навантаженням, що дозволяє прогнозувати та калібрувати реакцію датчика за різних умов навколишнього середовища.

2.6 Висновки до розділу

Проведені дослідження підкреслюють ефективність п'єзоелектричних матеріалів та технології поверхневих акустичних хвиль (SAW) у сферах механічного збору енергії та виявлення CO₂. Що стосується збору енергії, полімер PVDF продемонстрував кращі характеристики, ніж кераміка PZT 5-N, незважаючи на меншу генерацію струму. Ця перевага пов'язана з більшою механічною гнучкістю PVDF, що дозволяє більшу деформацію під навантаженням і, як наслідок, покращує електричну реакцію. Було показано, що зібрана електрична потужність збільшується пропорційно прикладеному напруженню, що підкреслює вирішальну роль геометричної оптимізації, зокрема збільшення ширини п'єзоелектричної підкладки, у максимізації перетворення енергії, особливо для PVDF.

Нелінійні ефекти також спостерігалися у відгуку жорсткішого матеріалу PZT 5-N, що свідчить про появу нелінійної динамічної поведінки в певних конфігураціях. Ці явища відкривають багатообіцяючі перспективи для розробки нового класу нелінійних п'єзоелектричних осциляторів та високопродуктивних нелінійних резонаторів. Проведені дослідження які зосереджені на нелінійному стрибковому резонансі в електронних схемах, забезпечують цінну теоретичну основу для поширення цих результатів на ширші архітектури пристроїв.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ

3.1 Відгук п'єзоелектричного генератора

Аналіз механічної поведінки стосовно електричних властивостей п'єзоелектричного генератора вимагає двох різних підходів. Перший – це дослідження в частотній області для визначення оптимального електричного навантаження. Другий – це аналіз у часовій області, що вивчає вплив швидкості зміни механічного напруження та розмірів, порівнюючи при цьому ефективність збору енергії керамічними матеріалами PVDF та PZT 5-N за однакових механічних та розмірних умов.

У таблиці 3.1 наведено значення відносної діелектричної проникності, п'єзоелектричного коефіцієнта та густини для PZT 5-N та PVDF.

Таблиця 3.1 - Властивості матеріалів PZT та PVDF

Material	ϵ_r^{33}	d_{33} (pC · N ⁻¹)	Density (kg/m ³)
PZT	1700	-593	7750
PVDF	7.6	33.8	1780

3.2 Оптимальний електричний заряд PZT 5-N та PVDF

На рисунку 3.1а представлено залежність п'єзоелектричної потужності як функції електричного навантаження для PZT 5-N. З цього рисунка видно, що значення аналітичного виразу для п'єзоелектричної потужності на частоті 90 Гц зростає експоненціально з електричним навантаженням R , доки не досягне максимуму, де нахил зміни електричної потужності відносно навантаження прагне до 0. У цій точці електрична потужність досягає максимального значення близько 0,45 мВт для електричного навантаження 1 МОм.

Аналогічно, це значення електричної потужності зменшується зі збільшенням частоти, як показано на рисунку 3.1 а, б, які ілюструють кореляцію між частотою коливань та електричним навантаженням, підключеним до п'єзоелектричного елемента. Ця кореляція показує, що значення електричного навантаження зменшується зі збільшенням частоти

коливань, що узгоджується з аналітичним виразом, представленим у рівнянні (2.5) та інших дослідженнях.

На рисунку 3.1с показано числову потужність PZT-5Н як функцію електричного навантаження для частоти 90 Гц.

Ці результати показують, що значення електричної потужності зростає так само, як і аналітичне значення, від 0 до значення, що перевищує 0,45 мВт, для оптимального навантаження 1 МОм. Числові та аналітичні результати демонструють дуже добру узгодженість для PZT-5Н.

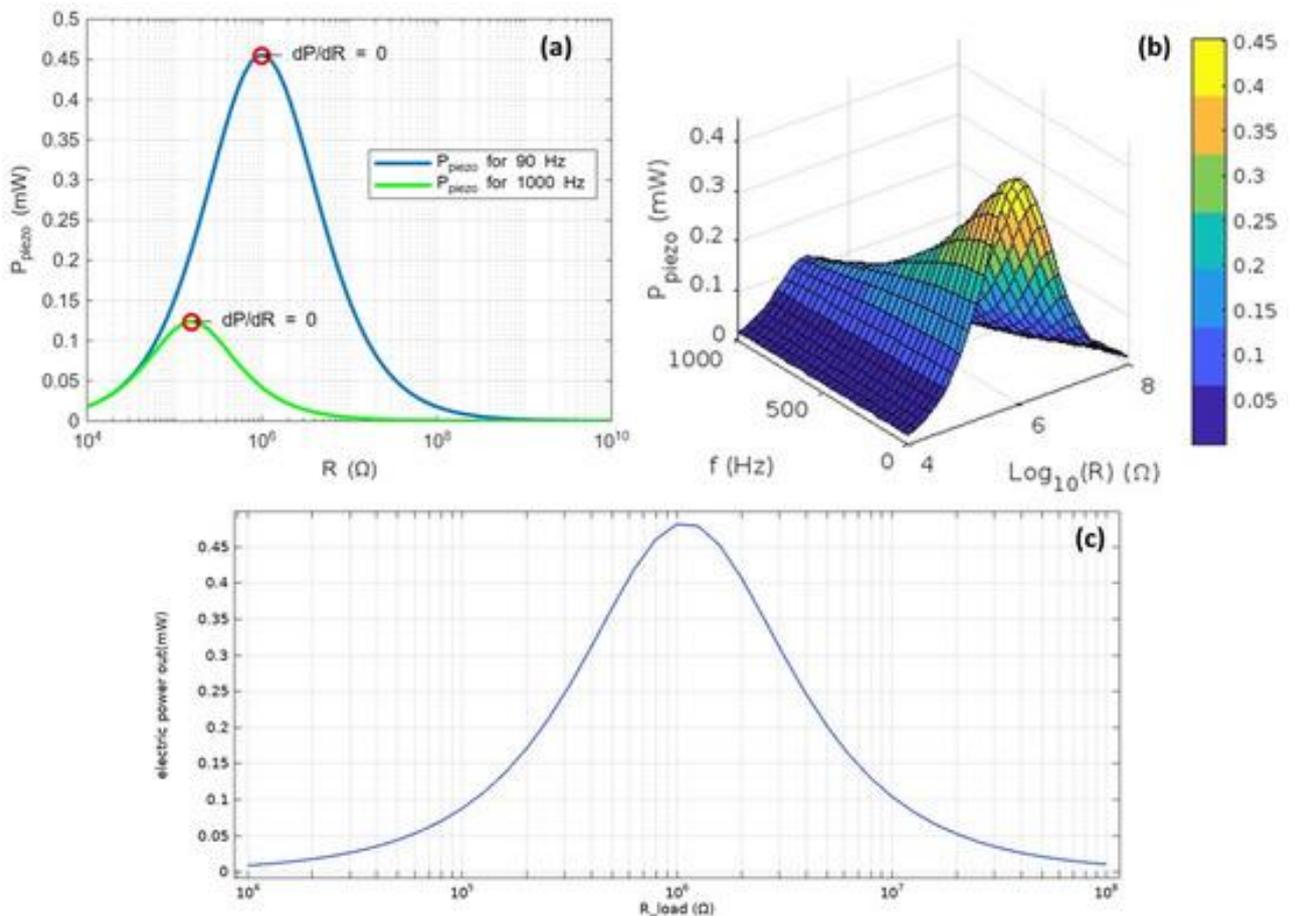


Рисунок 3.1 – Зібрана електрична потужність PZT-5Н: (а) Аналітична потужність від навантаження при 90 Гц, (б) Аналітична потужність від навантаження та частоти, (с) Числова потужність від навантаження при 90 Гц

На рисунку 3.2ба показано залежність п'єзоелектричної потужності від електричного навантаження для PVDF. Він демонструє, що аналітичний вираз для п'єзоелектричної потужності на частоті 110 Гц експоненціально зростає з електричним навантаженням R , доки не досягне максимуму.

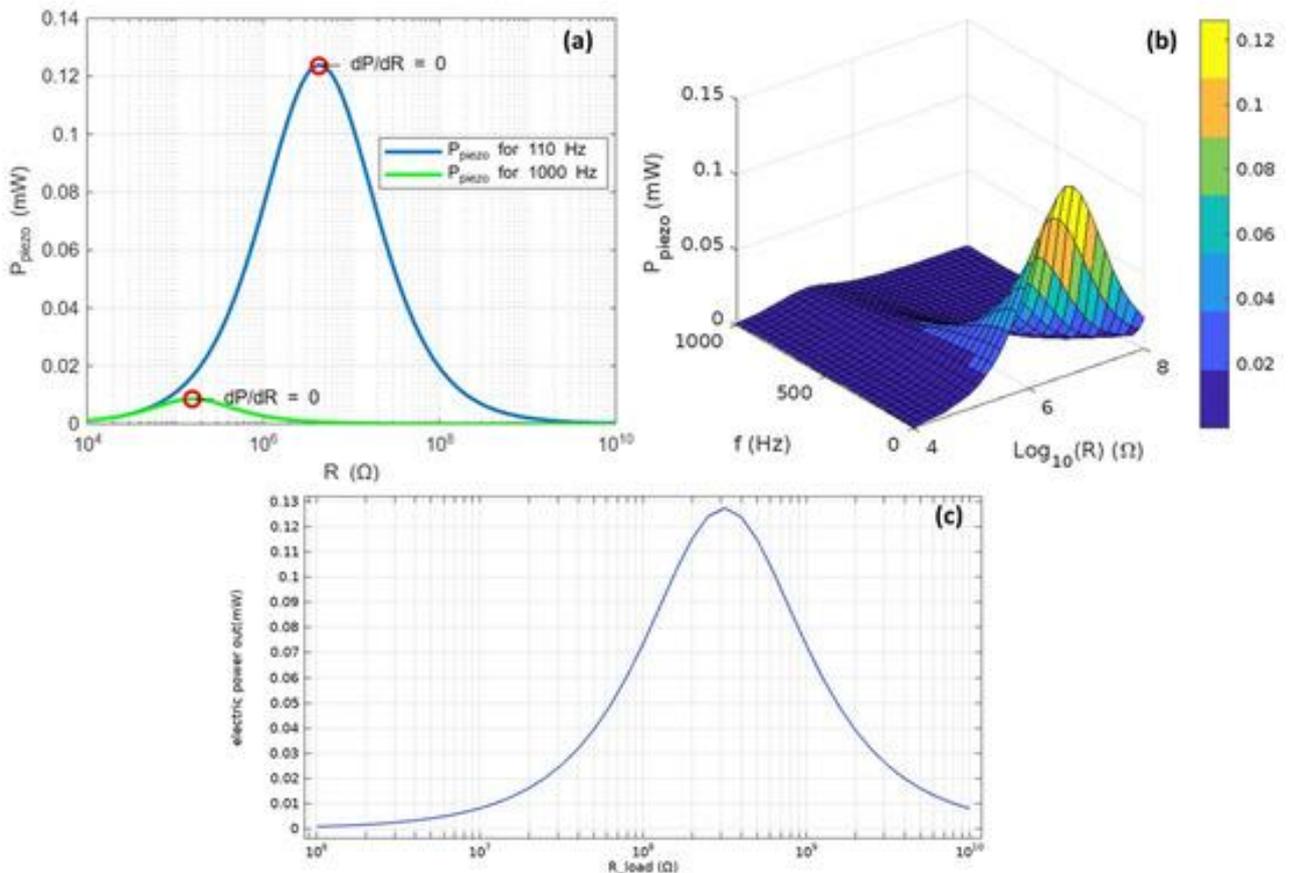


Рисунок 3.2 – Порівняння зібраної електричної потужності: (а) Аналітична потужність PZT-5H порівняно з навантаженням при 110 Гц, (б) Аналітична потужність PVDF порівняно з навантаженням та частотою, (с) Числова потужність PZT-5H порівняно з навантаженням при 110 Гц

У цій точці нахил зміни потужності відносно навантаження наближається до нуля, а електрична потужність досягає максимального значення приблизно 0,12 мВт для електричного навантаження 3,1 МОм. Аналогічно, це значення електричної потужності зменшується зі збільшенням частоти, як показано на рисунку 3.2 а, б, що підкреслює кореляцію між частотою вібрацій та електричним навантаженням, підключеним до PVDF.

Ця кореляція показує, що електричне навантаження зменшується зі збільшенням частоти коливань, що відповідає аналітичному виразу в рівнянні (2.5).

На рисунку 3.2с представлено числову потужність PVDF як функцію електричного навантаження для частоти 110 Гц. Ці результати показують, що електрична потужність має тенденцію, подібну до аналітичного значення, збільшуючись від 0 до значення понад 0,12 мВт для

оптимального навантаження 3,1 МОм. Числові та аналітичні результати для PVDF демонструють дуже добру узгодженість.

3.3 Моделювання впливу гнучкості матеріалу на електричну реакцію

Порівняння гнучкості між PVDF та PZT 5-H виявляє помітні відмінності в їхній механічній поведінці. Гнучкість PVDF, яка оцінюється в діапазоні від $0,25 \text{ ГПа}^{-1}$ до $0,5 \text{ ГПа}^{-1}$ [64, 65], приблизно в 12-36 разів вища, ніж у PZT 5-H, гнучкість якого коливається від $0,014 \text{ ГПа}^{-1}$ до $0,02 \text{ ГПа}^{-1}$. Ця різниця головним чином зумовлена полімерною та гнучкою природою PVDF, що забезпечує йому високу деформаційну здатність під напругою, на відміну від PZT 5-H, більш жорсткого керамічного матеріалу. Тому PVDF краще підходить для застосувань, що вимагають більшої гнучкості, тоді як PZT 5-H більше підходить для середовищ, де жорсткість є важливою.

Результати щодо синусоїдального механічного збудження $P(t)$, з амплітудою 1 МПа, що прикладаються до рухомої частини генератора, показують, що деформації, що викликаються в п'єзоелектричному матеріалі, змінюються з часом, генеруючи електричну реакцію (див. Рисунок 3.3).

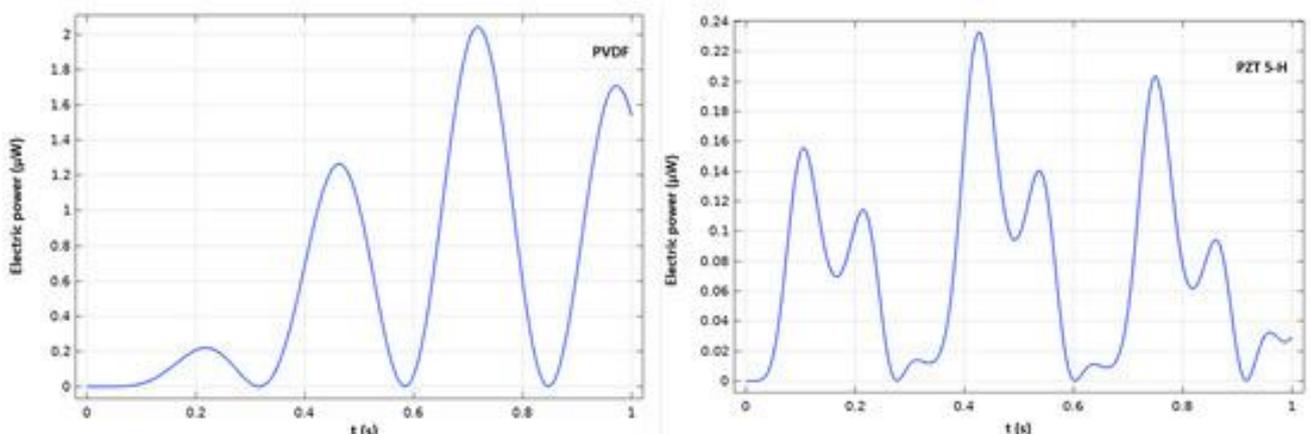


Рисунок 3.3 – Електрична потужність як функція часу

Сила струму, що протікає через оптимальне навантаження, дозволяє розрахувати миттєву електричну потужність (див. Рисунок 3.3), яка змінюється пропорційно квадрату механічного збудження. Потужність, що збирається PVDF, більша, ніж у PZT 5-H (див. Рисунок 3.3). Ця різниця головним чином зумовлена вищим оптимальним навантаженням PVDF, що підвищує його вихідну електричну потужність.

За тієї ж швидкості зміни механічного напруження (0,1 МПа/с) (див. Рисунок 3.3), потужність, отримана PVDF, перевищує потужність PZT 5-H, незважаючи на те, що останній має вищий п'єзоелектричний коефіцієнт. Це можна пояснити більшою гнучкістю PVDF, що дозволяє виконувати більші деформації та, як наслідок, сильнішу електричну реакцію.

3.4 Моделювання впливу механічного збудження на електричну реакцію

Для аналізу впливу амплітуди механічного збудження на електричну реакцію матеріалів, на рисунках 3.4 а, б показано нормалізовані значення сили струму для (а) PZT та (б) PVDF при синусоїдальному механічному збудженні з різною амплітудою. Ці результати підкреслюють прямий зв'язок між амплітудою прикладеного механічного напруження та миттєвою зібраною енергією. Ця кореляція підтверджується числовим моделюванням на рисунку 3.4 с, d, що ілюструє відповідно для (с) PZT та (d) PVDF зміну електричної потужності як функцію часу та амплітуди механічного збудження. Аналіз результатів виявляє різну поведінку між двома досліджуваними матеріалами. Зокрема, гнучкість PVDF суттєво впливає на його електричну реакцію (рисунок 3.4 d): еволюція електричного струму тісно пов'язана зі зміною прикладеного механічного напруження, незалежно від його амплітуди. Ця поведінка контрастує з тією, що спостерігається для PZT-5H (рисунок 3.4 d), вища жорсткість якого змінює електричну реакцію залежно від амплітуди механічного збудження.

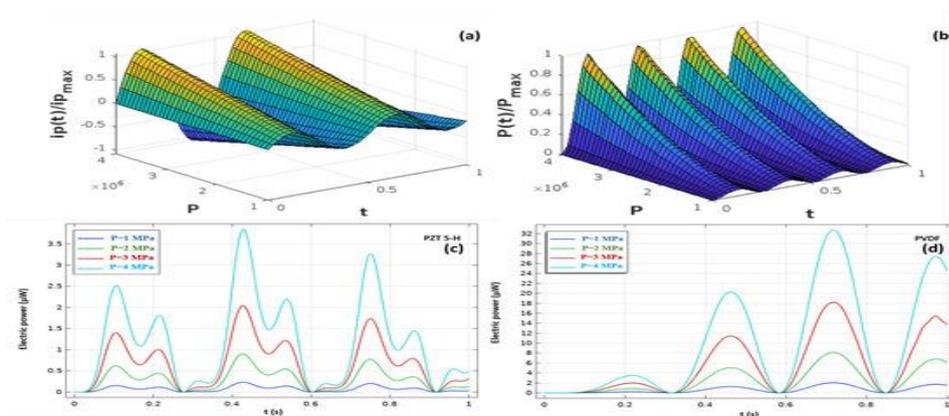


Рисунок 3.4 – Електрична реакція PZT та PVDF, що піддаються синусоїдальному механічному збудженню: (а, б) зміна нормалізованого струму; (с, d) зміна електричної потужності як функція часу та амплітуди напруження

Крім того, на рисунках 3.4 с, d показано зміну зібраної електричної потужності як функції амплітуди механічного напруження. Для обох матеріалів відновлена потужність зростає пропорційно амплітуді прикладеного напруження. Зокрема, для PVDF зібрана потужність зростає від 2 до 32 мкВт зі збільшенням амплітуди механічного напруження від 1 до 4 МПа. Однак потужність, що розсіюється ефектом Джоуля при оптимальному навантаженні для PZT-5Н, є нижчою (3,9 мкВт). Це явище пояснюється вищим оптимальним значенням навантаження PVDF, що забезпечує ефективніше перетворення механічної енергії в електричну.

3.5 Моделювання ширини п'єзоелектричної пластини (wНерозбірливо) Вплив на електричну реакцію

Було проаналізовано вплив розмірів п'єзоелектричної підкладки на збирання енергії (рисунок 3.5). Числові результати показують, що збільшення ширини (wНерозбірливо) п'єзоелектричного матеріалу впливає на електричну характеристику по-різному залежно від типу матеріалу. Для PZT-5Н (рис. 3.5a) збільшення ширини з 1 до 5 см викликає незначне зростання зібраної потужності з 0,22 до 0,24 мкВт. Навпаки, для PVDF (рис. 3.5b) розширення підкладки має набагато більш значний вплив: зібрана потужність досягає максимуму 3,39 мкВт при ширині 5 см.

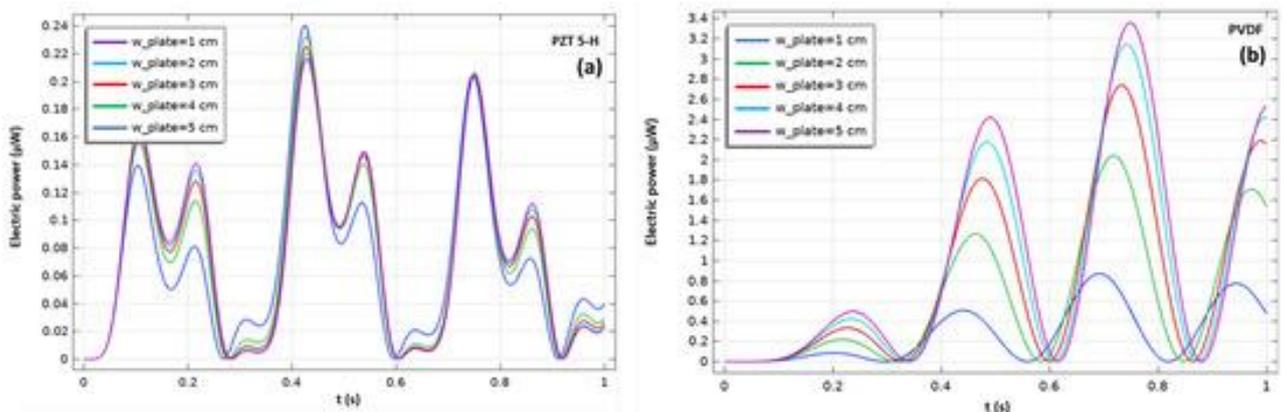


Рисунок 3.5 – Миттєва електрична потужність для п'єзоелектричних матеріалів різної ширини: (а) електрична потужність для PZT, (б) електрична потужність для PVDF

Таку різницю в поведінці можна пояснити внутрішньою жорсткістю матеріалів. PZT-5Н, жорсткий керамічний матеріал, має гнучкість порядку від 0,014 до 0,02 ГПа⁻¹, тобто приблизно в 12-36 разів менш гнучкий, ніж PVDF, гнучкий полімер з гнучкістю від 0,25 до 0,5 ГПа⁻¹. Ця жорсткість

зменшує амплітуду механічних деформацій для заданого збудження, що обмежує електромеханічне перетворення у випадку PZT-5H.

Крім того, нелінійні ефекти особливо помітні у реакції PZT-5H на збільшення ширини. Ці ефекти можуть бути результатом складної взаємодії між внутрішніми механічними напруженнями, жорсткістю матеріалу та граничними умовами, які обмежують ефективність збору енергії за межами певної геометрії. Ця нелінійна поведінка, хоча тут і дискретна, відкриває шлях для подальших досліджень, зокрема, у розробці передових нелінійних пристроїв, таких як:

- нелінійні осцилятори, що використовують ці особливі механоелектричні властивості.
- високопродуктивні п'єзоелектричні резонатори.

Проведені дослідження [47] щодо нелінійного стрибкового резонансу в електронних схемах забезпечує відповідну теоретичну основу, яка може підтримати поширення наших результатів на інші конфігурації пристроїв.

3.6 Моделювання вимірювань датчика CO₂

Дослідження поглинання газу CO₂ за допомогою PEI проводиться у два окремі етапи. По-перше, ми аналізуємо резонансну частотну характеристику як функцію змін концентрації газу в повітрі при збереженні постійних зовнішніх та геометричних умов. По-друге, ми досліджуємо вплив збільшення товщини плівки PEI, а також вплив змін тиску та температури на частотну характеристику нашого датчика поверхневих акустичних хвиль.

Перш ніж продовжити, важливо зазначити, що актуатор (LiTaO₃) піддається дії електричного потенціалу 10×10^{-12} В з частотою 800 МГц. На рисунку 3.6а ілюструються лінії електричного поля всередині LiTaO₃. На цьому ж рисунку також чітко показано поверхневі акустичні хвилі, що генеруються на LiTaO₃.

Крім того, на рисунку 3.6b показано просторовий розподіл електричного потенціалу, що прикладається взаємопов'язаними перетворювачами (ВШП), який відповідає синусоїдальній діаграмі, разом з лініями електричного поля всередині актуатора. Цей розподіл є вирішальним для генерації поверхневих акустичних хвиль на підкладці, створюючи стаціонарні коливання всередині п'єзоелектричного матеріалу. Ці коливання поширюються зі швидкістю Релея (v_r а $u = 3400$ м/с).

На швидкість Релея впливає кілька факторів, таких як зміна маси та умови навколишнього середовища, які будуть детально проаналізовані в наступних розділах.

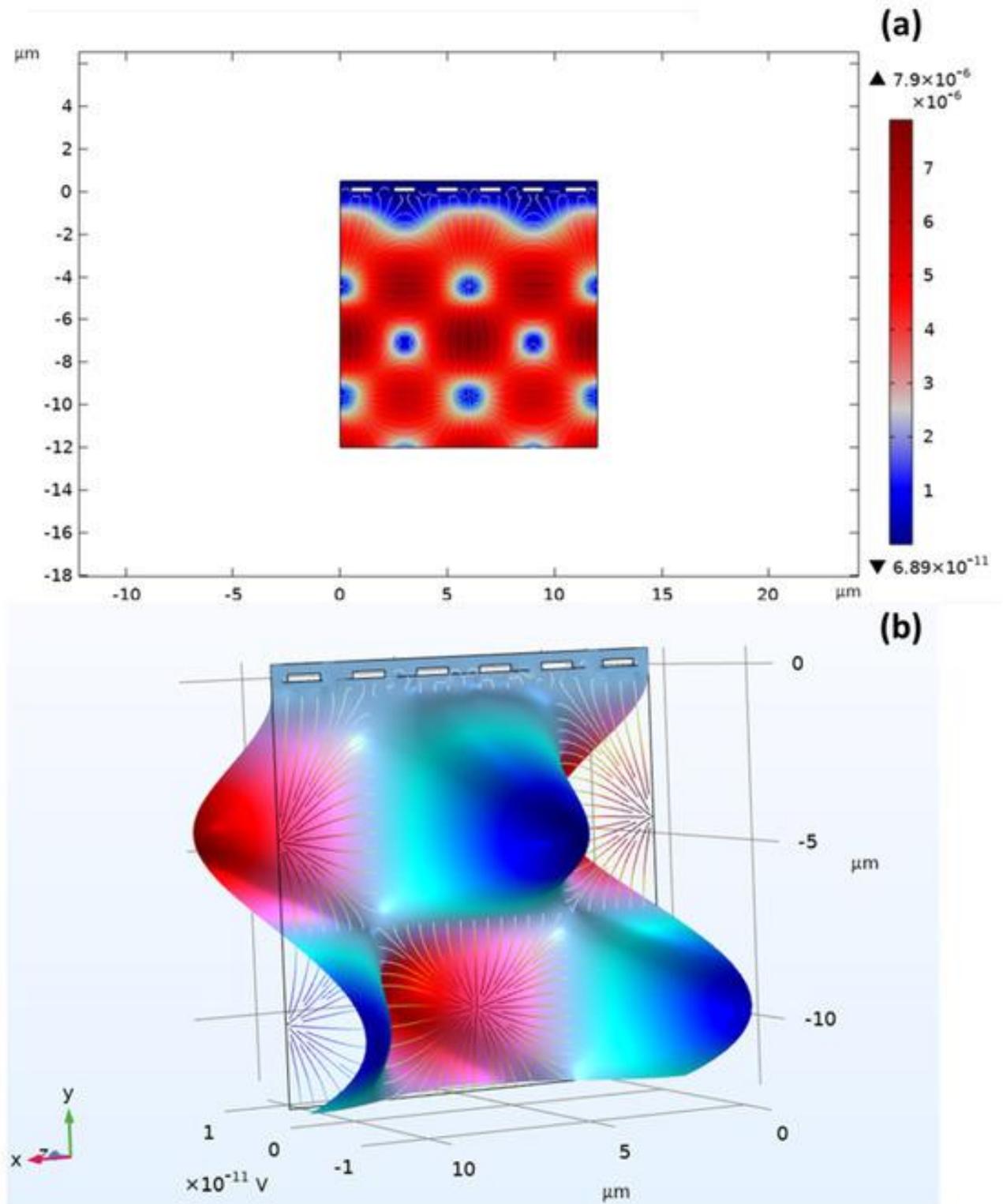


Рисунок 3.6 – Розподіл ліній електричного поля на 2D-моделі для першої резонансної частоти

Аналіз реакції SAW на зміну концентрації

За відсутності вуглекислого газу ($n_0 = 0$), щільність абсорбенту ідентична щільності полієфіриміду (PEI), а перша частота підтримується на рівні 767,38 МГц.

Поглинання 10 частин на мільйон (ppm) газоподібного CO₂ викликає збільшення щільності абсорбенту при постійному об'ємі, як описано в рівнянні (2.15), що призводить до збільшення маси PEI відповідно до рівняння (2.12). Ця зміна відображається у зміщенні резонансної частоти на 5,62 Гц (див. Таблицю 3.2). З одного боку, зміна резонансної частоти при концентрації 10 ppm підкреслює чутливість методу поверхневої акустичної хвилі (SAW) до низьких концентрацій цільових газів, таких як CO₂. З іншого боку, з рисунка 3.7а видно, що зміщення першої резонансної частоти лінійно зростає зі збільшенням концентрації газу за атмосферного тиску та за температури навколишнього середовища, що узгоджується з рівнянням (2.1).

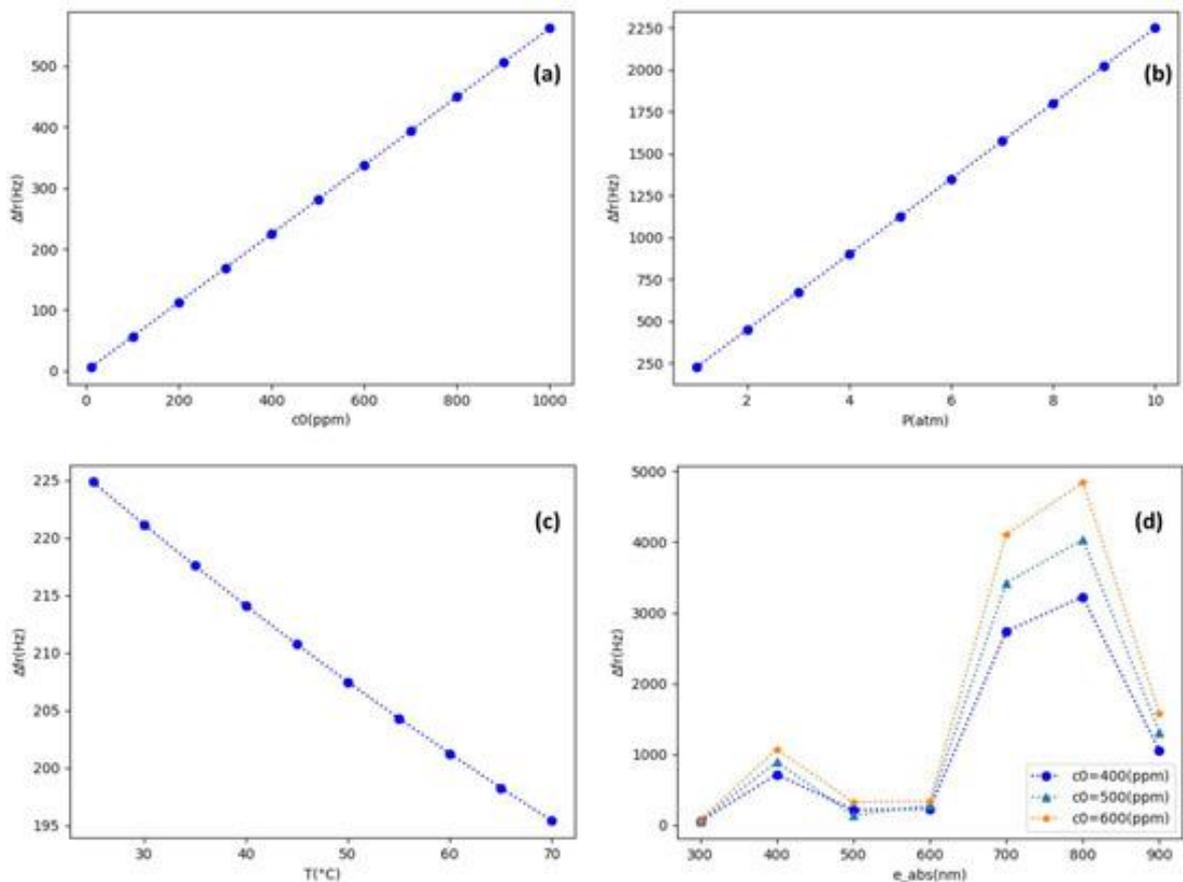


Рисунок 3.7 – Зміна резонансної частоти: (а) як функція концентрації CO₂ ; (б) як функція тиску газу; (с) як функція температури газу; (д) як функція товщини адсорбенту

Таблиця 3.2 - Перша резонансна частота як функція концентрації газоподібного CO₂ за тиску 1 атм, температури 25 °C та товщини плівки PEI 500 нм

c_0 (ppm)	f_r av (Hz)	f_r app (Hz)	Δf_r (Hz)
10	767,382,904.06	767,382,898.44	5.62
100	767,382,904.06	767,382,847.85	56.21
200	767,382,904.06	767,382,791.64	112.43
300	767,382,904.06	767,382,735.42	168.64
400	767,382,904.06	767,382,679.21	224.85
500	767,382,904.06	767,382,622.99	281.07
600	767,382,904.06	767,382,566.78	337.29
700	767,382,904.06	767,382,510.56	393.50
800	767,382,904.06	767,382,454.34	449.72
900	767,382,904.06	767,382,398.12	505.94
1000	767,382,904.06	767,382,341.91	562.16

Аналіз реакції SAW на геометричні та зовнішні зміни

Реакція SAW на зміни товщини (e_{abs})

Було проведено оцінку кореляції між зміною товщини поглинача (PEI) та концентрацією CO₂. На рисунку 3.7d показано зміщення резонансної частоти для різних товщин поглинача. З цього рисунка видно, що зміна резонансної частоти як функції товщини не є регулярною для заданої концентрації CO₂, коливаючись від кількох десятків до кількох кілогерц. Крім того, збільшення концентрації значно посилює ці коливання резонансної частоти.

У таблиці 3.3 наведено числові значення зміни резонансної частоти як функції товщини та концентрації.

Таблиця 3.3 - Зміна резонансної частоти як функція товщини плівки PEI за тиску 1 атм та температури 25 °C

e_{abs} (nm)	Δf_r (Hz) Pour 400	Δf_r (Hz) Pour 500	Δf_r (Hz) Pour 600
300	48.46	60.57	72.68
400	714.33	892.91	1071.5
500	216.62	138.38	324.92
600	224.85	281.06	337.28
700	2738.66	3423.36	4108.05
800	3228.77	4036.00	4843.25
900	1052.94	1316.18	1579.42

Реакція SAW на зовнішні зміни

Згідно з рівнянням (2.15), об'ємна концентрація газу залежить від його тиску та температури. Таким чином, збільшення тиску газу призводить до збільшення зсуву резонансної частоти, тоді як збільшення температури призводить до зменшення об'ємної концентрації CO₂, тим самим зменшуючи перший зсув резонансної частоти.

Ці властивості ілюструються результатами нашого дослідження, як показано на рисунку 3.7b, де зсув резонансної частоти змінюється від 224,85 до 2249,08 Гц зі збільшенням тиску газу від 1 до 10 атм (рисунок 3.7b). Аналогічно, підвищення температури від 25 до 70 °C (рисунок 3.7c) призводить до зменшення зсуву резонансної частоти з 224,85 до 195,37 Гц.

3.7 Висновки до розділу

Проведені дослідження демонструє високу чутливість технології SAW для виявлення низьких концентрацій CO₂. Було зафіксовано лінійне зміщення резонансної частоти зі збільшенням концентрації CO₂, з можливістю виявлення до 10 ppm. Крім того, було підтверджено вплив параметрів навколишнього середовища: вищий тиск посилює зміщення частоти, тоді як вища температура послаблює його, що, безумовно, пов'язано зі зниженням об'ємної щільності молекул CO₂.

Підсумовуючи, результати не лише підтверджують високу продуктивність та чутливість досліджуваних матеріалів і технологій, але й підкреслюють їхній значний потенціал для інтеграції в передові програми, від енергетичних автономних систем до зондування навколишнього середовища. Подальша робота буде зосереджена на вдосконаленні цих технологій, використанні їхніх нелінійних характеристик та адаптації їх до різних умов навколишнього середовища та вимог конкретного застосування.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Технологічний аудит розробленого радіовимірювального перетворювача концентрації газу (далі – розробки)

Як відомо, за останні десятиліття індустріалізація зазнала низку швидких ітерацій та модернізації, що збільшило викиди отруйних та небезпечних газів, які негативно впливають на якість повітря і поставили під загрозу здоров'я людини. Це спричинило широке використання різних видів газових сенсорів в таких галузях, як медична діагностика, контролювання харчових продуктів, сільське господарство, хімічне виробництво, проблеми безпеки тощо, а також в галузях, пов'язаних з використанням горючих і вибухонебезпечних матеріалів.

Тому метою виконаної магістерської кваліфікаційної роботи стало покращення метрологічних характеристик та розробка радіовимірювальних перетворювачів газу, які б відповідали вимогам часу. При цьому об'єктом дослідження став процес перетворення концентрації газу у цифровий сигнал за допомогою використання газочутливих елементів на основі застосування перетворювачів концентрації газу (ПАХ).

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі було розв'язано такі задачі: а) проаналізовано існуючі перетворювачі концентрації газу та обґрунтовано переваги сенсорів газу із In_2O_3 ; б) розглянуто принципи роботи та побудови газочутливих перетворювачів; в) проведено моделювання впливу газу на сенсори газу; г) проведено експериментальне дослідження.

В результаті проведених досліджень було підтверджено ефективність п'єзоелектричних матеріалів та технології поверхневих акустичних хвиль (SAW) у сферах механічного збору енергії та виявлення CO_2 .

Для проведення технологічного аудиту розробленого радіовимірювального перетворювача концентрації газу та встановлення можливості його комерційного використання було запрошено 3-х дуже відомих і шанованих у ВНТУ експертів: д.т.н., професора Семенова А.О., д.т.н. професора Воловика А.Ю. та к.т.н., доцента Савицького А.Ю. Проведення технологічного аудиту розробки було зроблено за критеріями, які наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою: 0-1-2-3-4)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджується експертними висновками	Концепція підтверджується розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

	0	1	2	3	4
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження таблиці 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---	--	---	--	---

При проведенні технологічного аудиту запрошені експерти виставили бальні оцінки за 12-ю критеріями, які зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати технологічного аудиту нашої розробки

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Семенов А.О.	Воловик А.Ю.	Савицький А.Ю.
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	3	3
2	3	4	3
3	4	3	4
4	4	3	3
5	3	3	3
6	3	4	3
7	3	3	3
8	3	4	3
9	4	3	4
10	4	4	3
11	3	3	4
12	3	4	3
Сума балів	СБ ₁ = 41	СБ ₂ = 40	СБ ₃ = 39

Середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить:

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{41+40+39}{3} = \frac{120}{3} = 40,00$
--	--

Керуючись рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.3, визначимо технічний рівень та комерційний потенціал нашої розробки.

Таблиця 4.3 – Потенційні технічні рівні та комерційний потенціал розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Технічний рівень та комерційний потенціал розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили запрошені експерти, дорівнює 40,00 балів (із 48-ми балів), то можна зробити висновок, що розроблений радіовимірювальний перетворювач концентрації газу має технічний рівень «вище середнього» і високу вірогідність його комерційного використання.

4.2 Розрахунок витрат на розроблення радіовимірювального перетворювача концентрації газу

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи були зроблені такі основні витрати [48].

4.2.1 Основна заробітна плата Z_o розробників (дослідників), інших фахівців тощо, яку можна розрахувати за формулою (4.1):

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн.)}, \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн. У 2025 році величини окладів розробників коливалися в межах (8000...38000) грн/місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; прийmemo $T_p = 22$ дні;

t – число робочих днів роботи розробників, дослідників, фахівців тощо.

Зроблені розрахунки основної заробітної плати розробників, дослідників, фахівців тощо зведено в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників (округлено)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, (грн.)	Примітка
1. Науковий керівник магістерської кваліфікаційної роботи	33500	= 1522,72 ≈ ≈1523	20 годин	1523/6×20 = 5076,67≈ ≈5077	При 6-ти годинном у робочому дні дня керівника та консультанта з економічної частини
2. Здобувач-магістрант	8000	= 363,64 ≈ ≈364	74 дні	= 26936	
3. Технічний консультант (спеціаліст по газу)	30000	=1363,64≈ ≈1364	2 дні	= 2728	
3. Консультант з економічної частини	20600	= 936,36≈ ≈ 937	1,5 години	937/6×1,5 = = 234,25 ≈ ≈ 235 грн	
Всього				$Z_o = 34976$ (грн.)	

Примітка. За заробітну плату магістранта прийmemo мінімальну заробітну плату в країні

4.2.2 Додаткова заробітна плата Z_d розробників розраховується за формулою:

$$Z_d = (0,1...0,12) \cdot Z_o. \quad (4.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,109 \times 34976 = 3812,38 \approx 3813 \text{ (грн.)}.$$

4.2.3 Нарахування на заробітну плату $НАР_{зп}$ розробників, дослідників, інших фахівців тощо розраховуються за формулою:

$$НАР_{зп} = (З_о + З_д) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.3)$$

де $\beta = 22\%$ – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне

страхування. В Україні в 2025 році $\beta = 22\%$.

Для нашого випадку отримаємо:

$$НАР_{зп} = (34976 + 3813) \times 0,22 = 8533,58 \approx 8534 \text{ (грн.)}$$

4.2.4 Амортизація A основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які були використані під час виконання роботи, розраховується за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot N_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ (грн.)}, \quad (4.4)$$

де $Ц$ – загальна балансова вартість основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які використовувалися під час виконання роботи, (грн.);

N_a – річна норма амортизаційних відрахувань, %; $N_a = (2,5...25)\%$;

T – термін, використання кожного виду основних засобів, місяці.

Зроблені нами розрахунки зведемо у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань (округлено)

Найменування основних засобів	Балансова вартість, (грн.)	Норма амортизації, %	Термін використання, місяці	Величина амортизаційних відрахувань, (грн.)
1	2	3	4	5
1. Основні засоби, обладнання, комп'ютери тощо	120000	24,0	3,1 (при 90% використанні)	6696
2. Відповідні приміщення кафедри, факультету, університету	90000	2,85	3,1 (при 75% використанні)	496,96 \approx 497

Продовження таблиці 4.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань (округлено)

1	2	3	4	5
3. Додаткові спеціалізовані (газові) лабораторії	100000	3,00	3,1 (при 10% використанні)	77,50 ≈ 78
Всього				A = 7271

4.2.5 Витрати на матеріали М розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot \Pi_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot \Pi_b \text{ (грн.)}, \quad (4.5)$$

де H_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг; Π_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн/кг; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; B_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг; Π_b – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг; n – кількість видів матеріалів.

4.2.6 Витрати на комплектуючі К розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot \Pi_i \cdot K_i \text{ (грн.)}, \quad (4.6)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; Π_i – ціна комплектуючих i -го виду, (грн.); K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Загальна вартість основних матеріалів та комплектуючих, які були використані під час виконання цієї роботи, становить приблизно 4000 (грн.).

4.2.7 Витрати на силову електроенергію V_e , що була використана при виконанні цієї магістерської роботи, розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{B \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \quad (4.7)$$

де V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2025 р. $V \approx 6,0$ грн/кВт;

P – установлена потужність обладнання, кВт; $P = 1,85$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Прийmemo, що $\Phi = 185$ годин;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт використання потужності; $K_{\text{п}} < 1 = 0,75$.

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт корисної дії, $K_{\text{д}} = 0,63$.

Тоді витрати на силову електроенергію складуть:

$$V_e = \frac{V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_{\text{п}}}{K_{\text{д}}} = \frac{6,0 \cdot 1,85 \cdot 185 \cdot 0,75}{0,63} = 2444,64 \approx 2445 \text{ (грн.)}.$$

4.2.8 Інші витрати $V_{\text{ін}}$ (опалення, освітлення, утримання приміщень тощо) розраховуються як (100...300)% від основної заробітної плати розробників, дослідників, інших фахівців тощо, тобто:

$$V_{\text{ін}} = K_{\text{ін}} \times Z_o = (1..3) \times Z_o. \quad (4.8)$$

Прийнявши $K_{\text{ін}} = 0,85$, отримаємо:

$$V_{\text{ін}} = 0,85 \times 34976 = 29729,60 \approx 29730 \text{ (грн.)}.$$

4.2.9 Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, що їх зробив безпосередньо магістрант при виконанні цієї магістерської роботи – V .

$$V = 34976 + 3813 + 8534 + 7271 + 4000 + 2445 + 29730 = 90769 \text{ (грн.)}.$$

4.2.10 Загальні витрати на остаточне завершення магістерської роботи та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$3V = \frac{V}{\beta}, \quad (4.9)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап виконання цієї роботи на шляху до її можливого впровадження.

Для нашого випадку доцільно прийняти, що $\beta \approx 0,9$ [48].

$$\text{Тоді: } 3V = \frac{90769}{0,9} = 100854,44 \text{ (грн.) або приблизно 101 тисяча (грн.)}.$$

Тобто загальні витрати на остаточне завершення нашої роботи та оформлення її результатів становлять приблизно 101 тисячу (грн.).

4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки

Аналіз місткості ринку показує, що потенційний попит на розроблений нами радіовимірювальний перетворювач концентрації газу оцінюється в межах внутрішнього ринку України на рівні 20 тисяч одиниць.

Оскільки технічні та економічні показники нашої розробки є значно кращими, ніж у аналогів, то вона буде користуватися підвищеним попитом на ринку принаймні протягом 3-х років після впровадження. Тобто наша розробка може бути впроваджена з 1 січня 2026 року, а її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го та 2028-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку складає по роках:

1-й рік після впровадження (2026 р.) – приблизно на + $\Delta 500$ шт.;

2-й рік після впровадження (2027 р.) – приблизно на + $\Delta 1000$ шт.;

3-й рік після впровадження (2028 р.) – приблизно на + $\Delta 1500$ шт.

Аналіз ринку також показав, що середня ціна аналогічного перетворювача коштує приблизно 630 (грн.). У зв'язку з тим, що наша розробка має значно кращі технічні і експлуатаційні характеристики, ми можемо реалізовувати її на ринку дещо дорожче, наприклад, за 725 (грн.), тобто на $(725 - 630) = 95$ (грн.) дорожче.

Тоді можливе збільшення чистого прибутку $\Delta\Pi_i$, що його може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки становитиме [48]:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right), \quad (4.10)$$

де ΔC_o – збільшення ціни нової розробки, тобто $\Delta C_o = 725 - 630 = 95$ (грн.);

N – обсяг діяльності (кількість замовників) у році до впровадження результатів розробки; $N \approx 20000$ шт.;

ΔN – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів розробки по роках (2026, 2027 та 2028 роки) становитиме, відповідно: +500, +1000 та + 1500 шт.;

C_o – нова ціна реалізації радіовимірювального перетворювача концентрації газу; $C_o = 725$ (грн.);

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; $n = 3$ роки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість; $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати $\rho = (0,2...0,5)$; візьмемо $\rho = 0,5$;

ν – ставка податку на прибуток. У 2025 році $\nu = 18\%$.

Тоді можлива величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_1$ для потенційного інвестора протягом першого року від можливого впровадження нашої розробки (2026 р.) становитиме:

$$\Delta\Pi_1 = [95 \cdot 20 + 725 \cdot 0,5] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 772,99 \approx 773 \text{ тисячі (грн.)}.$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_2$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом другого (2027 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_2 = [95 \cdot 20 + 725 \cdot 1,0] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 896,84 \approx 897 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta\Pi_3$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом третього (2028 р.) року становитиме:

$$\Delta\Pi_3 = [95 \cdot 20 + 725 \cdot 1,5] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 1020,69 \approx 1021 \text{ тисячу (грн.)}.$$

Приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливої комерціалізації нашої розробки, буде:

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.11)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, грн;

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку $t = 3$ роки;

τ – ставка дисконтування (або рівень інфляції). Керуючись даними статистики за 2025 рік, прийємо ставку дисконтування $\tau = 0,135$ (13,5%);

t – період часу (в роках) від моменту початку розробки до моменту отримання можливих чистих прибутків (в кожному із років).

Тоді прогнозована приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження нашої розробки, складе:

$$\text{ПП} = \frac{773}{(1+0,135)^2} + \frac{897}{(1+0,135)^3} + \frac{1021}{(1+0,135)^4} \approx 600 + 614 + 615 = 1829 \text{ тисяч (грн.)}$$

Теперішня вартість інвестицій PV (або можлива вартість придбання нашої розробки інвестором для її комерціалізації): $PV = K \times V_{\text{заг}} = (1,0\dots5,0) \times V_{\text{заг}}$,

де $V_{\text{заг}} = 101$ тисяча грн (див. підрозділ 4.1).

Для нашого випадку прийємо, що: $K = 3,0$. Тоді отримаємо:

$$PV = (1,0\dots5,0) \times 101 = 3,0 \times 101 = 303,0 \text{ тисяч (грн.)}$$

Абсолютний економічний ефект для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки за три роки (2026, 2027, 2028) складе:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 1829 - 303 = 1526 \text{ тисяч (грн.)}$$

Тоді внутрішня дохідність E_B вкладених інвестицій (коштів) становитиме:

$$E_B = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (4.12)$$

де $E_{\text{абс}}$ – абсолютний ефект вкладених інвестицій; $E_{\text{абс}} = 1526$ тисяч (грн.);

PV –теперішня вартість початкових інвестицій $PV = 303$ тисячі (грн.);

$T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл розробки, роки.

$T_{\text{ж}} = 4$ роки (2025-й, 2026-й, 2027-й, 2028-й роки).

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_B = \sqrt[4]{1 + \frac{1526}{303}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 5,0363} - 1 = \sqrt[4]{6,0363} - 1 = 1,567 - 1 = 0,567 \approx 56,7\%$$

Мінімальна дохідність можливо вкладених інвестицій $\tau_{\text{мін}}$, яка є допустимою, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (4.13)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,10...0,18)$. Прийmemo, що $\tau = 15\%$.

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; $f = (0,05...0,30)$.

Прийmemo, що $f = 30\%$, тобто $f = 0,3$.

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,15 + 0,30 = 0,45 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 45\%.$$

Оскільки величина $E_b = 56,7\% > \tau_{\text{мін}} = 45\%$, то потенційний інвестор у принципі може бути зацікавлений комерціалізації нашої розробки.

Термін окупності коштів, вкладених потенційним інвестором у можливу комерціалізацію нашої розробки, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_b} = \frac{1}{0,567} \approx 1,76 \text{ років} < 3 \text{ років}, \quad (4.14)$$

що також свідчить про потенційну економічну доцільність комерціалізації розробленого нами радіовимірювального перетворювача концентрації газу.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю:

Показники	Задані у ІЗ	Досягнуті у магістерській роботі	Висновок
1. Витрати на розробку	В межах 100 тисяч (грн.)	≈ 101 тисяч (грн.)	Досягнуто
2. Абсолютний ефект від впровадження розробки, тисяч (грн.)	Не менше 1500 тисяч (грн.) (за три роки)	1526 тисяч (грн.) (при 13,5% інфляції)	Виконано
3. Внутрішня дохідність вкладених інвестицій (коштів), %	не менше 50,0%	56,7%	Виконано
4. Термін окупності інвестицій (коштів), роки	до 3-ти років	1,76 років	Виконано

Таким чином, основні економічні показники, досягнуті нами в розробленому радіовимірювальному перетворювачі концентрації газу, визначені у індивідуальному завданні, повністю виконані.

ВИСНОВКИ

У першому розділі представлено порівняльний аналіз сенсорів газу на основі In_2O_3 . Відмінна стабільність, низька вартість, висока чутливість та оксид індію (In_2O_3), напівпровідника на основі оксиду металу, були підтверджені в галузі газових датчиків. Звичайні газові датчики на основі In_2O_3 використовують прості та легкі у виготовленні резистивні компоненти як перетворювачі. Однак швидкий розвиток Інтернету речей висунув вищі вимоги до газових датчиків на основі оксидів металів, включаючи, перш за все, зниження робочих температур, покращення селективності та реалізацію інтегрованості. У відповідь на ці три основні проблеми, газові датчики на основі польових транзисторів (FET) викликали зростаючий інтерес протягом останнього десятиліття. Порівняно з іншими напівпровідниками на основі оксиду металу, In_2O_3 демонструє більшу концентрацію та рухливість носіїв заряду. Ця властивість є перевагою для виробництва польових транзисторів з винятковими електричними характеристиками, за умови, що струм у вимкненому стані контролюється на достатньо низькому рівні. У цьому огляді представлено значний прогрес, досягнутий у газових датчиках на основі польових транзисторів In_2O_3 за останні десять років, охоплюючи типові конструкції пристроїв, показники продуктивності газових датчиків, методи оптимізації та стратегії майбутнього розвитку на основі газових датчиків на основі польових транзисторів In_2O_3 .

В другому розділі проведені дослідження підкреслюють ефективність п'єзоелектричних матеріалів та технології поверхневих акустичних хвиль (SAW) у сферах механічного збору енергії та виявлення CO_2 . Що стосується збору енергії, полімер PVDF продемонстрував кращі характеристики, ніж кераміка PZT 5-H, незважаючи на меншу генерацію струму. Ця перевага пов'язана з більшою механічною гнучкістю PVDF, що дозволяє більшу деформацію під навантаженням і, як наслідок, покращує електричну реакцію. Було показано, що зібрана електрична потужність збільшується пропорційно прикладеному напруженню, що підкреслює вирішальну роль геометричної оптимізації, зокрема збільшення ширини п'єзоелектричної підкладки, у максимізації перетворення енергії, особливо для PVDF.

Нелінійні ефекти також спостерігалися у відгуку жорсткішого матеріалу PZT 5-H, що свідчить про появу нелінійної динамічної поведінки в певних конфігураціях. Ці явища відкривають багатообіцяючі

перспективи для розробки нового класу нелінійних п'єзоелектричних осциляторів та високопродуктивних нелінійних резонаторів. Проведені дослідження які зосереджені на нелінійному стрибковому резонансі в електронних схемах, забезпечують цінну теоретичну основу для поширення цих результатів на ширші архітектури пристроїв.

В третьому розділі проведено математичне моделювання яке демонструє високу чутливість технології SAW для виявлення низьких концентрацій CO₂. Було зафіксовано лінійне зміщення резонансної частоти зі збільшенням концентрації CO₂, з можливістю виявлення до 10 ppm. Крім того, було підтверджено вплив параметрів навколишнього середовища: вищий тиск посилює зміщення частоти, тоді як вища температура послаблює його, що, безумовно, пов'язано зі зниженням об'ємної щільності молекул CO₂.

Підсумовуючи, результати не лише підтверджують високу продуктивність та чутливість досліджуваних матеріалів і технологій, але й підкреслюють їхній значний потенціал для інтеграції в передові програми, від енергетичних автономних систем до зондування навколишнього середовища. Подальша робота буде зосереджена на вдосконаленні цих технологій, використанні їхніх нелінійних характеристик та адаптації їх до різних умов навколишнього середовища та вимог конкретного застосування.

В четвертому розділі в економічній частині проведено: технологічний аудит розробленого радіовимірювального перетворювача концентрації газу; розрахунок витрат на розроблення радіовимірювального перетворювача концентрації газу та розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. –303с. ISBN 966-7199-99-1.
 2. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Прокопова М.О. Сенсори газу. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2008. – 182 с. ISBN 978-966-641-278-5.
 3. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2003. – 208с. ISBN 966-641-055-9.
 4. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Сенсори тиску і магнітного поля. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. –207 с. ISBN 966-641-121-0.
 5. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Кравчук Н.С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2007. – 163 с. ISBN 978-966-641-214-3.
 6. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ющенко Ю.А. Радіовимірвальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом. –Вінниця: ВНТУ, 2012. – 140 с. ISBN 978-966-641-492-5.
 7. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів. –Вінниця: ВНТУ, 2014. – 152 с. ISBN 978-966-641-565-6.
 8. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірвальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. –Вінниця: ВНТУ, 2015. – 212 с.
 9. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Савицький А.Ю. Радіовимірвальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 152 с. ISBN 978-966-641-649-3
 10. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Жагловська О.М. Радіовимірвальні мікроелектронні перетворювачі потужності оптичного випромінювання з частотним виходом. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с. ISBN 978-966-641-652-3
- Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3. Publishshed by Sciemcee Pablishing. LP22772,20-2Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –P.212-237.

11. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 2. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –308 p. –P.271-285
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security. Chapter 12. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Springer Netherlands, Dordrecht . Editor: Sidorenko, Anatolie and Hahn, Horst. 2020. –3210 p. –P.161-184. ISBN 978-94-024-1909-2
13. Nadargi, D.Y.; Umar, A.; Nadargi, J.D.; Lokare, S.A.; Akbar, S.; Mulla, I.S.; Suryavanshi, S.S.; Bhandari, N.L.; Chaskar, M.G. Gas sensors and factors influencing sensing mechanism with a special focus on MOS sensors. *J. Mater. Sci.* 2023, 58, 559–582.
14. Verma, A.; Gupta, R.; Verma, A.S.; Kumar, T. Review–Recent Advances and Challenges of Conducting Polymer–Metal Nanocomposites for the Detection of Industrial Waste Gases. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2023, 12, 20. 3. Joshi, N.; Pransu, G.; Conte, C.A. Critical review and recent advances of 2D materials–Based gas sensors for food spoilage detection. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2023, 63, 10536–10559.
15. Preethichandra, D.M.G.; Gholami, M.D.; Izake, E.L.; O’Mullane, A.P.; Sonar, P. Conducting Polymer Based Ammonia and Hydrogen Sulfide Chemical Sensors and Their Suitability for Detecting Food Spoilage. *Adv. Mater. Technol.* 2023, 8, 34.
16. Balan, T.; Dumitru, C.; Dudnik, G.; Alessi, E.; Lesecq, S.; Correvon, M.; Passaniti, F.; Licciardello, A. Smart Multi–Sensor Platform for Analytics and Social Decision Support in Agriculture. *Sensors* 2020, 20, 29.
17. Man, G.; Stoeber, B.; Walus, K. An assessment of sensing technologies for the detection of clandestine methamphetamine drug laboratories. *Forensic Sci. Int.* 2009, 189, 1–13.
18. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Селецька О.О. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології. Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с. ISBN 978-966-641-506-9.
19. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Криночкін Р.В. Радіовимірювальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від’ємним опором. Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 136 с. ISBN 978-966-641-550-6.

20. Sun, Z.G.; Huang, L.X.; Zhang, Y.; Wu, X.F.; Zhang, M.H.; Liang, J.H.; Bao, Y.W.; Xia, X.H.; Gu, H.S.; Homewood, K.; et al. Homojunction TiO₂ thin film-based room-temperature working H₂ sensors with non-noble metal electrodes. *Sens. Actuator B-Chem.* 2024, 398, 11.
21. Epping, R.; Koch, M. On-Site Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Molecules* 2023, 28, 19.
22. Majhi, S.M.; Mirzaei, A.; Kim, H.W.; Kim, S.S.; Kim, T.W. Recent advances in energy-saving chemiresistive gas sensors: A review. *Nano Energy* 2021, 79, 25.
23. Li, Z.J.; Li, H.; Wu, Z.L.; Wang, M.K.; Luo, J.T.; Torun, H.D.; Hu, P.A.; Yang, C.; Grundmann, M.; Liu, X.T.; et al. Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Mater. Horiz.* 2019, 6, 470–506.
24. Moseley, P.T. Progress in the development of semiconducting metal oxide gas sensors: A review. *Meas. Sci. Technol.* 2017, 28, 15.
25. Chu, J.F.; Li, W.J.; Yang, X.; Wu, Y.; Wang, D.W.; Yang, A.J.; Yuan, H.; Wang, X.H.; Li, Y.J.; Rong, M.Z. Identification of gas mixtures via sensor array combining with neural networks. *Sens. Actuator B-Chem.* 2021, 329, 10.
26. Song, X.Y.; Liu, T.; Gu, K.K.; Luo, Z.B.; Zhang, M.Z. Highly selective and ultra-sensitive gas sensor based on Fe₂O₃/Ti₃C₂T_x MXene heterostructure for ppb-level n-butanol detection. *J. Alloy Compd.* 2024, 976, 10.
27. Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку. / Готра Г.Ю., Павлов С.В., Осадчук О.В., Голяка Р.Л., Вуйцик В., Куленко С.С. –Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с. ISBN 978-966-641-500-7
28. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 261 с. ISBN 978-966-641-530-4
29. Lee, J.; Gam, D.; Nam, K.E.; Cho, S.J.; Kim, H. Feasibility study of a resistive-type sodium aerosol detector with ZnO nanowires for sodium-cooled fast reactors. *Nucl. Eng. Technol.* 2023, 55, 2373–2379.
30. Potyrailo, R.A. Multivariable Sensors for Ubiquitous Monitoring of Gases in the Era of Internet of Things and Industrial Internet. *Chem. Rev.* 2016, 116, 14918.
31. Singh, E.; Meyyappan, M.; Nalwa, H.S. Flexible Graphene-Based Wearable Gas and Chemical Sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, 34544–34586.

32. Kumar, R.; Lee, D.; Aġbulut, U.; Kumar, S.; Thapa, S.; Thakur, A.; Jilte, R.D.; Saleel, C.A.; Shaik, S. Different energy storage techniques: Recent advancements, applications, limitations, and efficient utilization of sustainable energy. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2024, 149, 1895–1933.
33. Kumar, M.; Suhaib, M.; Sharma, N.; Kumar, S.; Choudhary, S. Energy Harvesting Technologies in Mechanical Systems: A Comprehensive Review. *Int. J. Res. Publ. Rev.* 2024, 5, 2782–2787.
34. Mastouri, H.; Ennawaoui, A.; Remaidi, M.; Sabani, E.; Derraz, M.; El Hadraoui, H.; Ennawaoui, C. Design, Modeling, and Experimental Validation of a Hybrid Piezoelectric–Magnetolectric Energy-Harvesting System for Vehicle Suspensions. *World Electr. Veh. J.* 2025, 16, 237.
35. Aloui, R.; Gaha, R.; Lafarge, B.; Celik, B.; Verdari, C. Life Cycle Assessment of Piezoelectric Devices Implemented in Wind Turbine Condition Monitoring Systems. *Energies* 2024, 17, 3928.
36. Kim, H.; Rigo, B.; Wong, G.; Lee, Y.J.; Yeo, W.H. Advances in wireless, batteryless, implantable electronics for real-time, continuous physiological monitoring. *Nano-Micro Lett.* 2024, 16, 52.
37. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. – 275с. ISBN 966-7199-67-3.
38. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2001. –195 с. ISBN 966-641-038-9.
39. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336с. ISBN 978-966-641-405-5.
40. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від’ємним опором. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2009. – 182 с. ISBN 978-966-641-315-7
41. Luo, G.; Xie, J.; Liu, J.; Luo, Y.; Li, M.; Li, Z.; Yang, P.; Zhao, L.; Wang, K.; Maeda, R.; et al. Highly stretchable, knittable, wearable fiberform hydrovoltaic generators driven by water transpiration for portable self-power supply and self-powered strain sensor. *Small* 2024, 20, 2306318.
42. Yang, H.; Wu, B.; Xu, G. Modeling and experimental study on walking human-structure interaction systems subjected to earthquake excitations. *J. Sound Vibratio* 2024, 576, 118292.

43. Remaidi, M.; Derraz, M.; Ennawaoui, A.; El Hmamsy, Y.; Mastouri, H.; Ennawaoui, C.; Hajjaji, A. Innovative Autonomous Lead-Free Hybrid Piezoelectric Sensor for Real-Time Wear Assessment of Disc Brake Pads. *Results Eng.* 2025, 26, 104617.
44. Ennawaoui, C.; Lifi, H.; Hajjaji, A.; Elballouti, A.; Laasri, S.; Azim, A. Mathematical modeling of mass spring's system: Hybrid speed bumps application for mechanical energy harvesting. *Eng. Solid Mech.* 2019, 7, 47–58.
45. Ullah, Z.; Alam, M.M.; Younis, J.; Mahrous, Y.M.; Albouchi, F.; Alsulami, M.D.; Usman, A.; Haider, I. Thermal conductivity impact on MHD convective heat transfer over moving wedge with surface heat flux and high magnetic Prandtl number. *Case Stud. Therm. Eng.* 2024, 61, 105077.
46. Hussain, M.N.; Halim, M.A.; Khan, M.Y.A.; Ibrahim, S.; Haque, A. A Comprehensive Review on Techniques and Challenges of Energy Harvesting from Distributed Renewable Energy Sources for Wireless Sensor Networks. *Control. Syst. Optim. Lett.* 2024, 2, 15–22
47. Ennawaoui, C.; Hajjaji, A.; Samuel, C.; Sabani, E.; Rjafallah, A.; Najihi, I.; Azim, A. Piezoelectric and electromechanical characteristics of porous poly (ethylene-co-vinyl acetate) copolymer films for smart sensors and mechanical energy harvesting applications. *Appl. Syst. Innov.* 2021, 4, 57.
48. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. / Укладачі В.О. Козловський, О.Й. Лесько, В.В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-24м
спеціальності 172 Електронні комунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Мізяківський В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., зав. кафедри ІРТС

Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«12» 12 2025 р.

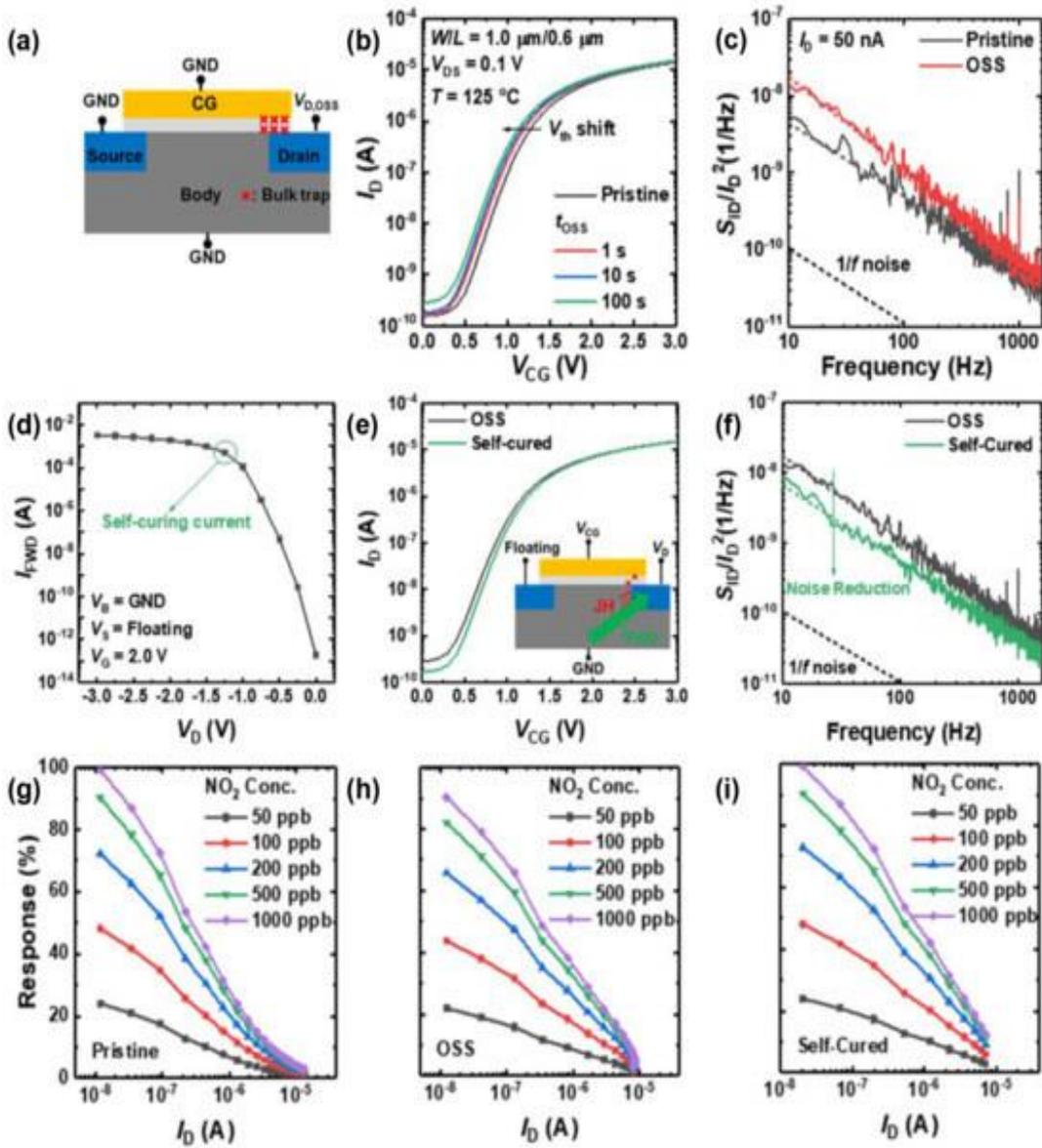


Рисунок 1 – Відновлення за допомогою методу самозатвердіння. (а)
 Діаграма деградації оксиду затвора внаслідок OSS. (б) $I_D - V_{CG}$ відносно
 t_{OSS} . (с) S_{ID}/I_D^2 до та після OSS. (д) $V_D - I_{FWD}$. (е) $I_D -$
 V_{CG} OSS та після методу самозатвердіння. (ф) S_{ID}/I_D^2 OSS та після
 самозатвердіння. Характеристики відгуку (г) чистих, (х) пошкоджених
 OSS та (і) самозатверділих сенсорів

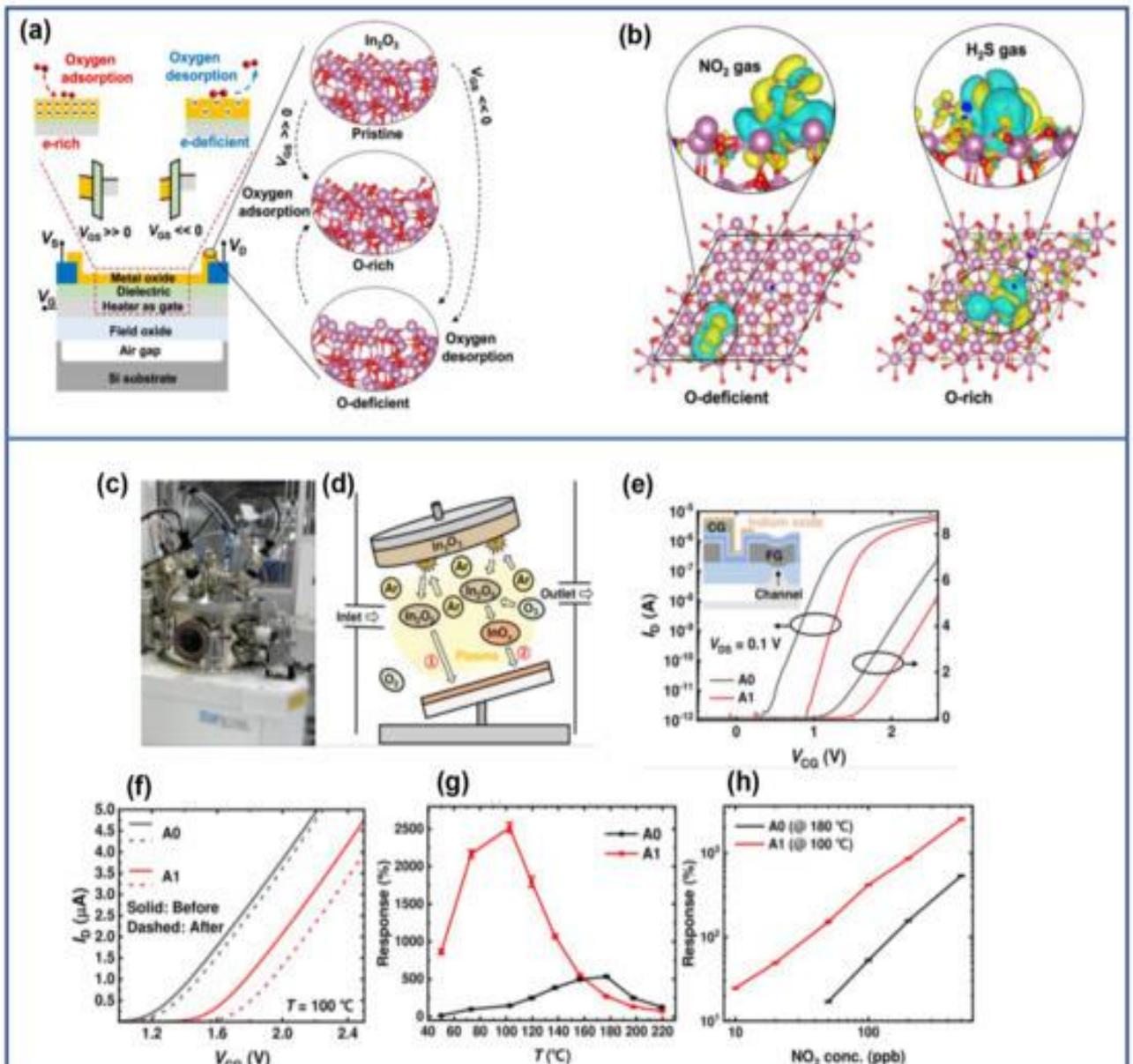


Рисунок 2 – (верхній графік) Реконфігурований контроль вмісту кисню.

(а) Схематичні діаграми, що ілюструють зонну структуру та концентрацію електронів. (б) Модель адсорбції NO₂ та H₂S

Газовий сенсор In₂O₃ з багатою на гідроксильні групи поверхнею.

(с) Фотографія магнетронного радіочастотного розпилення. (д)

Схематичне зображення процесу розпилення. (е) Криві переносу двох

газових сенсорів типу FET. (ф) Характеристики переносу, що

відповідають реакції на NO₂. (г) Реакція на 500 ppb NO₂ залежно від

робочої температури. (х) Реакція залежно від концентрації NO₂

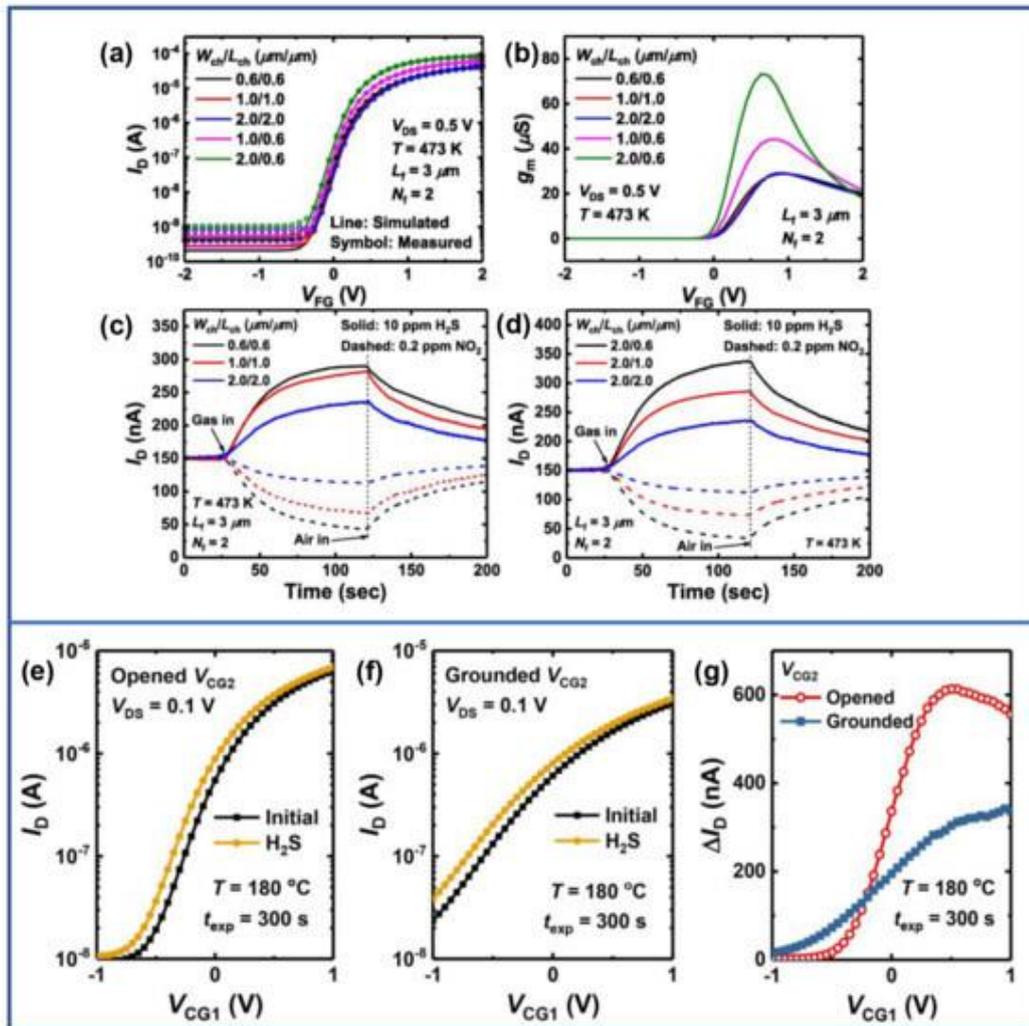


Рисунок 3 – (верхній графік) Газовий датчик на основі кремнієвого польового транзистора. (а) Криві $I_D - V_G$ та (б) криві $g_m - V_G$. (с) Перехідні реакції на NO_2 та H_2S при фіксованому співвідношенні W_{ch}/L_{ch} . (d) Перехідні реакції на NO_2 та H_2S при змінному співвідношенні W_{ch}/L_{ch} . Відтворено з дозволу [54]. Авторське право 2023, Elsevier. (нижній графік) Газовий датчик H_2S на основі полікремнієвого газового датчика типу польового транзистора з керуючим затвором. Криві $I_D - V_{CG1}$ з (е) відкритим та (ф) заземленим V_{CG2} відповідно. (г) ΔI_D відносно V_{CG1}

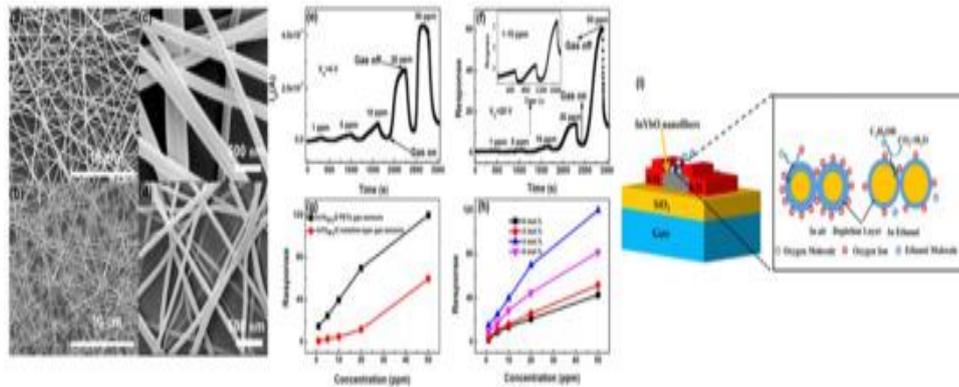


Рисунок 4 – Польовий транзистор та резистивний газовий сенсор на основі легованого Yb In₂O₃. SEM-зображення (а, с) нановолокон, отриманих методом електроформування, та (b, d) відпалених 4% легованого Yb In₂O₃. Динамічна реакція (е) польового транзистора та (f) резистивних сенсорів. (g) Порівняння реакції між польовим транзистором та резистивними сенсорами. (h) Залежність реакції від концентрації легування Yb. (i) Принципова схема механізму чутливості

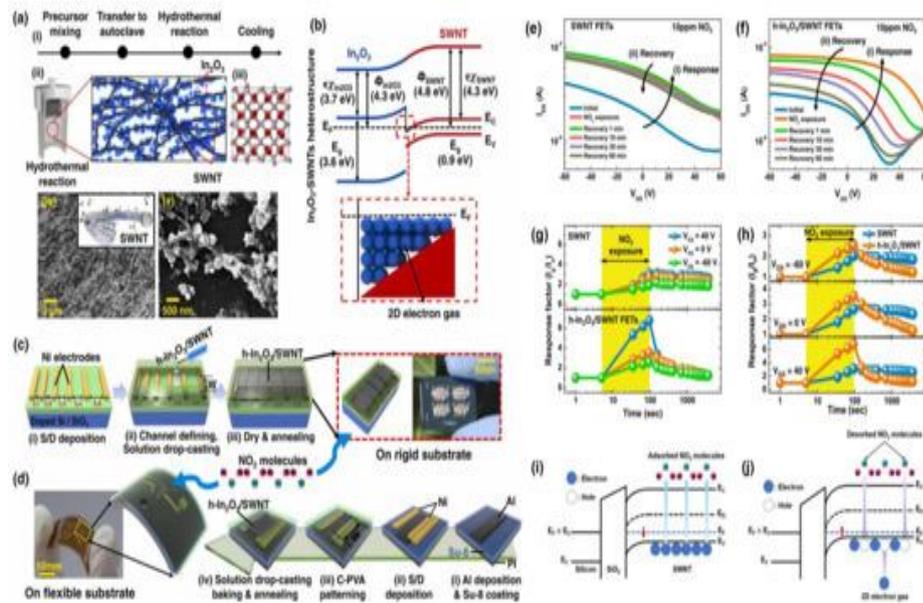


Рисунок 5 – Газочутливі властивості TFT h-In₂O₃ /SWNT. (а) Процес приготування h-In₂O₃ /SWNT та відповідні SEM-зображення. (i) Процес приготування h-In₂O₃ /SWNT. (ii) Принципова схема підготовленого h-In₂O₃ /SWNT. (iii) Кубічна кристалічна структура h-In₂O₃ /SWNT. SEM-зображення (iv) чистих SWNT та (v) h-In₂O₃ /SWNT. (b) Зонна структура. Виготовлення газових сенсорів на жорсткій (c) та гнучкій (d) підкладках. Передавальні характеристики (е) SWNT польових транзисторів та (f) h-In₂O₃ /SWNT польових транзисторів з відгуком на NO₂. (g) Значення відгуку, отримані при динамічних вимірюваннях. (h) Порівняння значень відгуку з різними V_{GS}. Діаграми зонних структур відгуку NO₂ (i) та (j) відновлення

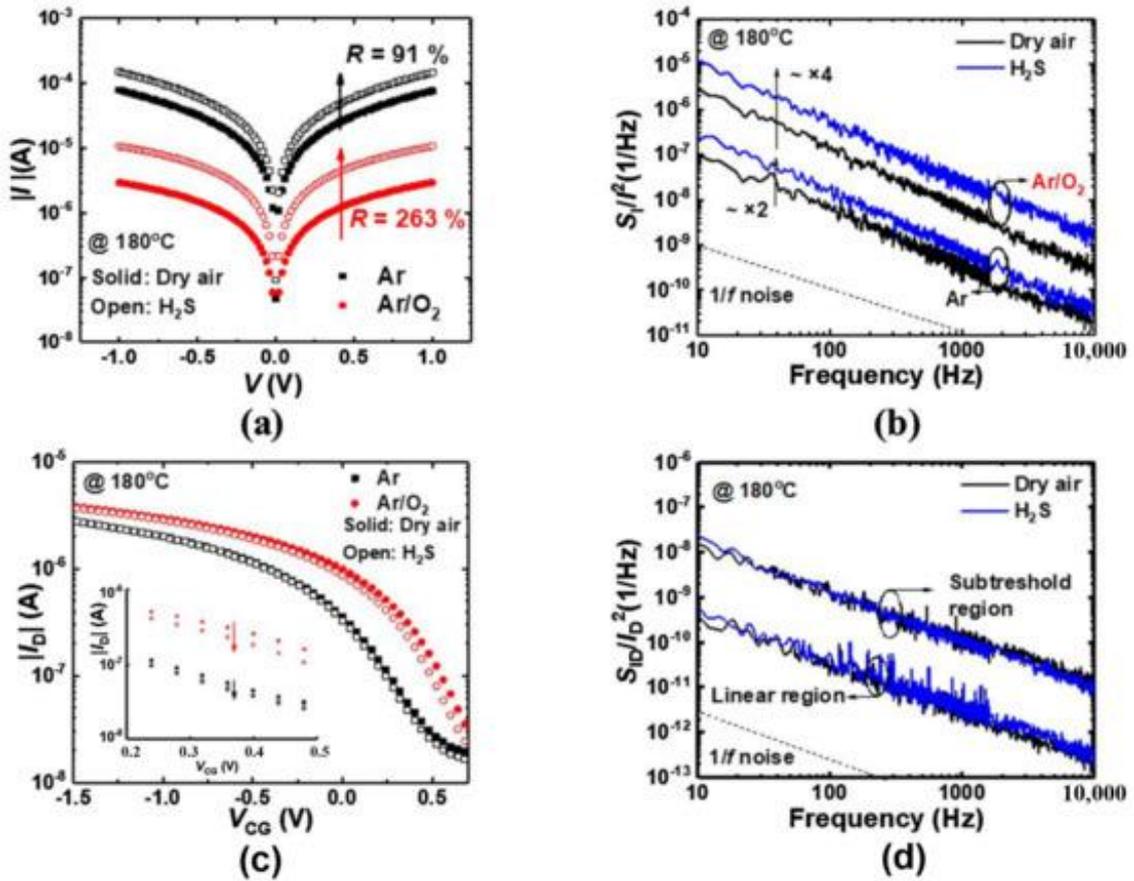


Рисунок 6 – Характеристики низькочастотного шуму для газових сенсорів на основі In_2O_3 . (а) Передавальні характеристики резистивних сенсорів у відповідь на 50 ppb H_2S . (б) Нормалізовані спектри низькочастотного шуму резистивних сенсорів у відповідь на 50 ppb H_2S . (с) Передавальні характеристики польових транзисторів у відповідь на 50 ppb H_2S . (д) Нормалізовані спектри низькочастотного шуму польових транзисторів у відповідь на 50 ppb H_2S

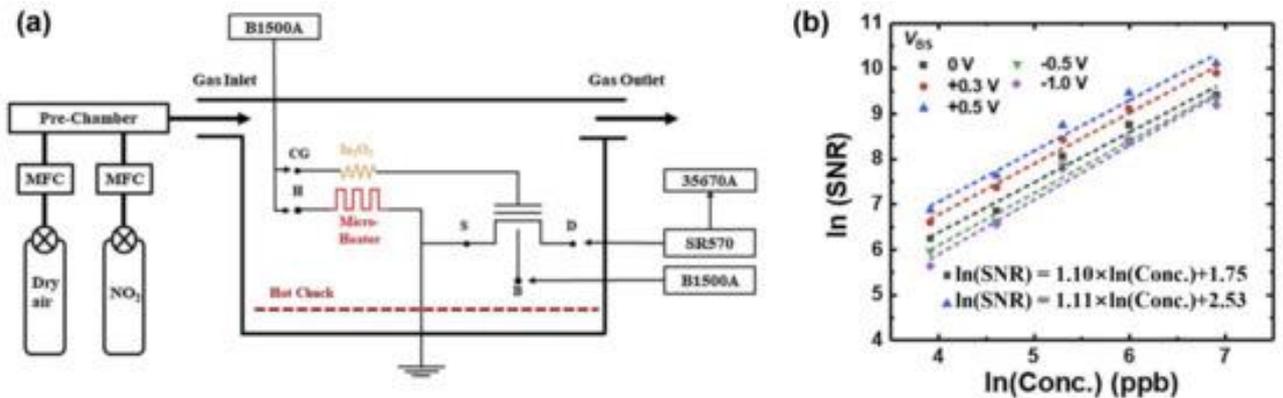


Рисунок 7 – (а) Схема системи газового зондування та вимірювання низькочастотного шуму. (б) Співвідношення сигнал/шум у залежності від концентрації NO_2 у логарифмічному масштабі

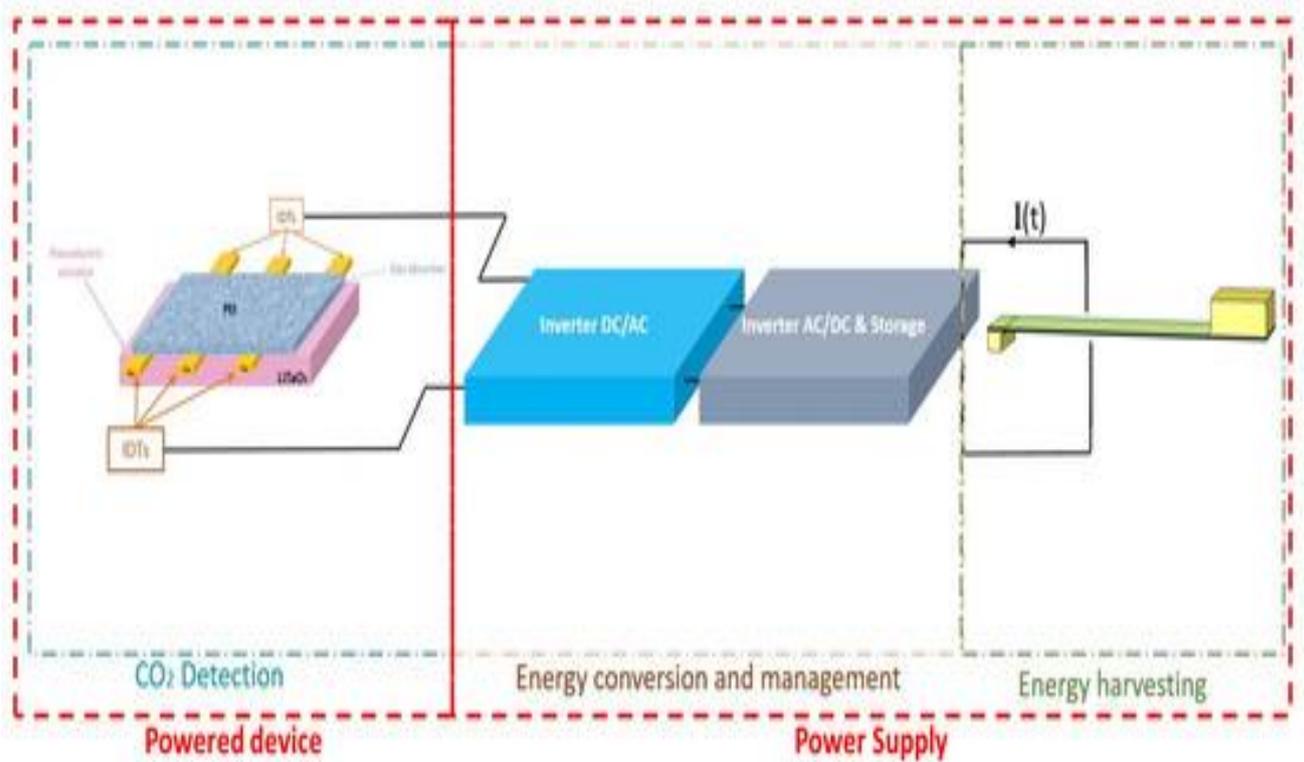


Рисунок 8 – Автономний датчик для виявлення вуглекислого газу

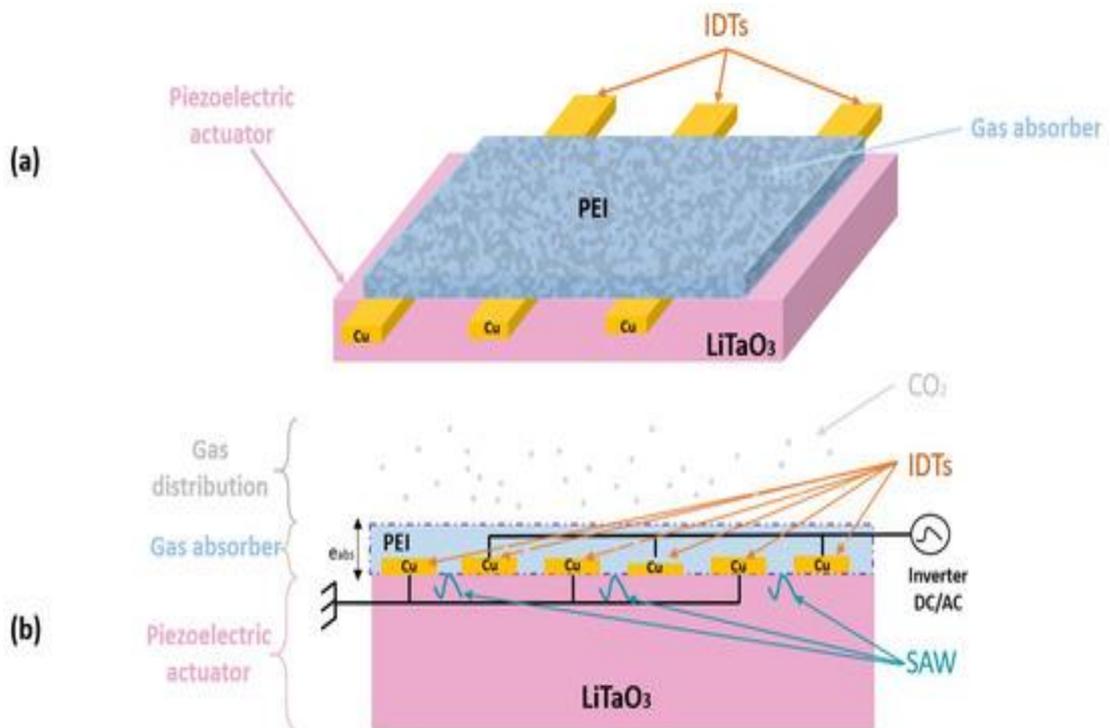


Рисунок 9 – 3D (а) та 2D (б) конфігурації SAW-сенсора зі структурою (PEI/Cu/LiTaO₃)

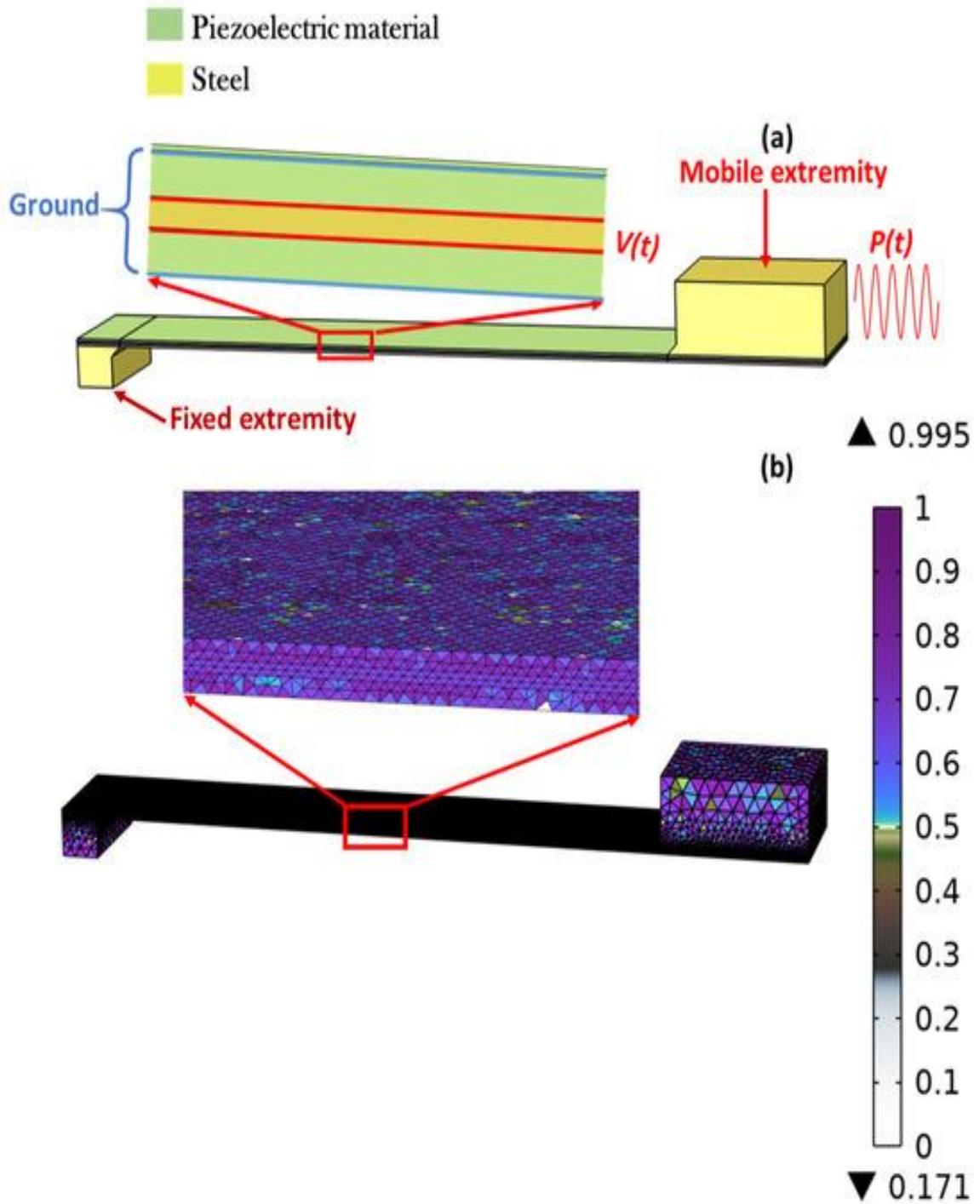


Рисунок 10 – 3D-конфігурація системи: (а) Електромеханічна структура,
(б)

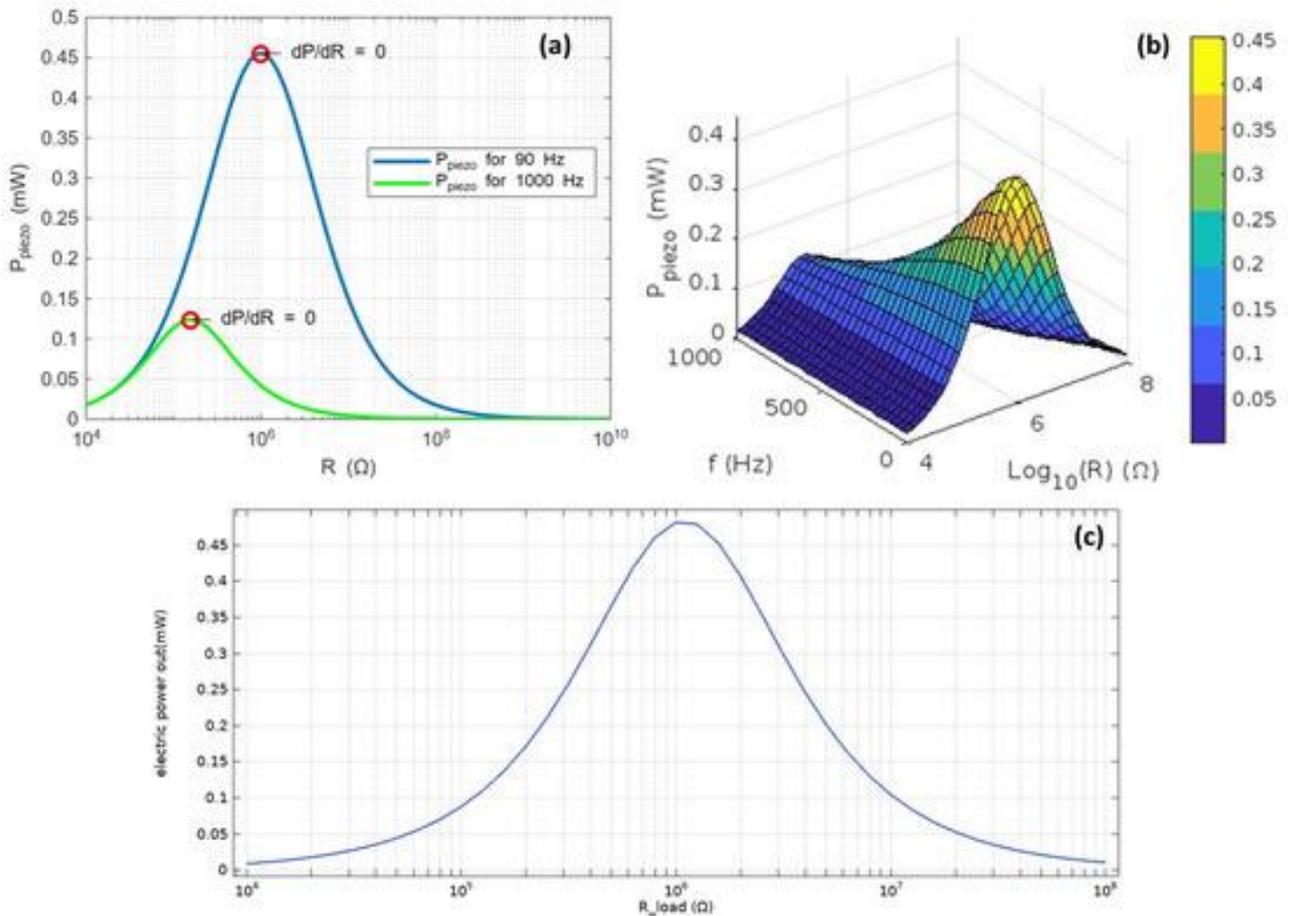


Рисунок 11 – Зібрана електрична потужність PZT-5H: (а) Аналітична потужність від навантаження при 90 Гц, (б) Аналітична потужність від навантаження та частоти, (с) Числова потужність від навантаження при 90 Гц

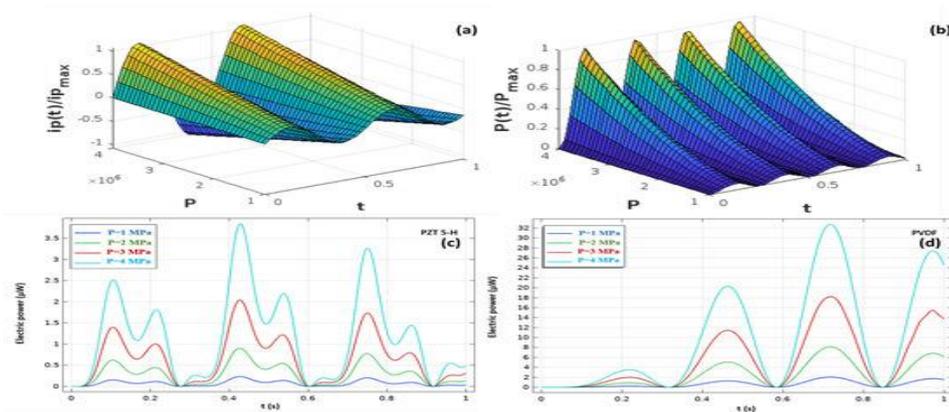


Рисунок 12 – Електрична реакція PZT та PVDF, що піддаються синусоїдальному механічному збудженню: (а, б) зміна нормалізованого струму; (с, д) зміна електричної потужності як функція часу та амплітуди напруження

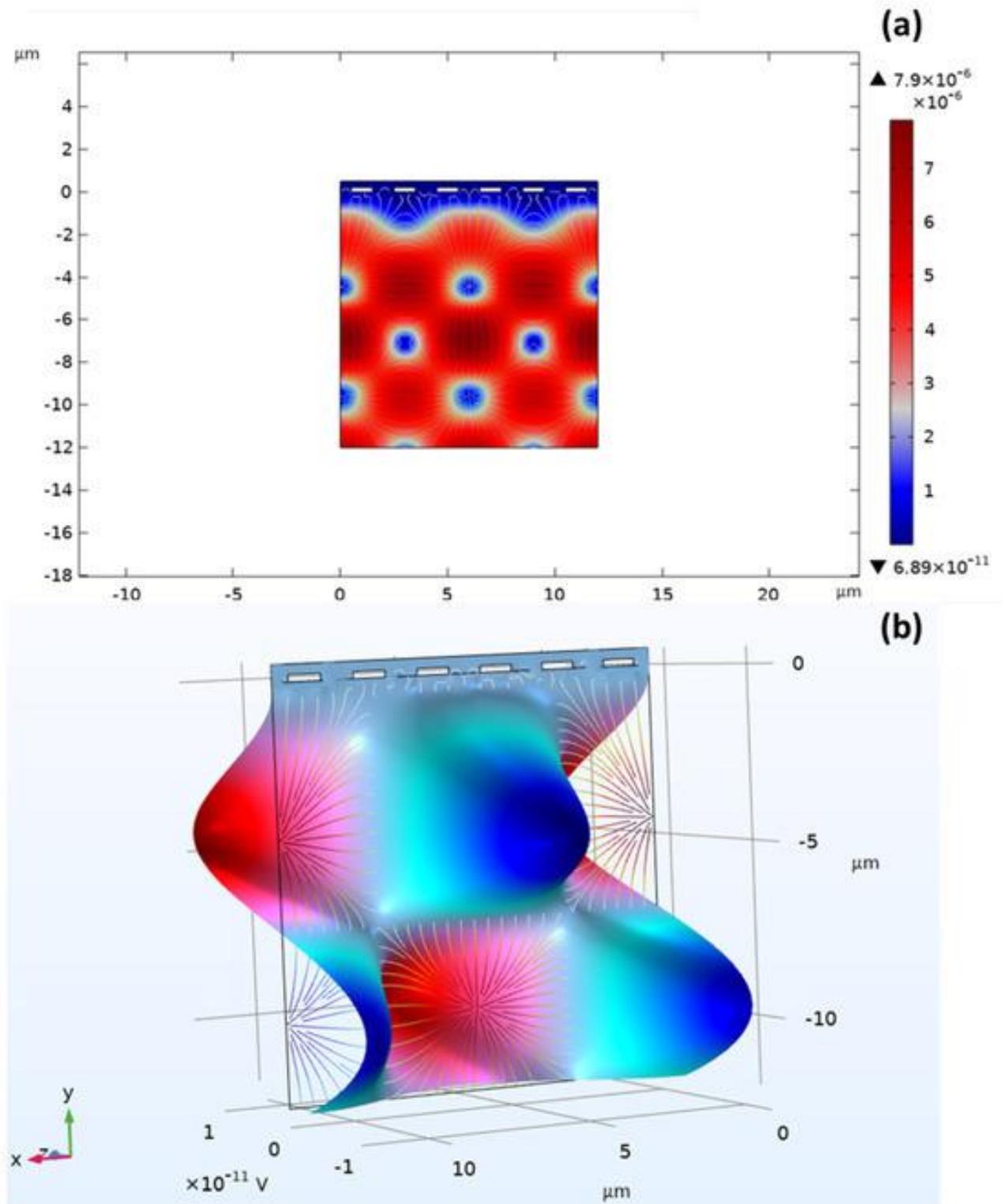


Рисунок 13 – Розподіл ліній електричного поля на 2D-моделі для першої резонансної частоти

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КОНЦЕНТРАЦІЇ
ГАЗУ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Радіовимірювальні перетворювачі концентрації газу»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,50%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

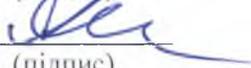
Семенов А.О. – д.т.н., професор каф. ІРТС

(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС

(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)


(підпис)

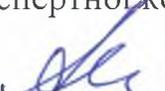
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Семенов А.О.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник  Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 

(підпис)

Мізяківський В.М.

(прізвище, ініціали)