

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет електроніки

Кафедра електронної інженерії

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

В.А. Казміренко

“ ” 2025 р.

Магістерська дисертація

освітнього рівня «магістр»

за спеціальністю 176 мікро- та наносистемна техніка

на тему: Моделювання сенсорів газу на основі оксиду галію

Виконала студент 2 курсу, групи ДМ-41мп

Халус Майя Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: проф., д.т.н. В.І. Тимофєєв

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

(підпис)

Рецензент: Ст. викладач кафедри мікроелектроніки, к.т.н.

Б.І.Луцина

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

(підпис)

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

Студентка

(підпис)

Київ - 2025 року

Форма № Н-9.01

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Факультет електроніки

Кафедра електронної інженерії

Освітній рівень «магістр»

за спеціальністю 176 мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

В.А.Казміренко

“ ” 2025 р.

З А В Д А Н Н Я**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТЦІ**Халус Майя Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: “Моделювання сенсорів газу на основі оксиду галію”

керівник роботи проф., д.т.н. В.І. Тимофєєв,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від “11” листопада 2025 року № 4898-с

2. Строк подання студентом роботи ___ грудень 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Дослідити характеристики напівпровідникових матеріалів для сенсорів газу та здійснити їх порівняльний аналіз, включаючи залежності дрейфової швидкості носіїв заряду від напруженості електричного поля 2. На основі аналітичної моделі польового транзистора здійснити моделювання польових структур сенсорів газу для різних напівпровідникових матеріалів

4. Зміст дисертації (перелік питань, які потрібно розробити)

Принцип роботи, застосування та класифікація сенсорів газу на основі низки напівпровідникових матеріалів, включаючи залежності дрейфової швидкості носіїв заряду від напруженості електричного поля оксиду галію. Аналіз властивостей напівпровідникових матеріалів для сенсорів газу. Моделювання поле-швидкісних характеристик напівпровідникових матеріалів на основі апроксимаційних залежностей. Адаптація аналітичної моделі сенсора газу для

розрахунку вихідних характеристик сенсорів на основі різних напівпровідникових матеріалів. Побудова та аналіз вихідних характеристик сенсорів газу для різних напівпровідникових матеріалів. Висновки.

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

Презентація до захисту.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 11.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на підготовку і оформлення дисертації	11.11.2025	
2	Аналіз літературних джерел за напрямком роботи (розділ 1 дисертації)	17.11.2025	
3	Аналіз літератури щодо характеристик напівпровідникових матеріалів. Аналіз властивостей напівпровідникових матеріалів для сенсорів газу. (розділ 1)	20.11.2025	
4	Математичне моделювання пошвидкісних характеристик напівпровідникових матеріалів на основі апроксимаційних залежностей. (розділ 2)	25.11.2025	
5	Адаптація аналітичної моделі сенсора газу для розрахунку вихідних характеристик	28.11.2025	

	сенсорів на основі різних напівпровідникових матеріалів. (розділ 2)		
6	Розроблення програм МАТЛАБ для розрахунку вихідних характеристик сенсорів на основі різних напівпровідникових матеріалів. (розділ 2)	01.12.2025	
7	Математичне моделювання хімічних сенсорів газу на польових транзисторах для різних напівпровідникових матеріалів. (розділ 3)	03.12.2025	
8	Побудова та аналіз вихідних характеристик сенсорів газу для різних напівпровідникових матеріалів. Висновки. (розділ 3)	05.12.2025	
9	Оформлення магістерської дисертації	10.12.2025	
10	Подання магістерської дисертації для проходження нормоконтролю	10.12.2025	

Студент _____ Халус М. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Тимофєєв В. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 70 ст., 3 розділи, 30 рис., 4 таб., та 42 джерел.

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ, НАПІВПРОВІДНИК, ОКСИД ГАЛІЮ, ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР, ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ, СЕНСОР ГАЗУ

Об'єктом дослідження є властивості та характеристики різних напівпровідникових матеріалів у складі польових структур сенсорів газу.

Метою даної роботи є дослідження та порівняльний аналіз характеристик напівпровідникових матеріалів, а також модернізація аналітичної моделі для моделювання польових структур сенсорів газу на їх основі.

Завданням дослідження є:

- Аналіз властивостей напівпровідникових матеріалів та їхніх поле-швидкісних характеристик для застосування у сенсорах газу.
- Модернізація аналітичної моделі польового транзистора шляхом врахування польової залежності рухливості, вдосконалення моделі сенсору газу.
- Моделювання у середовищі MATLAB вихідних характеристик сенсорів газу та порівняльний аналіз сенсорів, розроблених на основі різних напівпровідникових матеріалів.

У першому розділі розглянуто принцип роботи, застосування та класифікація сенсорів газу. Проаналізовано властивості напівпровідників.

У другому розділі наведено модернізовану аналітичну модель польового транзистора з урахуванням залежності рухливості від електричного поля. Вдосконалено модель сенсору газу для врахування особливостей взаємодії з газом для різних напівпровідників.

У третьому розділі проведено моделювання поле-швидкісних, вольт-амперних та сенсорних характеристик. Порівняно сенсори газу на основі різних напівпровідникових матеріалів.

ABSTRACT

Diploma work: 70 p., 3 sections, 30 figures, 4 table and 42 references.

ANALYTICAL MODEL, COMPARATIVE ANALYSIS, FIELD-EFFECT TRANSISTOR, GALLIUM OXIDE, GAS SENSOR, SEMICONDUCTOR

The object of the study is the properties and characteristics of various semiconductor materials in the composition of field structures of gas sensors.

The purpose of this work is to study and comparative analysis of the characteristics of semiconductor materials, as well as modernization of the analytical model for modeling field structures of gas sensors based on them.

The objectives of the study are:

- Analysis of the properties of semiconductor materials and their field-velocity characteristics for use in gas sensors.
- Modernization of the analytical model of a field-effect transistor by taking into account the field dependence of mobility, improvement of the gas sensor model.
- Modeling in the MATLAB environment of the output characteristics of gas sensors and comparative analysis of sensors developed based on various semiconductor materials.

The first section considers the principle of operation, application and classification of gas sensors. The properties of semiconductors are analyzed.

In the second section, the analytical model of a field-effect transistor is modernized taking into account the dependence of mobility on the electric field. The gas sensor model has been improved to take into account the peculiarities of interaction with gas for different semiconductors.

In the third section, the field-velocity, current-voltage and sensor characteristics have been simulated. Gas sensors with different semiconductors have been compared.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП	9
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Загальний огляд сенсорів газу	11
1.1.1 Сфери застосування сенсорів газу	13
1.1.2 Основні характеристики та методи їх покращення	15
1.2 Польові структури для сенсорів газу	16
1.3 Напівпровідникові матеріали	18
1.3.1 Властивості напівпровідників	20
1.3.2 Механізми розсіювання та поле-швидкісні характеристики	24
1.4 Механізм газочутливості	28
1.4.1 Формування бар'єра Шотткі	28
1.4.2 Адсорбція молекул газу	30
1.5 Висновки до розділу 1	35
2 АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ	36
2.1 Базова аналітична модель	37
2.2 Модернізація аналітичної моделі	41
2.3 Вдосконалення моделі сенсору газу	43
2.4 Висновки до розділу 2	49
3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ	50
3.1 Параметри моделювання	50
3.2 Моделювання поле-швидкісної характеристики	51
3.3 Моделювання ВАХ польового транзистора	54
3.4 Моделювання характеристик сенсору газу	57
3.5 Висновки до розділу 3	63
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	65

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FET – польовий транзистор

CMOS – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

МДН – метал–діелектрик–напівпровідник

MESFET – метал-напівпровідниковий польовий транзистор

HEMT – транзистор із високою рухливістю електронів

SGFET – транзистори з «підвішеним» затвором

CCFET – ємнісно-керований польовий транзистор

CNT – вуглецеві нанотрубки

WBG – широка заборонена зона

UWBG – надширока заборонена зона

BFOM – показник якості Балігі

2DEG – двовимірний електронний газ

ОПЗ – область просторового заряду

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ВСТУП

XXI століття характеризується ерою тотальної автоматизації, яка висуває жорсткі вимоги до швидкості, зручності та безпеки технологій контролю. В умовах стрімкого розвитку промисловості та урбанізації першочерговим завданням стає захист здоров'я населення та довкілля від шкідливих викидів. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря антропогенними (промисловість, транспорт) та природними джерелами є причиною мільйонів випадків захворювань щорічно. Це зумовлює необхідність масового впровадження сенсорних блоків у побутові, комерційні та наукові системи для моніторингу в режимі реального часу таких небезпечних газів, як NO_x , CO, леткі органічні сполуки тощо.

Історична еволюція засобів детектування демонструє чіткий тренд на мініатюризацію. Сьогодні особливої ваги набуває моніторинг газових викидів у мікро- та наносистемах, що використовується у біомедицині, фармацевтиці та наноелектроніці. Це диктує безальтернативність переходу від громіздких аналізаторів до мініатюрних наносенсорів, які поєднують високу чутливість із низьким енергоспоживанням та компактними розмірами [1].

Серед найбільш перспективних рішень для реалізації таких завдань виділяються сенсори на основі польових транзисторів (FET). Їхня унікальність полягає у гнучкості архітектури, що дозволяє реалізувати різні механізми детектування. У літературі розглядаються два основні підходи: використання «оголеного» каналу, де напівпровідник безпосередньо взаємодіє з газом, або використання чутливого металевого затвора, де працює механізм модуляції роботи виходу. Така адаптивність робить FET-структури універсальною платформою для створення високопродуктивних сенсорів, сумісних із CMOS-технологією [2].

Ключовим фактором ефективності таких приладів є вибір базового напівпровідникового матеріалу. Якщо традиційний кремній вичерпав свої можливості для роботи в агресивних середовищах, то нове покоління

широкозонних напівпровідників відкриває принципово нові горизонти. Матеріали такі як нітрид галію та оксид галію характеризуються широкою забороненою зоною, високою термічною стабільністю та хімічною інертністю. Особливий інтерес становить оксид галію, який завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям є винятково перспективним для детектування газів за високих температур. Розуміння відмінностей між цими матеріалами та специфіки їхньої поведінки у польових структурах є критично важливим для створення сенсорів нового покоління.

Актуальність теми. Проектування сучасних сенсорів вимагає точного попереднього моделювання, проте класичні моделі часто ігнорують специфічні ефекти, що виникають у широкозонних напівпровідниках, зокрема, насичення дрейфової швидкості у сильних електричних полях. Це призводить до помилок у прогнозуванні характеристик. Тому розробка вдосконалених методів розрахунку та проведення порівняльного аналізу ефективності різних матеріалів (GaN та Ga₂O₃) є нагальною науково-практичною задачею.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проведення порівняльного аналізу електрофізичних властивостей та характеристик газових сенсорів на основі різних широкозонних напівпровідників (оксиду галію та нітриду галію) з використанням удосконаленої математичної моделі, що враховує ефекти сильного поля.

Об'єктом дослідження є польові структури газових сенсорів на основі різних видів напівпровідникових матеріалів.

Предметом дослідження є методи математичного моделювання електричних характеристик та чутливості сенсорів газу на основі оксиду галію та нітриду галію в умовах сильних електричних полів.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Загальний огляд сенсорів газу

Задоволення зростаючих енергетичних потреб людства при одночасному збереженні екологічного балансу залишається одним із першочергових завдань сучасної науки та техніки. Техногенний розвиток неминуче супроводжується генерацією широкого спектра хімічних забруднювачів, джерелами яких є викиди промислових підприємств, вихлопні гази транспорту та продукти побутової діяльності. В умовах стрімкої урбанізації вимоги до систем детекції суттєво змінилися: вони мають бути не лише індикаторами миттєвої небезпеки, а й інструментами постійного профілактичного контролю якості середовища.

Історично методи виявлення небезпечних газів еволюціонували від найпростіших візуальних індикаторів, таких як зміни кольору полум'я в лампах безпеки у гірничодобувній галузі, до складних електронних систем моніторингу. Раніше для точного аналізу використовувалися громіздкі лабораторні прилади — мас-спектрометри, газові хроматографи та інфрачервоні спектрометри, що вимагали стаціонарного розміщення та кваліфікованого персоналу. Однак розвиток мікроелектроніки призвів до появи класу компактних пристроїв — газових сенсорів, здатних перетворювати хімічну інформацію (концентрацію, парціальний тиск газу) в аналітично корисний електричний сигнал, такий як напруга, струм або зміна опору [1].

У загальному вигляді газовий сенсор — це пристрій, який складається з трьох ключових елементів: аналіту (цільового газу), рецептора (чутливого матеріалу) та перетворювача (трансд'юсера). Рецепторний блок безпосередньо взаємодіє з газом, реагуючи зміною своїх фізико-хімічних властивостей, тоді як перетворювач трансформує цю зміну у вимірюваний електричний сигнал. Така архітектура дозволяє класифікувати сенсори за різними критеріями: за типом цільового газу

(наприклад, датчики водню, чадного газу, летких органічних сполук), за типом чутливого матеріалу або за фізичним принципом перетворення сигналу. Концентрацію виявленого газу визначають шляхом вимірювання інтенсивності вихідного сигналу відповідно до принципової схеми (рис. 1.1) [3].

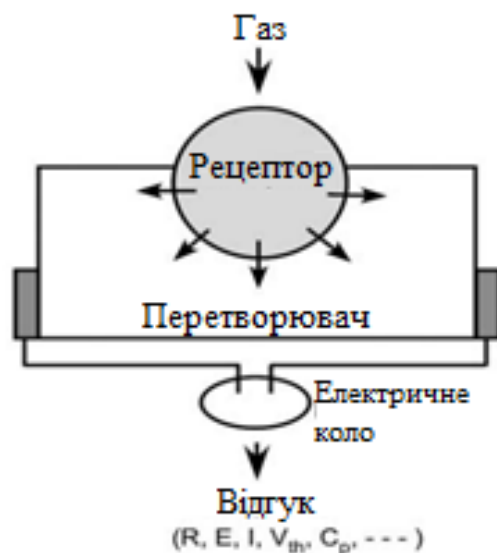


Рисунок 1.1 – Принципова схема газового сенсора [4]

Чутливий елемент таких сенсорів зазвичай являє собою напівпровідникову плівку з високим співвідношенням поверхні до об'єму, розміщену на ізолюючій підкладці з електродами. Механізм їхньої роботи базується на поверхневих взаємодіях у системі «газ — напівпровідник». Ці процеси відбуваються переважно на межах зерен полікристалічної структури і включають адсорбцію молекул, електронний перенос між зоною провідності та поверхневими станами, а також каталітичні окислювально-відновні реакції. Наслідком цих явищ є значна та оборотна зміна провідності матеріалу, яку легко зареєструвати [5], [6].

Ефективність роботи таких пристроїв критично залежить від вибору матеріалів. Оптимальним поєднанням параметрів для напівпровідникових сенсорів вважається досить велика ширина забороненої зони та мала енергія активації домішкових центрів. Це дозволяє уникнути переходу у режим власної провідності за робочих температур і зменшити вплив температурних флуктуацій на вихідний сигнал. Систематичний розгляд бажаних параметрів матеріалів для застосування у газових сенсорах показує, що ключові властивості, що визначають наш вибір,

включають наступне: адсорбційну здатність; електронні, електрофізичні та хімічні властивості; каталітичну активність; термодинамічну стабільність; кристалографічну структуру; стан інтерфейсу; сумісність з матеріалами та технологіями, що використовуються у виготовленні газових сенсорів; надійність тощо. Багато різних матеріалів видаються сприятливими за деякими з цих властивостей, але дуже мало з них є перспективними щодо сукупності всіх цих вимог. Саме тому, незважаючи на велику кількість досліджуваних сполук, лише обмежений перелік матеріалів, зокрема, оксиди металів та широкозонні напівпровідники, знайшов широке практичне застосування [5].

1.1.1 Сфери застосування сенсорів газу

Статистичні дані підтверджують існування прямої кореляції між погіршенням якості довкілля та рівнем смертності від неінфекційних патологій. Забруднення атмосферного повітря трансформувалося в один із найкритичніших глобальних ризиків для здоров'я населення. Присутність токсичних агентів у повітрі суттєво підвищує ймовірність розвитку серцево-судинних захворювань, таких як ішемічна хвороба серця та інсульту, а також хронічних респіраторних хвороб, зокрема астми та раку легень.

Крім природних компонентів атмосфери, газові сенсори контролюють вміст небезпечних забруднювачів: чадного газу (CO), оксидів азоту (NO_x), озону та діоксиду сірки (SO₂). Джерелами цих емісій виступають як природні явища, наприклад, лісові пожежі та вулканічна активність, так і антропогенна діяльність, зокрема, викиди транспорту та енергетичного сектору. Традиційні стаціонарні системи моніторингу сьогодні доповнюються мобільними роботизованими платформами. Зокрема, безпілотні літальні апарати, оснащені газодетекторами, дозволяють виконувати складні завдання: відбір проб вулканічних газів,

локалізацію неконтрольованих викидів на сміттєзвалищах, раннє виявлення осередків пожеж та моніторинг у зонах вибухових робіт.

Критичним аспектом сучасної екології житла є контроль мікроклімату в приміщеннях, де люди проводять більшу частину часу. У замкненому просторі накопичення діоксиду вуглецю та летких органічних сполук (таких як бензол чи толуол) може досягати небезпечних значень, викликаючи так званий «синдром хворої будівлі». Через це газові датчики інтегруються у системи опалення та кондиціонування для інтелектуального керування вентиляцією. В автомобільній індустрії сенсори контролюють не лише склад вихлопних газів, а й якість повітря у салоні та герметичність водневих паливних систем або акумуляторних батарей.

У промисловому секторі використання сенсорів є умовою безпеки персоналу. У гірничодобувній галузі, особливо при підземних роботах, детектори попереджають про ризики задухи та вибухонебезпечні концентрації метану, дозволяючи своєчасно провести евакуацію. У нафтогазовому комплексі моніторинг супроводжує всі етапи — від розвідки до переробки, забезпечуючи захист від вибухів. Агропромисловий сектор застосовує ці прилади для контролю ферментації, визначення свіжості продуктів («електронний ніс») та моніторингу рівня аміаку на тваринницьких фермах.

Особливий інтерес становить застосування сенсорів у медицині для неінвазивної діагностики. Видихуване повітря містить тисячі летких органічних сполук, які є біомаркерами стану організму. Вже сьогодні портативні аналізатори вимірюють рівень ацетону для контролю кетозу та швидкості спалювання жирів у фітнес-програмах. Очікується, що у майбутньому такі дихальні тести стануть стандартною медичною процедурою нарівні з аналізами крові [1], [7].

1.1.2 Основні характеристики та методи їх покращення

Характеристика сенсора – це про розуміння поведінки або продуктивності сенсора за допомогою набору параметрів, котрими є чутливість, селективність, стабільність, межа виявлення, робоча температура, час відгуку та час відновлення.

Чутливість відображає ступінь зміни фізичних та/або хімічних властивостей сенсорного матеріалу під впливом газу. Оскільки механізм детектування базується на поверхневих реакціях, критичну роль відіграє морфологія чутливого шару. Відповідно для сенсора з хорошою селективністю чутливість до цільового газу повинна бути вищою, ніж до інших газів. Межа виявлення – це мінімальна концентрація газу, яку можуть виявити газові сенсори, що зазвичай визначається співвідношенням сигнал/шум 3:1. У кожного сенсора також є оптимальна робоча температура, яка забезпечує найвищу чутливість газового датчика. Час відгуку та час відновлення відображають швидкість відгуку та десорбції газового датчика на виявлений газ. Коли газочутливий матеріал контактує з газом потрібен певний час, щоб опір матеріалу змінився та досяг стаціонарного стану [8].

Стабільність та повторюваність визначають надійність приладу у часі. Стабільність характеризує здатність датчика зберігати вихідні параметри незмінними протягом тривалого періоду, навіть якщо зовнішні умови змінюються, тоді як повторюваність демонструє узгодженість результатів при безперервному тестуванні в ідентичному середовищі, що безпосередньо впливає на термін служби пристрою. У сукупності ці характеристики визначають точність вимірювань, мірою якої виступає похибка — величина відхилення між істинним значенням концентрації газу та сигналом, зареєстрованим сенсором [9].

Економічна ефективність розробки забезпечується мінімізацією використання дорогих матеріалів у конструкції. Для покращення робочих характеристик найчастіше застосовують контроль каталітичної активності шляхом модифікації поверхні благородними металами (Pt, Pd, Au), які виступають каталізаторами окислення, або використовують композитні напівпровідники, що

завдяки синергії компонентів перевершують аналоги. Додаткова оптимізація досягається керуванням морфологією (пористістю, розміром частинок), легуванням та формуванням гетероструктур, зокрема з 1D чи 2D матеріалами [8].

1.2 Польові структури для сенсорів газу

Серед різноманіття твердотільних сенсорів особливе місце займають прилади на основі польових транзисторів (FET). На відміну від пасивних хеморезистивних датчиків, які змінюють лише свій опір, транзисторні структури є активними елементами. Це надає їм низку фундаментальних переваг, головною з яких є повна технологічна сумісність із стандартними CMOS-процесами. Така особливість дозволяє створювати мініатюрні «розумні сенсори», де чутливий елемент, схема підсилення сигналу та логічні блоки для температурної компенсації інтегровані на одному кристалі. Крім того, транзисторна структура дозволяє аналізувати не один параметр, а цілий набір характеристик: зміну порогової напруги, підпорогового нахилу, крутизни або співвідношення струмів у відкритого та закритого станів. Такий мультипараметричний підхід значно підвищує інформативність вимірювань та дозволяє ефективніше розрізняти типи газів у складних сумішах [10], [11], [12].

Еволюцію архітектур польових сенсорів можна розглядати як послідовне наближення газового середовища до провідного каналу. Історично першим типом таких приладів стали транзистори з каталітичним металевим затвором, відомі також як сенсори Лундстрема. Їхня конструкція базується на класичній структурі метал–діелектрик–напівпровідник (МДН), де затвор виконано з каталітично активних металів, таких як паладій або платина. Механізм роботи полягає в дисоціації молекул газу (переважно водню) на поверхні металу та формуванні дипольного шару на межі розділу з діелектриком, що призводить до зміни ефективної роботи виходу та зсуву порогової напруги. Для роботи в агресивних

середовищах та за високих температур, де звичайний кремній та його оксид деградують, цю концепцію було адаптовано для широкозонних матеріалів. Зокрема, структури на основі транзисторів із бар'єром Шоттки (MESFET) та транзисторів із високою рухливістю електронів (HEMT) на базі карбіду кремнію або нітриду галію дозволили реалізувати надійні сенсори, в яких відсутній вразливий шар діелектрика під затвором.

Наступним етапом розвитку стало створення конструкцій, що забезпечують прямий доступ газу до зони дії електричного поля. До таких приладів належать транзистори з «підвішеним» затвором (SGFET), у яких між металевим електродом та поверхнею ізолятора створено фізичний повітряний проміжок. Це дозволяє молекулам газу проникати безпосередньо у зазор, змінюючи електричний потенціал на поверхні каналу, що покращує чутливість до полярних молекул. Подальшим удосконаленням цієї технології стали ємнісно-керовані транзистори (CCFET) та структури з плаваючим затвором. У них газочутливий конденсатор конструктивно відокремлений від зчитувального транзистора, але електрично з'єднаний з його затвором. Такий підхід дозволяє використовувати технологію гібридний фліп-чіп, ізолюючи напівпровідникову частину від прямого хімічного впливу, що підвищує довговічність приладу.

Сучасним трендом у сенсоричі є перехід до наноструктурованих польових транзисторів, які використовують вуглецеві нанотрубки (CNT), напівпровідникові нанодропи або 2D-матеріали (наприклад, графен чи дихалькогеніди перехідних металів). Головною особливістю таких структур є надзвичайно високе співвідношення площі поверхні до об'єму. Фактично, ці прилади реалізують концепцію «відкритого каналу», де весь об'єм провідного матеріалу знаходиться у безпосередній взаємодії з навколишнім середовищем. Адсорбція навіть незначної кількості молекул газу здатна суттєво змінити концентрацію носіїв заряду в усьому перерізі наноструктури, що забезпечує найвищу теоретичну чутливість та дозволяє детектувати гази на рівні окремих молекул [13].

1.3 Напівпровідникові матеріали

Напівпровідники являють собою унікальний клас твердих тіл, електропровідність яких займає проміжне значення між металами та діелектриками і може змінюватися у широких межах під дією зовнішніх факторів. Їхньою фундаментальною відмінністю є наявність забороненої зони, а конкретніше енергетичного інтервалу, в якому відсутні дозволені електронні стани. Це означає, що для виникнення струму носії заряду повинні отримати певну енергію (теплову або оптичну) для переходу з валентної зони у зону провідності. Унікальність напівпровідників полягає у біполярному механізмі провідності, де перенесення заряду здійснюється як негативними електронами, так і позитивними квазічастинками — дірками. Саме здатність матеріалу різко змінювати свої електричні властивості під впливом температури, світла або хімічної взаємодії з поверхнею є фізичною основою роботи газових сенсорів.

Історія використання напівпровідників у сенсоріці розпочалася з елементарних матеріалів, таких як германій та кремній. Хоча кремній став фундаментом сучасної мікроелектроніки, його використання як безпосереднього чутливого елемента є обмеженим через відносно вузьку заборонену зону та схильність до утворення стабільного ізолюючого шару оксиду на поверхні. Значно більший потенціал для роботи у складних умовах демонструють бінарні напівпровідникові сполуки, зокрема карбід кремнію (SiC) та нітрид галію (GaN). На відміну від кремнію, ці матеріали належать до широкозонних напівпровідників, що забезпечує їм виняткову термічну стабільність і здатність функціонувати за температур понад 500–600 °C без деградації кристалічної структури. Їхня хімічна інертність та міцність ковалентних зв'язків дозволяють створювати надійні сенсори для агресивних промислових середовищ, де звичайні матеріали швидко руйнуються.

Найбільш поширеною групою матеріалів для комерційних сенсорів залишаються оксиди металів, які поєднують технологічну доступність із високою

чутливістю до окислювальних та відновлювальних газів. Принцип їхньої роботи базується на зміні провідності приповерхневого шару внаслідок адсорбції молекул газу на дефектах кристалічної ґратки, зокрема, вакансіях кисню. До цієї групи належать як класичні матеріали типу оксиду олова (SnO_2) та оксиду цинку (ZnO), так і більш складні оксидні системи. Хоча оксиди металів є ефективними, сучасні вимоги до мініатюризації та енергоефективності стимулюють перехід до використання їхніх наноструктурованих форм, а саме нанодротів, нанострижнів та пористих плівок, які значно збільшують активну площу взаємодії з газом.

Однак, окрім модифікації форми оксидів, паралельно розвивається клас матеріалів із принципово іншою хімічною природою (рис. 1.2). Першою є органічні напівпровідники та провідні полімери, що дозволяють створювати гнучкі сенсори, які працюють за кімнатних температур, хоча часто поступаються кристалічним аналогам у довготривалій стабільності. Друга група охоплює низькорозмірні вуглецеві структури (нанотрубки, графен) та 2D-матеріали на кшталт дихалькогенідів перехідних металів. З точки зору матеріалознавства, вони представляють принципово інший клас речовин, де відсутня об'ємна кристалічна ґратка у звичному розумінні, а електронні властивості визначаються квантовими ефектами у площині шару.

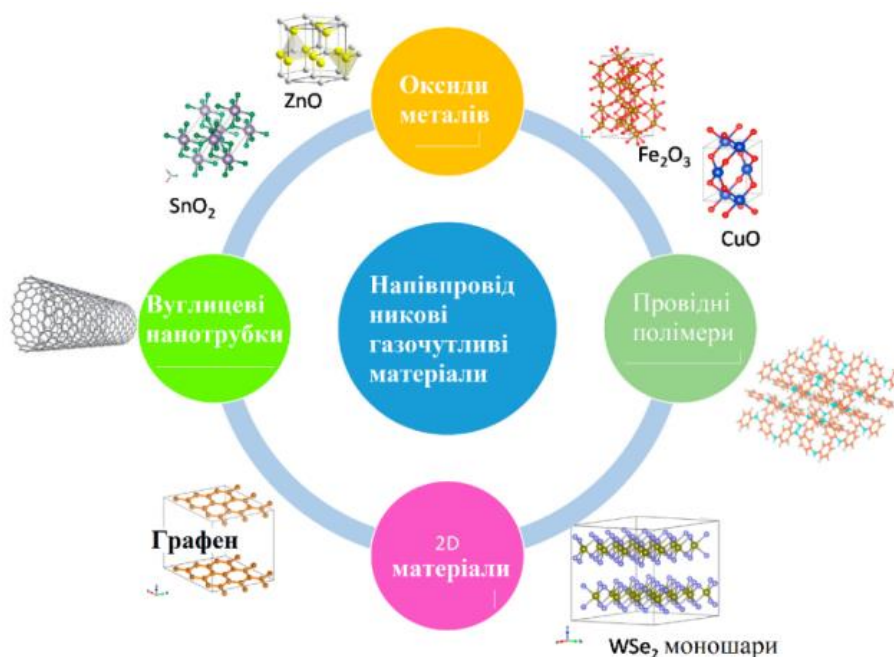


Рисунок 1.2 – Перспективні напівпровідникові газочутливі матеріали [7]

1.3.1 Властивості напівпровідників

Ефективність, швидкодія та сфера застосування газових сенсорів визначаються набором фундаментальних електрофізичних і теплових параметрів напівпровідникового шару. Зведені значення ключових параметрів для матеріалів, що розглядаються у роботі, наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння властивостей напівпровідників [14], [15]

Параметри	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	Діамант
Ширина забороненої зони, E_g (eV)	1,1	1,4	3,25	3,4	4,5–4,9	5,5
Відносна діелектрична проникність, ϵ	11,8	12,9	9,7	9,0	10	5,7
Пробивне електричне поле, E_b (МВ/см)	0,3	0,4	2,5	3,3	8	10
Рухливість електронів, μ_0 (см ² / В·с)	1500	8400	1000	1250	250–300	2000
Швидкість насичення, v_s (10^7 см / с ⁻¹)	1	1,2	2	2,5	1,8–2	1
Теплопровідність, λ (В / м ⁻¹ К ⁻¹)	150	55	270	210	10,9–27	1000
$\text{VFOM} = \epsilon r \mu E_b^3$	1	14,7	317	846	3444	24 660
Кристалічна структура	Гранецентр. кубічна	Цинкова обманка	Кубічна	Вюрцит	Моноклінна	Гранецентр. кубічна

Визначальним параметром для класифікації напівпровідників є ширина забороненої зони (E_g). Вона характеризує енергетичний бар'єр, який необхідно подолати електрону для переходу з валентної зони у зону провідності. За цією характеристикою матеріали поділяють на широкозонні (WBG), до яких відносяться 4H-SiC та GaN із шириною зони понад 3 eV, та надширокозонні (UWBG),

представлені оксидом галію (β -Ga₂O₃) та діамантом ($E_g > 4.5$ eV) [16].

Критичним параметром для високовольтних застосувань є напруженість електричного поля пробую (E_b). Ця величина показує граничне значення поля, яке здатен витримати матеріал без розвитку лавинного пробую. Як видно з таблиці, перехід до UWBG матеріалів дозволяє підвищити цей поріг на порядок: якщо для кремнію та арсеніду галію E_b не перевищує 0,4 МВ/см, то для оксиду галію та діаманту це значення сягає 8–10 МВ/см. Це дозволяє зменшувати геометричні розміри приладу (товщину каналу або дрейфової області) при збереженні робочої напруги.

Для комплексної оцінки потенціалу матеріалу у силовій електроніці використовують показник якості Балігі (BFOM), що показано на рисунку 1.3. Його фізичний зміст полягає в оцінці мінімального опору приладу у відкритому стані за заданої напруги пробую. Ключовою особливістю цього критерію є кубічна залежність від критичного поля. Саме тому, незважаючи на відмінності в рухливості, теоретична ефективність оксиду галію та діаманту є у тисячі разів вищою порівняно з кремнієм.

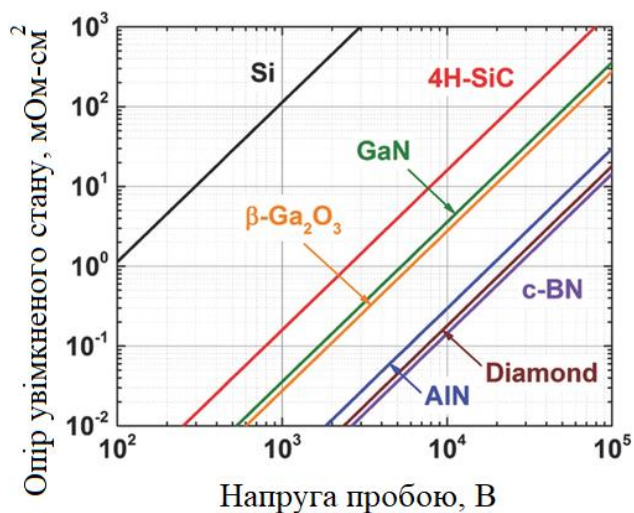


Рисунок 1.3 – Контури постійного BFOM для різних напівпровідників, побудовані на логарифмічному графіку залежності питомого опору увімкненого стану від напруги пробую [17]

Важливими кінетичними характеристиками є рухливість (μ) та швидкість

насичення (v_s). Рухливість визначає дрейфову швидкість носіїв у слабких електричних полях. Серед наведених матеріалів найвищу рухливість демонструє арсенід галію (GaAs) на рисунку 1.4, що забезпечує йому перевагу у швидкодії за низьких напруг. Однак у сильних полях, характерних для роботи польових структур, швидкість носіїв перестає зростати лінійно і обмежується значенням швидкості насичення. Детальніше механізми розсіювання та польові залежності швидкості будуть розглянуті у п.1.3.2.

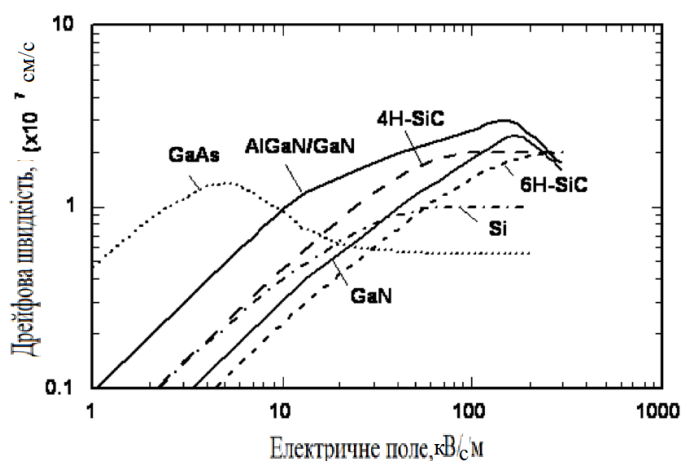


Рисунок 1.4 – Характеристики залежності швидкості електронів від електричного поля для кількох напівпровідників [18]

Суттєвим обмежуючим фактором для напівпровідникових приладів є теплопровідність (λ). Здатність ефективно відводити тепло з активної області визначає надійність сенсора. У цьому аспекті спостерігається суттєва різниця між групами матеріалів: якщо діамант та карбід кремнію є відмінними провідниками тепла, то оксидні метали, зокрема β -Ga₂O₃, мають низьку теплопровідність, що вимагає застосування спеціальних конструкторських рішень для термоменеджменту [7], [19], [20].

Окрім числових параметрів, поведінка матеріалу у сенсорі значною мірою залежить від його кристалічної структури та хімічної природи. Серед оксидних напівпровідників особливе місце займає оксид галію (Ga₂O₃). На відміну від традиційних сенсорних матеріалів, таких як оксид олова (SnO₂) або цинку (ZnO), які відомі своєю чутливістю, але низькою стабільністю, оксид галію поєднує

хеморезистивні властивості з електричною міцністю силових напівпровідників. Цей матеріал характеризується вираженим поліморфізмом. Найбільш термодинамічно стабільних з усіх форм є β - Ga_2O_3 , який має моноклінну кристалічну ґратку (рис. 1.5 а). Низька симетрія цієї структури призводить до сильної анізотропії фізичних властивостей: теплопровідність та оптичне поглинання суттєво відрізняються вздовж різних кристалографічних осей (a , b , c). Важливою перевагою Ga_2O_3 є також технологічність: це чи не єдиний широкозонний матеріал, який можна вирощувати у вигляді об'ємних кристалів безпосередньо з розплаву, до того ж за допомогою кількох стандартних методів вирощування, включаючи метод Чохральського. Це робить виробництво дешевшим і доступнішим, ніж кристали SiC та GaN , які у масиві вимагають складніших методів синтезу з використанням вищого тиску та температури.

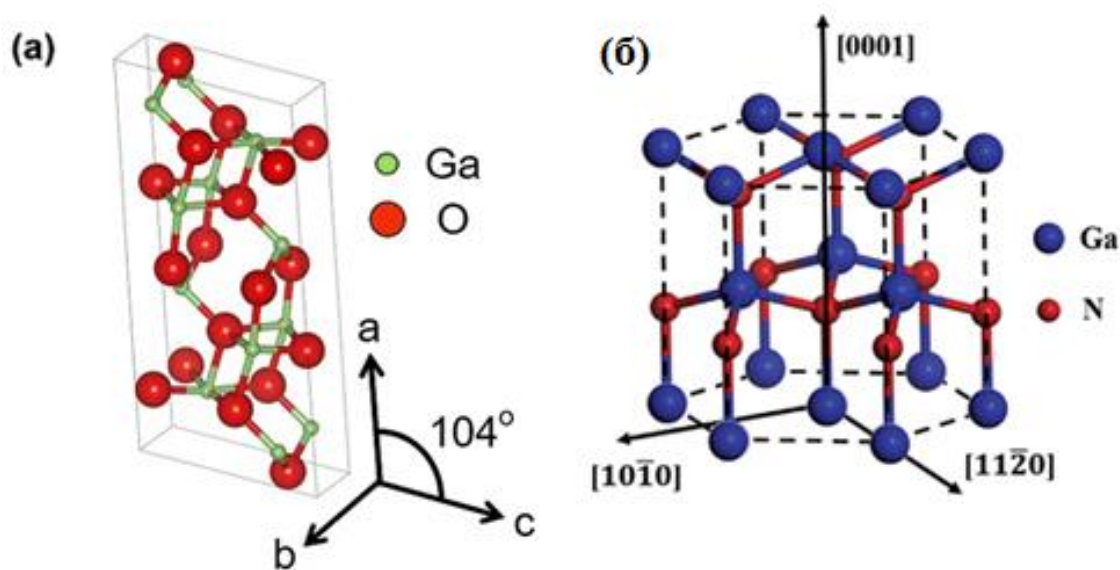


Рисунок 1.5 – Кристалічна структура (а) β - Ga_2O_3 [21] і (б) GaN [22]

Хорошим представником бінарних сполук є нітрид галію (GaN), який належить до групи A^3B^5 . Він кристалізується переважно у гексагональній структурі вюрциту (рис. 1.5 б). Особливістю цієї полярної ґратки є виникнення сильної спонтанної та п'єзоелектричної поляризації. Завдяки цьому GaN став стандартом височастотної електроніки завдяки унікальній здатності формувати на межі з іншими нітридами (наприклад, AlGaN) область із двовимірним електронним газом

(2DEG). У цьому тонкому шарі електрони рухаються з дуже високою швидкістю та концентрацією. Для сенсорів це критично важливо: оскільки провідний канал знаходиться дуже близько до поверхні, будь-яка взаємодія газу з поверхнею миттєво змінює концентрацію носіїв у каналі, забезпечуючи високу чутливість. Крім того, сильний хімічний зв'язок Ga-N забезпечує високу інертність матеріалу в агресивних середовищах. До цієї групи також належить нітрид алюмінію (AlN), який має рекордну ширину забороненої зони (6.2 eV). Проте через складність легування та отримання провідності він рідко використовується як активний сенсорний шар, виконуючи частіше роль високоякісного ізолятора або підкладки [23], [24].

1.3.2 Механізми розсіювання та поле-швидкісні характеристики

Ефективність перенесення заряду у напівпровідниковому кристалі є складним процесом, який визначається взаємодією носіїв заряду з дефектами кристалічної ґратки та тепловими коливаннями атомів. У фізиці напівпровідників цей процес описується залежністю дрейфової швидкості від напруженості електричного поля, яка має суттєво нелінійний характер і розділяється на області слабких та сильних полів.

У слабких електричних полях швидкість електронів лінійно зростає зі збільшенням напруженості поля, а коефіцієнт пропорційності — рухливість — визначається часом релаксації імпульсу. Ця величина не є фіксованою константою матеріалу, а залежить від температури через конкуренцію різних механізмів розсіювання. Згідно з правилом Маттіссена, результуюча рухливість формується як сума ймовірностей розсіювання на різних центрах. Як ілюструє графік температурної залежності (рис. 1.6), за низьких температур домінуючим є розсіювання на іонізованих домішках. Це зумовлено кулонівською взаємодією вільних електронів із зарядженими донорами або акцепторами. Зі зростанням

температури теплова швидкість електронів збільшується, що послаблює вплив домішок, і крива рухливості йде вгору.

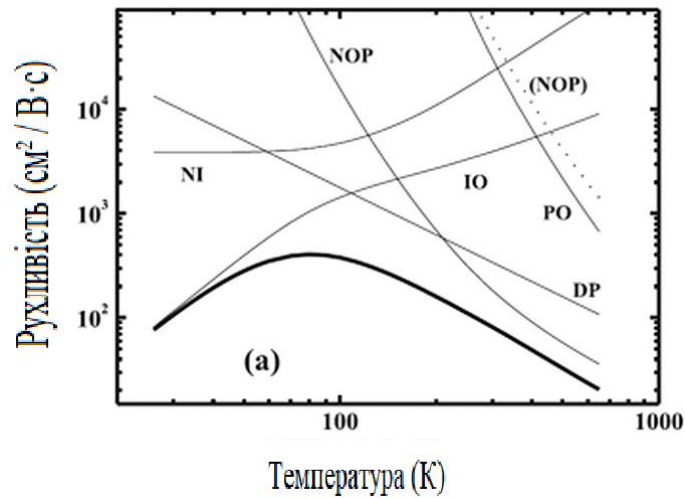


Рисунок 1.6 – Температурна залежність дрейфової рухливості, розрахованої для Ga_2O_3 [17]

Однак у разі подальшого нагрівання до кімнатних температур і вище вмикається інший, більш впливовий механізм – розсіювання на фононах (коливаннях ґратки). Для широкозонних матеріалів, зокрема, оксиду галію, критичну роль відіграють два типи фононної взаємодії. Перший – це розсіювання на акустичних фононах через деформаційний потенціал, яке є пружним і характерним для всіх твердих тіл. Другий, і найбільш значущий для полярних напівпровідників (GaN , Ga_2O_3), – це розсіювання на полярних оптичних фононах. Оскільки хімічний зв'язок у цих матеріалах має значну іонну складову, коливання атомів створюють сильні макроскопічні електричні поля, які інтенсивно гальмують електрони. Саме домінування полярного оптичного розсіювання є теоретичною причиною різкого спадання рухливості за високих температур, що є фундаментальною властивістю цих кристалів.

У сильних електричних полях, коли енергія, отримана електроном від поля, перевищує енергію оптичного фонона, характер руху кардинально змінюється. Електрони стають "гарячими" і починають інтенсивно випромінювати фонони,

віддаючи енергію гратці. Це призводить до насичення дрейфової швидкості – стану, коли подальше збільшення поля майже не впливає на швидкість носіїв.

Вигляд кривої насичення залежить від зонної структури конкретного напівпровідника (рис. 1.7 б). Для нітриду галію теоретично передбачено і експериментально підтверджено ефект "перевищення" швидкості. Це явище виникає через те, що за певних енергій електрони можуть переходити з центральної долини зони провідності у бічні долини, де їхня ефективна маса є більшою, що тимчасово знижує середню швидкість після досягнення піку. Натомість для оксиду галію, через особливості дисперсії зони провідності та велику ефективну масу електронів, такий ефект є менш вираженим або відсутнім. Теоретичні розрахунки показують монотонне зростання швидкості з плавним виходом на насичення.

Характер залежності швидкості від поля має свої унікальні особливості для кожного матеріалу, що наочно ілюструють графічні залежності. Для оксиду галію (рис. 1.7 а) ця характеристика ускладнюється анізотропією кристалічної структури. Як показують дослідження, криві залежності дрейфової швидкості від поля суттєво відрізняються для напрямків x , y та z . Це означає, що орієнтація каналу транзистора відносно кристалографічних осей безпосередньо впливає на його швидкодію та струм насичення. Загалом для оксиду галію характерна монотонна залежність із плавним виходом на насичення без різких стрибків, що зумовлено великою ефективною масою електронів та інтенсивною електрон-фононою взаємодією.

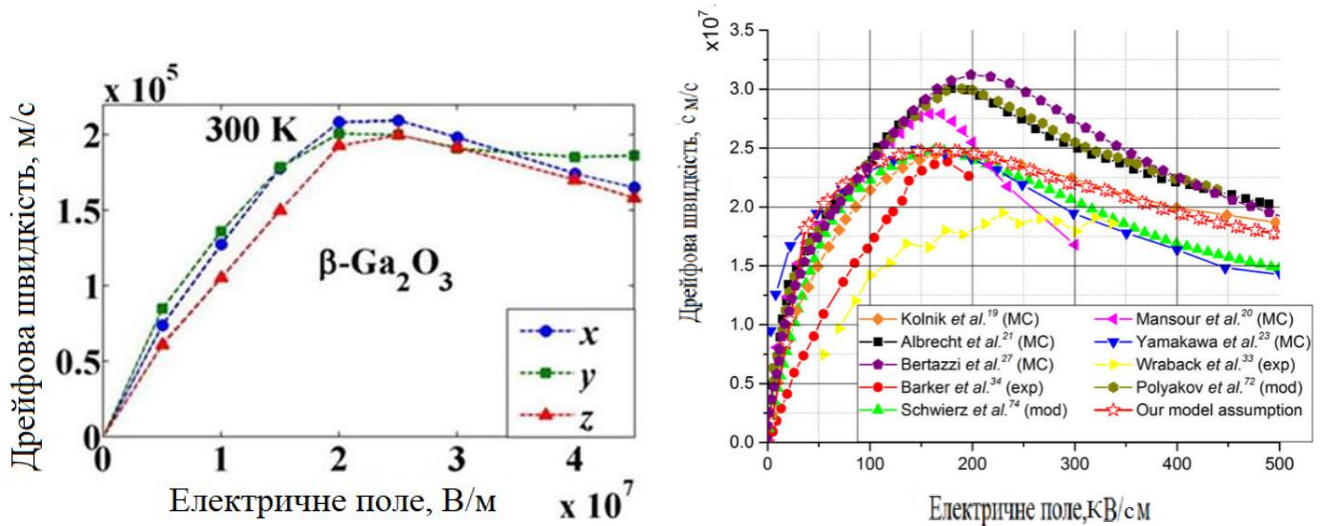


Рисунок 1.7 – Стационарна швидкісно-польова характеристика $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ за кімнатної температури у трьох різних напрямках [25], [26]; графік порівняння швидкості дрейфу електронів як функції електричного поля у GaN з даними з різних досліджень [27]

Зовсім інша картина спостерігається для нітриду галію (рис. 1.7 б). Аналіз численних теоретичних та експериментальних досліджень показує значний розкид даних, проте більшість моделей демонструють ефект негативної диференціальної рухливості. Це явище проявляється у вигляді піку на кривій швидкості ("overshoot") з подальшим спаданням. Фізична природа цього ефекту полягає у міждолинному переході електронів: у разі досягнення високих енергій носії переходять із центральної долини зони провідності у бічні долини, де їхня ефективна маса значно зростає, а швидкість відповідно зменшується. Такий нелінійний характер транспорту є критичним для проектування височастотних сенсорів і вимагає застосування складних апроксимаційних моделей, оскільки проста лінійна екстраполяція низькопольової рухливості у цій області є абсолютно некоректною [28], [29].

1.4 Механізм газочутливості

1.4.1 Формування бар'єра Шотткі

Ключовим елементом структури польового транзистора, що визначає його керуючі властивості, є затвор, який являє собою контакт метал-напівпровідник. У фізиці твердого тіла такий випрямний контакт називається бар'єром Шотткі, а його формування базується на термодинамічному вирівнюванні енергетичних рівнів двох матеріалів при їх дотику.

Кожен матеріал характеризується рівнем Фермі (E_F) — це умовний енергетичний рівень, який відображає середню енергію електронів у матеріалі (або хімічний потенціал електронів). До контакту рівні Фермі металу та напівпровідника знаходяться на різних висотах. Також важливою характеристикою є робота виходу (ϕ) — мінімальна енергія, необхідна для того, щоб вирвати електрон з поверхні матеріалу у вакуум.

Розглянемо процес формування бар'єра на прикладі контакту металу з напівпровідником n -типу на рис. 1.9. Оскільки робота виходу металу (ϕ_M) зазвичай перевищує роботу виходу напівпровідника, електрони починають перетікати з напівпровідника (де їх енергія вища) у метал, намагаючись вирівняти рівні Фермі. Внаслідок відтоку носіїв заряду у приповерхневому шарі напівпровідника залишаються некомпенсовані позитивно заряджені іони донорної домішки. Цей шар позитивного просторового заряду створює електричне поле, яке перешкоджає подальшому руху електронів, формуючи так звану збіднену область або область просторового заряду (ОПЗ). Енергетичні зони напівпровідника а проте викривляються вгору. Згідно з правилом Шотткі-Мотта, висота утвореного потенціального бар'єра $\phi_{Bn} = \phi_M - \chi_s$, де ϕ_M робота виходу металу, а χ_s спорідненість до електрона напівпровідника.

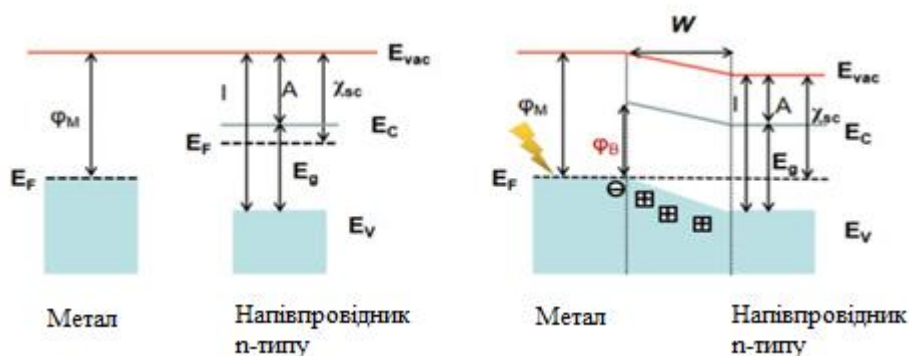


Рисунок 1.8 – Бар'єр Шотткі, утворений металом з високою роботою виходу, що контактує з напівпровідником *n*-типу [30]

Для напівпровідників *p*-типу (де основними носіями заряду є дірки) процес формування бар'єра має дзеркальний характер. У цьому випадку збіднена область формується внаслідок утворення шару негативно заряджених іонізованих акцепторів, що компенсуються позитивним поверхневим зарядом на металі. Енергетичні зони а проте викривляються вниз, а висота бар'єра для дірок (ϕ_{Bp}) визначається балансом між шириною забороненої зони (E_g) та різницею енергій контактуючих матеріалів, тому $\phi_{Bp} = E_g + \chi_s - \phi_m$.

Саме цей бар'єр визначає початкову ширину збідненої області у каналі транзистора ще до того, як на нього почне діяти газ. Вибір металу має критичне значення: метали з високою роботою виходу (наприклад, платина Pt або золото Au) формують вищий бар'єр на *n*-напівпровідниках, що призводить до сильнішого збіднення каналу, тоді як метали з низькою роботою виходу (алюміній Al, титан Ti) створюють нижчий бар'єр.

Механізм газочутливості у таких структурах реалізується через модифікацію параметрів цього бар'єра. По-перше, вибір металу задає "робочу точку" транзистора. По-друге, у разі адсорбції газу на каталітичному металі затвора відбувається дисоціація молекул, і атоми газу дифундують до межі розділу метал-напівпровідник, утворюючи дипольний шар. Цей шар змінює ефективну роботу виходу металу, що модулює висоту бар'єра Шотткі та ширину збідненої області, змінюючи струм стоку. Однак, зміна провідності може відбуватися не лише через контактні явища, а й безпосередньо на поверхні напівпровідника [31].

1.4.2 Адсорбція молекул газу

Якщо бар'єр Шотткі визначає умови протікання струму на контактах, то адсорбційні процеси відповідають за зміну провідності вздовж відкритої поверхні каналу або зерен напівпровідника. Основою роботи напівпровідникових газових сенсорів є зміна електропровідності чутливого шару внаслідок хімічної взаємодії з газами. Цей процес базується на адсорбції молекул газу на поверхні оксиду металу та подальших окислювально-відновних реакціях. Ключову роль тут відіграє температура, яка забезпечує необхідну енергію активації для перебігу реакцій на чутливих електродах або поверхні зерна напівпровідника. У результаті цих процесів змінюється концентрація носіїв заряду, що фіксується приладом як зміна електричного опору (у резистивних сенсорах) або як зміна струму та порогової напруги (у структурах типу FET).

Первинним етапом роботи будь-якого оксидного сенсора, що працює в повітряному середовищі, є взаємодія з киснем. O_2 — це газ без смаку, запаху та кольору, необхідний для всіх живих організмів. Він поглинається тваринами та перетворюється на CO_2 , який рослини використовують як джерело вуглецю та вільного O_2 назад в атмосферу. O_2 та інші окислені гази, такі як NO_2 та CO_2 , можуть приймати негативні заряди з поверхні оксиду металу. Ця операція змінює товщину шару збіднення та зменшує провідність.

Серед окислювальних газів переважає O_2 , тому що реагує з поверхнями оксидів металів швидше, ніж інші. Молекули O_2 з атмосфери адсорбуються на поверхні напівпровідника і, захоплюючи вільні електрони з зони провідності, іонізуються. Залежно від робочої температури утворюються різні іонні форми кисню: молекулярні (O_2^-) занижених температур або атомарні (O^- , O^{2-}) за високих (рис. 1.10). Цей процес захоплення електронів призводить до зміни електронного стану поверхні, що є відправною точкою для тестування цільових газів.

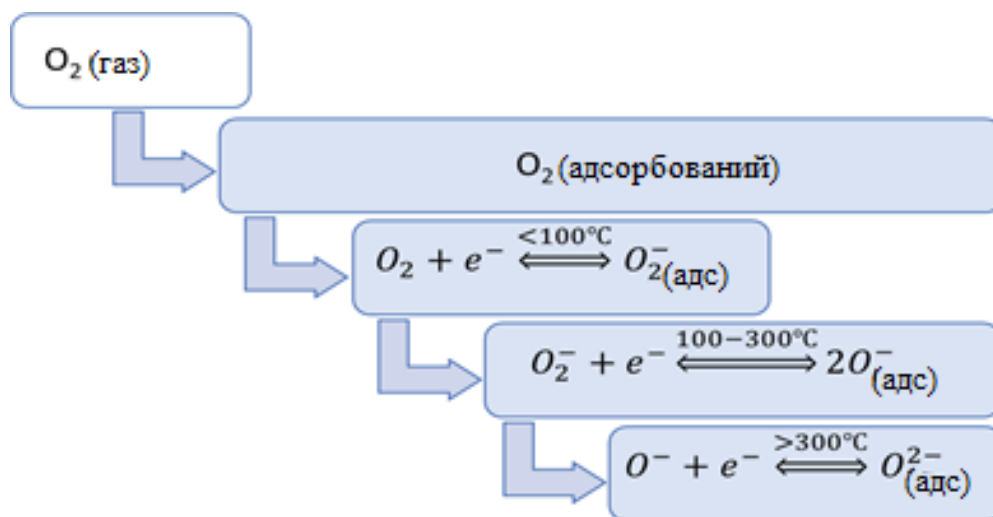


Рисунок 1.9 – Кінематика адсорбції кисню [32]

Зміна електропровідності сенсорних плівок є основним принципом роботи газових сенсорів на основі оксиду металу під час впливу газу. Цього можна досягти завдяки взаємодії між оксидами металів та тестовим цільовим газом. Коли поверхня оксидів металів піддається впливу кисню, їхні активні центри поглинають кисень та утворюють іони кисню. Цей процес пов'язаний з деякими показниками, такими як концентрація газу, сенсорна плівка, температура та поглинуті іони кисню. Крім того, тип використовуваного напівпровідника має вирішальне значення для виявлення [33].

Для матеріалів *n*-типу (рис. 1.11), де основними носіями є електрони, адсорбція кисню створює дефіцит електронів у приповерхневому шарі. Це явище відоме як формування збідненого шару або області просторового заряду, що призводить до викривлення енергетичних зон вгору та зростання електричного опору сенсора у чистому повітрі. Механізм детектування відновлювальних газів (таких як CO, H₂) на *n*-типових напівпровідниках відбувається так:

1. Молекули цільового газу наближаються до поверхні та вступають у реакцію з попередньо адсорбованими іонами кисню.
2. У процесі окислення газу (наприклад, CO до CO₂) електрони, які раніше утримувалися киснем, вивільняються і повертаються назад у зону провідності напівпровідника.

3. Це призводить до зменшення товщини збідненого шару, зниження потенційного бар'єра між зернами матеріалу і, як наслідок, різкого зменшення електричного опору.

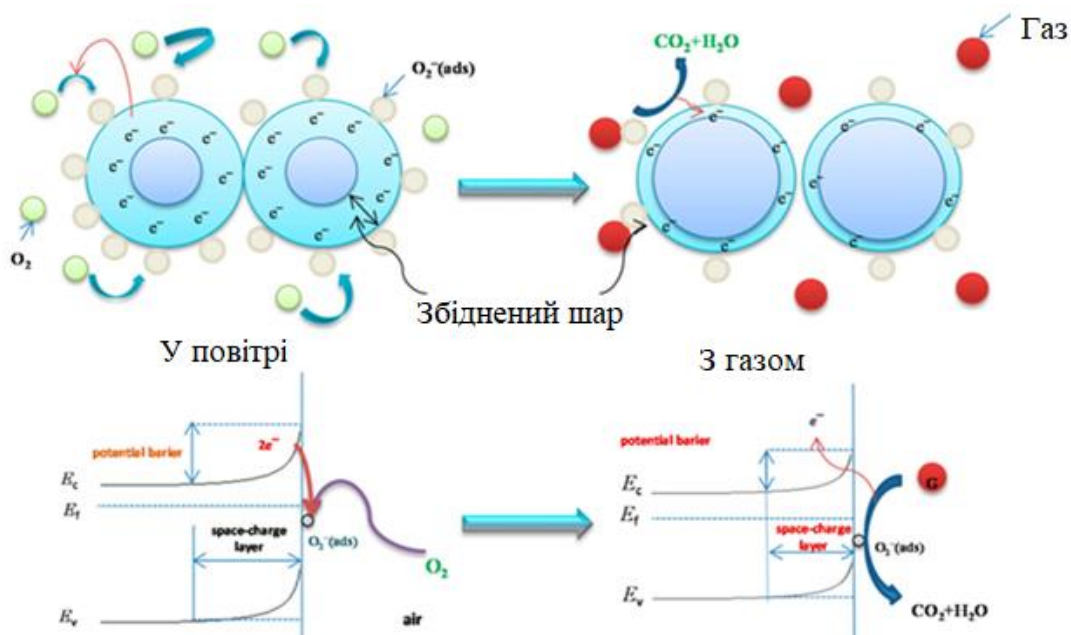


Рисунок 1.10 – Принципова схема механізму чутливості напівпровідника *n*-типу SnO₂ для відновного газу [7]

У напівпровідника *p*-типу (рис. 1.12) адсорбція кисню призведе до збільшення провідності через надмірну концентрацію носіїв, а основними носіями заряду є дірки. Це викликано тим, що електрони забираються з валентної зони, що призводить до генерації додаткових дірок. У результаті біля поверхні формується шар накопичення дірок, що робить матеріал у повітрі більш провідним (опір знижується).

У разі появи відновлювального газу механізм діє у зворотному напрямку:

1. Газ реагує з адсорбованим киснем, вивільняючи електрони.
2. Ці електрони рекомбінують із дірками у шарі накопичення, зменшуючи їх концентрацію.
3. Внаслідок зменшення кількості основних носіїв (дірок) провідність падає, а електричний опір зростає [34], [35].

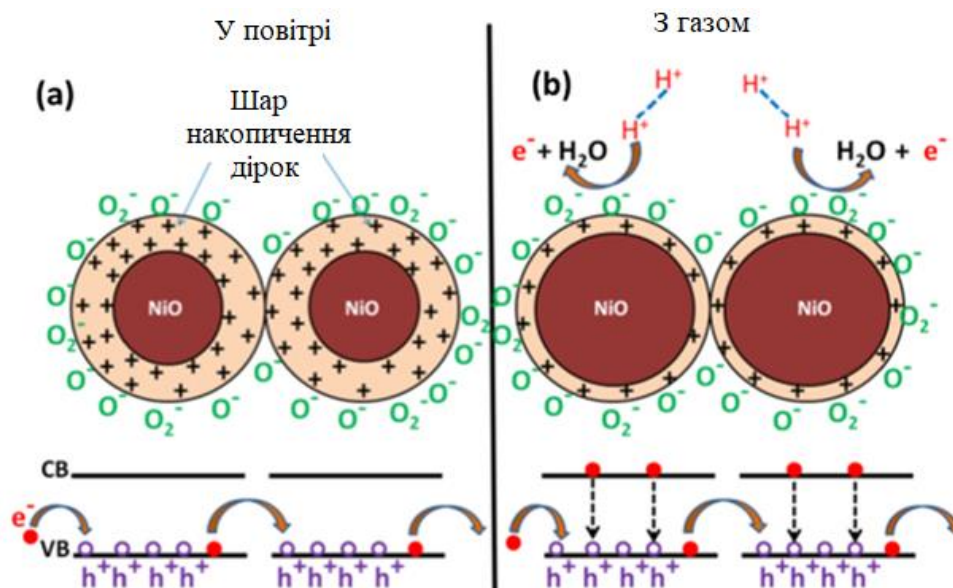
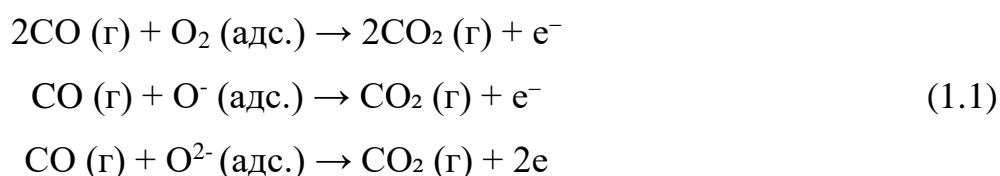


Рисунок 1.11 – Схема механізму вимірювання газоподібного водню для сенсора на основі напівпровідника *p*-типу NiO (a) у повітрі, (b) у водні [33]

Відновлювальні гази, такі як H_2S , NH_3 , H_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ та CO , вивільняють електрони, проходячи через поверхню оксиду металу, внаслідок взаємодії між газами та десорбуючими іонами кисню на поверхні металу. У результаті змінюється щільність носіїв заряду, що змінює провідність сенсорного шару.

CO – це не подразливий газ, безбарвний і без запаху, легкий порівняно з повітрям. Неповне згоряння більшості органічних сполук є основним джерелом газу CO [36]. Однак CO може виділятися внаслідок пожеж, вихлопних газів автомобілів, диму та систем опалення. CO – це відновлювальний газ, який з'єднується з іонами кисню, абсорбованими на поверхні оксиду металу, що призводить до надлишку електронів на поверхні оксиду. Ця реакція представлена у рівняннях (1.1):



H_2 — це дуже легкий газ за своєю природою. Він без запаху, смаку, кольору та легкозаймистий. Водень — це нетоксичний газ, який є найпоширенішим

елементом у природі. H_2 осідає на поверхні сенсорної плівки, де він взаємодіє з адсорбованим киснем, вивільняючи електрони у зону провідності.



Ефективність описаних вище окислювально-відновних реакцій критично залежить від умов навколишнього середовища, насамперед від температури та вологості. Робоча температура є визначальним параметром для кінетики поверхневих реакцій. Залежність чутливості сенсора від температури зазвичай має дзвоноподібну форму з чітко вираженим максимумом. Це явище пояснюється конкуренцією двох протилежних процесів:

1. У разі низьких температур енергії недостатньо для подолання активаційного бар'єра реакції, тому кінетика взаємодії є повільною.
2. Занадто високих температур переважає процес десорбції молекул газу з поверхні ще до того, як вони встигнуть прореагувати, що знижує ефективність детектування. Саме тому для кожного напівпровідникового матеріалу існує оптимальна робоча температура, за якої чутливість є максимальною [35].

Вплив вологості є невід'ємним фактором навколишнього середовища, який суттєво погіршує робочі характеристики напівпровідникових газових сенсорів, зокрема їх чутливість та стабільність. Молекули водяної пари конкурують із цільовим газом за активні центри на поверхні оксиду металу, що призводить до конкурентної адсорбції та утворення стабільних гідроксильних груп (OH^-), що може змінювати базовий опір, перешкоджати процесам переносу заряду та вносити мінливість у відгук сенсора. Ці хемосорбовані групи блокують поверхню для подальших окислювально-відновних реакцій. У контексті польових структур цей ефект особливо виражений, оскільки адсорбована вода генерує поверхневий заряд, який екранує потенціал затвора. Це екранування призводить до зниження ефективної модуляції струму у каналі транзистора, зменшуючи співвідношення сигнал/шум і викликаючи дрейф порогової напруги.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Сенсори газу мають критичне значення для багатьох галузей: від контролю промислових викидів та екологічного моніторингу до медичної діагностики. Технологія польових структур перебуває у стані постійного вдосконалення, а різноманіття нових методів та архітектурних рішень дозволяє створювати на їх основі все більш ефективні та чутливі прилади.
2. Робота сучасних напівпровідникових матеріалів суттєво залежить від умов розсіювання носіїв заряду. У сильних електричних полях, характерних для польових транзисторів, розсіювання стає значною причиною, яка обмежує дрейфову швидкість і впливає на точність роботи приладу.
3. Для порівняльного аналізу характеристик напівпровідників було обрано оксид галію та нітрид галію. GaN є прикладом широкозонного напівпровідника групи A^3B^5 , що дозволяє оцінити специфіку роботи оксидного сенсора на фоні класичної нітридної технології.

2 АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ

Для роботи використана базова аналітична модель сенсору газу розроблена на основі метал-напівпровідникового польового транзистору (MESFET) модифікованого під сенсор газу для стаціонарного випадку [37].

Наукова новизна та практична цінність даного дослідження полягають у переході від моделювання окремого приладу до створення універсального інструменту для порівняльного аналізу сенсорів на основі різнорідних широкозонних напівпровідників. Якщо на попередніх етапах досліджень [38] було розглянуто базову модель і SiC-MESFET виключно для оксиду галію ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) з використанням спрощених параметрів переносу, то зараз ставиться за мету вирішення двох більш складних завдань: врахування розсіювання внаслідок впливу сильного поля та розширення моделі для опису матеріалів з принципово відмінними механізмами газочутливості.

Дослідження охоплює два ключові матеріали: оксидний напівпровідник $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ та сполуку групи A^3B^5 — нітрид галію (GaN). Такий вибір дозволяє провести порівняльний аналіз структур із фундаментально різними механізмами сенсорного відгуку, що висуває підвищені вимоги до адаптивності математичної моделі.

Критичним етапом вдосконалення базової моделі є відмова від наближення постійної рухливості електронів. Оскільки обидва досліджувані матеріали є широкозонними і призначені для роботи у разі високих напруг, ігнорування ефекту насичення дрейфової швидкості призводить до значних похибок у розрахунках струму. Для адекватного опису роботи польового транзистора у режимі насичення необхідно врахувати, що дрейфова швидкість носіїв заряду не зростає лінійно з прикладеною напругою. Тому у цьому розділі описано впровадження у модель алгоритму розрахунку польової залежності рухливості $\mu(E)$, що дозволяє коректно відтворити вольт-амперні характеристики як для $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, так і для GaN у режимі сильних полів.

2.1 Базова аналітична модель

Один з підходів до розрахунку вольт-амперних характеристик (ВАХ) польових транзисторів базується на аналітичній моделі, що розглядає провідний канал як резистор зі змінним поперечним перерізом, що зображено на рисунку 2.1. Базова модель описує залежність струму стоку I_D від напруг на затворі V_G та стоці V_D .

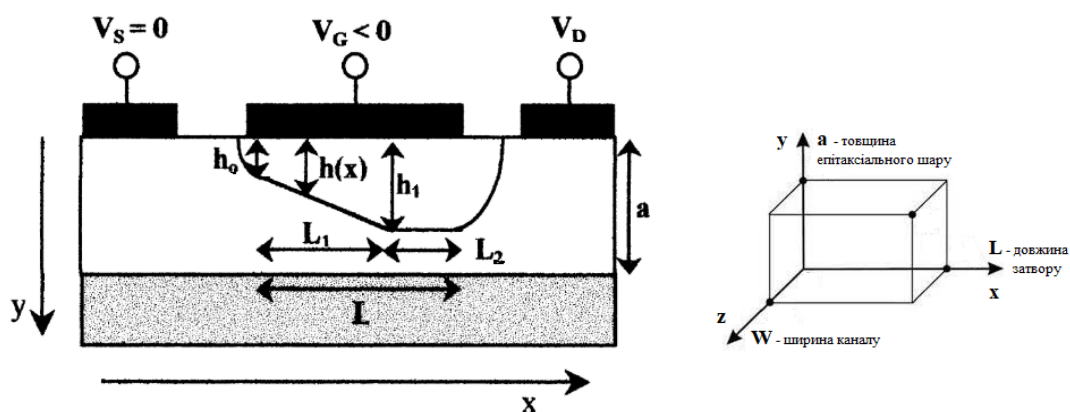


Рисунок 2.1 – Поперечний переріз приладу у режимі насичення [38]

Відповідно до емпіричної моделі Кохі–Томаса залежність рухливості електронів μ від напруженості електричного поля E у базовій моделі розраховувалася з використанням усереднені табличних значень напівпровідникових матеріалів і описана як:

$$\mu(E) = \frac{\mu_0}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0 E}{v_s}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}}, \quad (2.1)$$

де μ_0 – низькопольова рухливість електронів [$\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$];

v_s – дрейфова швидкість насичення носіїв заряду у каналі [m/s];

β – параметр налаштування [-].

Нехай для малого зміщення швидкість електронів у каналі не досягає свого значення насичення і перекриття каналу не відбудеться. У стаціонарному режимі, коли напруга на стоці не перевищує напругу насичення, вихідний струм стоку описується рівнянням, яке враховує геометричну форму збідненої області:

$$I_D(V_G, V_D) = I_P \frac{3(u_d^2 - u_0^2) - 2(u_d^3 - u_0^3)}{1 + Z(u_d^2 - u_0^2)}, \quad (2.2)$$

де $u_0 = u_0(V_G) = \sqrt{\frac{(V_G - V_D)}{V_P}}$ – ширина збідненого шару h_0 на кінці каналу стоку, а $u_d = u_d(V_D) = \sqrt{\frac{(V_D + V_G + V_D)}{V_P}}$ – ширина збідненого шару h_l на кінці каналу витоку,

де V_G – величина від'ємного зміщення на затворі;

V_D – зміщення стоку;

V_{bi} – вбудований потенціал для затвора Шотткі.

У різних моделях польових транзисторів вбудований потенціал для затвора Шотткі (V_{bi}) часто приймається як фіксована константа ($\sim 0,8$ В) або розраховується на основі різниці робіт виходу, що дозволяє дослідити вплив різних металів на вихідні характеристики. Використовуючи наближення Шотткі-Мотта, він визначається як:

$$V_{bi} = \phi_M - \chi_s, \quad (2.3)$$

де ϕ_M – робота виходу електрона з металу;

χ_s – електронна спорідненість напівпровідника.

Рівняння струму стоку (2.2) також містить три ключові коефіцієнти, які несуть у собі фундаментальні фізичні та геометричні параметри транзистора. У базовій моделі ці коефіцієнти розраховуються один раз і вважаються константами протягом усього моделювання ВАХ.

1. Напруга відсічки V_P – це напруга на затворі, за якої збіднений шар поширюється на всю товщину каналу, що призводить до його повного перекриття і, теоретично, до припинення струму.

$$V_P = \frac{qN_D a^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (2.4)$$

де q – заряд електрона,

N_D – концентрація донорної домішки;

a – товщина провідного каналу епітаксіального шару напівпровідника;

ε – діелектрична проникність напівпровідника,

ε_0 – діелектрична проникність вакууму;

2. Струм відсічки I_P – це параметр, що виступає як коефіцієнт масштабування для струму стоку і фізично пов'язаний з максимальним струмом, який може протікати через повністю відкритий канал.

$$I_P = \frac{q^2 N_D \mu_0 W a^3}{6\varepsilon\varepsilon_0 L}, \quad (2.5)$$

де W – ширина каналу,

L – довжина затвору.

3. Параметр насичення Z – це безрозмірний коефіцієнт, що є поправочним членом у знаменнику рівняння струму. Він включає у модель спрощений механізм урахування насичення швидкості дрейфу носіїв заряду у сильних полях. Його наявність дозволяє моделі якісно описувати перехід від лінійної ділянки ВАХ до ділянки насичення.

$$Z = \frac{qN_D \mu_0 a^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 L v_s} \quad (2.6)$$

Ключовим недоліком цієї моделі було використання константної низькопольової рухливості (μ_0) для розрахунку визначальних параметрів, таких як струм відсічення (I_P) та параметр Z .

Модель постійної рухливості електронів є адекватною апроксимацією лише для приладів з довгим каналом, де напруженість електричного поля у каналі залишається достатньо низькою. У більшості сучасних напівпровідникових приладів, особливо у транзисторах на основі широкозонних матеріалів ця умова не виконується.

У разі подання високих напруг на стік (V_D), особливо у режимі насичення, електричне поле у каналі стає надзвичайно сильним. Тоді фізика руху носіїв заряду докорінно змінюється через:

1. Ефекти розсіювання. Рухливість перестає бути константою і починає сильно залежати від поля. Домінуючими стають складні механізми розсіювання, такі як розсіювання на полярних оптичних фонах та неполярних фонах, які ефективно гальмують носії заряду.

2. Насичення швидкості. За певного критичного поля дрейфова швидкість електронів перестає зростати лінійно і виходить на насичення.

3. Негативна диференціальна рухливість. У багатьох широкозонних напівпровідникових матеріалів за подальшого збільшення поля швидкість може навіть почати зменшуватися, що призводить до появи ділянки з негативною диференціальною рухливістю.

4. Теплові ефекти. Високі поля призводять до значного розігріву приладу, що, у свою чергу, додатково знижує рухливість носіїв.

Використання константної рухливості μ_0 ігнорує всі ці критичні ефекти сильного поля. Це призводить до суттєвої похибки у моделюванні, особливо в режимі насичення. Для адекватного опису польового транзистора необхідна модернізація моделі, яка б враховувала залежність рухливості від електричного поля $\mu(E)$.

2.2 Модернізація аналітичної моделі

Модернізація існуючої аналітичної моделі виконуватиметься шляхом впровадження у неї фізично обґрунтованої залежності рухливості від напруженості електричного поля. Замість використання фіксованої константи μ_0 , вводимо динамічну, залежну від поля рухливість $\mu(E)$. Логіка полягає у тому, щоб на кожному кроці розрахунку ВАХ обчислювати нове, коректне значення рухливості, що відповідає поточним умовам у каналі приладу, тобто $\mu(E) = f(E)$.

Для аналітичного опису цієї залежності використано емпіричну апроксимацію моделі Кохі–Томаса, яка дозволяє математично відтворити плавний перехід від лінійної ділянки зростання швидкості до повного її насичення. Рухливість залежна від поля $\mu(E)$ для кожної ітераційної точки напруги на стоці V_D розраховується як:

$$\mu(E) = \frac{v_s}{E}, \quad \text{де } E = \frac{V_D}{L} \quad (2.7)$$

Для розрахунку дрейфової швидкості насичення v_s можна використати більш складну апроксимацію:

$$v_s = \mu_a E \left(\frac{300}{T} \right) \frac{1 + \frac{v_{nx} \cdot E^3}{(\mu_a \cdot E_{0x} \cdot (1 - 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot T))}}{1 + \left(\frac{E}{E_{0x}} \right)^4} \quad (2.8)$$

де $\mu_a = \frac{\mu_{0x}}{1 + \sqrt{\frac{N_D}{10^{23}}}}$ – скоригована низькопольова рухливість.

Ця апроксимаційна формула враховує температуру кристалічної ґратки T , концентрацію донорної домішки N_D та емпіричні індивідуально налаштовані

параметри для кожного напівпровіднику, а саме низькопольову рухливість носіїв заряду μ_{0x} , дрейфову швидкість насичення v_{nx} та критичну напруженість поля E_{0x} .

Розраховане значення $\mu(E)$ (яке тепер унікальне для кожного V_D) динамічно підставляється у рівняння струму відсічки (2.5) та параметру насичення (2.6) моделі замість константи μ_0 , і це виглядає як:

$$I_P = \frac{q^2 N_D \mu_E W a^3}{6 \epsilon \epsilon_0 L}; \quad Z = \frac{q N_D \mu_E a^2}{2 \epsilon \epsilon_0 L v_s} \quad (2.9)$$

Замість статичної системи з фіксованими параметрами вона перетворюється на щодо залежну рухливість від напруженості електричного поля. Тепер ключова властивість матеріалу (рухливість) і параметри моделі I_P та Z стають не константами, універсальними для всього діапазону робочих напруг, а функціями від електричного поля $I_P(E)$ та $Z(E)$ і перераховуються для кожної окремої точки на вольт-амперній характеристиці. Це дозволяє моделі враховувати нелінійне зниження рухливості та насичення струму у сильних полях, що є значним кроком щодо удосконалення математичної моделі.

Також такий підхід дає можливість краще описувати, як чутливість сенсора S залежить не лише від концентрації газу, але й від складних нелінійних ефектів розсіювання у сильних полях, що, у свою чергу, дозволяє досліджувати її залежність від температури (T) та рівня легування (N_D).

2.3 Вдосконалення моделі сенсору газу

У процесі розроблення аналітичної моделі газочутливих польових структур важливо розрізняти способи реєстрації вихідного сигналу. Для цілей даного дослідження доцільніше розглядати структуру в амперометричному режимі, де інформативним параметром є сила струму стоку за фіксованих напруг зміщення. У цьому режимі напівпровідниковий сенсор розглядається як керований резистор, геометричні параметри якого (ефективний переріз каналу) змінюються під впливом хімічних реакцій.

Фізичний механізм детектування базується на ефекті модуляції ширини збідненої області внаслідок хемосорбції. Однак локалізація цієї взаємодії критично залежить від типу напівпровідникового матеріалу, що вимагає диференційованого підходу до визначення площі активної поверхні ($S_{\text{площа}}$) у математичній моделі, що також зображено на рис.2.2.

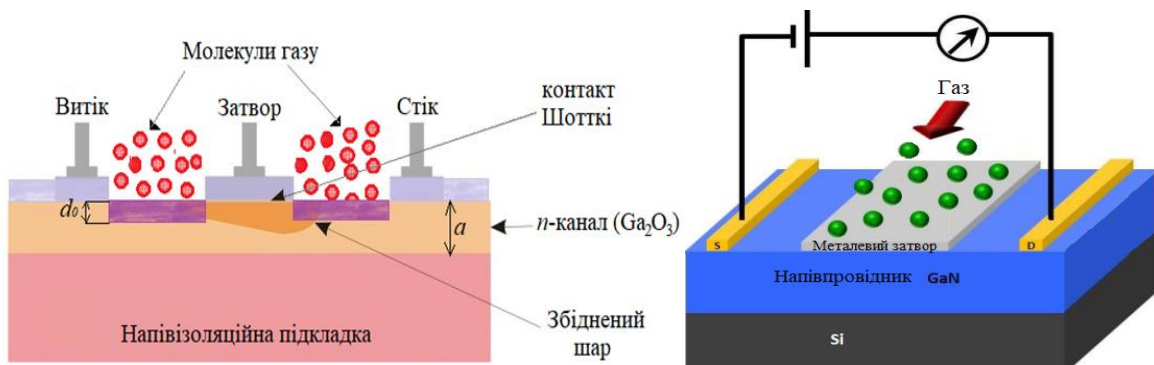


Рисунок 2.2 – Сенсори газу (а) на основі Ga_2O_3 [37], (б) на основі GaN [39]

Сенсори на основі Ga_2O_3 (рис. 2.2 а) належать до класу хеморезистивних приладів, де адсорбція молекул газу відбувається безпосередньо на відкритій поверхні каналу. У цій конструкції металевий електрод затвора є непроникним для газу і фактично екранує частину напівпровідника, що знаходиться під ним. Тому активною областю є лише відкриті ділянки доступу між електродами.

Натомість для сенсора на основі GaN (рис. 2.2 б) ця поверхня не взаємодіє з газом через інертність матеріалу, сенсорний ефект реалізується виключно завдяки

каталітичному металу затвора. Газ дисоціює на поверхні металу, а атоми дифундують до межі розділу «метал–напівпровідник», змінюючи висоту бар'єра Шотткі. У цьому випадку активною областю є саме зона контакту, тому площа чутливої поверхні дорівнює площі затвора.

Відповідно формули для визначення площі чутливої поверхні запишуться:

$$\begin{aligned} S_{\text{площа}}(\text{Ga}_2\text{O}_3) &= W \cdot (L_{ds} - L), \\ S_{\text{площа}}(\text{GaN}) &= W \cdot L, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де W — ширина каналу,

L_{ds} — відстань витік-стік,

L — довжина затвора.

Отже, коли ця поверхня контактує з газом, відбувається хемосорбція молекул, які створюють локальні енергетичні стани на межі розділу фаз. Ці поверхневі стани діють як пастки для основних носіїв заряду (електронів для n -типу), захоплюючи їх з об'єму напівпровідника.

Внаслідок локалізації зарядів на поверхні, у приповерхневому шарі напівпровідника формується область просторового заряду (ОПЗ), збіднена носіями. Тобто молекули газу, адсорбуючись на поверхні, створюють заряд, що призводить до виникнення поверхневого потенціалу. Утворена збіднена зона має високий електричний опір і фактично є діелектричною оболонкою, яка не бере участі у протіканні струму. Глибина цієї збідненої зони не є константою, а прямо залежить від концентрації газу: чим більше молекул адсорбується, тим більше електронів захоплюється, і тим глибше поширюється збіднена область всередину матеріалу.

Оскільки фізична товщина напівпровідникової плівки залишається незмінною, розширення збідненої зони призводить до автоматичного звуження активної частини — провідного каналу, по якому рухаються носії заряду між витоком і стоком. Це явище можна порівняти зі зменшенням діаметра труби, через яку протікає рідина. Звуження ефективного перерізу каналу призводить до

зростання його опірності та, відповідно до закону Ома, до зменшення вихідного струму сенсора.

У моделі цей процес описується рівняннями (2.11) - (2.13):

1. Поверхневий потенціал розраховується на основі концентрації адсорбованих іонів:

$$\varphi_s = \frac{(eN_i)^2}{2N_d \epsilon \epsilon_0} + kT, \quad (2.11)$$

де φ_s – поверхневий потенціал [В];

N_i – поверхнева щільність адсорбованих іонів кисню [м^{-2}];

N_d – концентрація іонів донорної домішки і вакансій кисню в плівці напівпровідника [м^{-3}];

k – стала Больцмана.

2. Цей потенціал створює додатковий збіднений шар (дебаївський радіус екранування) товщиною:

$$d_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(e\varphi_s - kT)}{e^2 N_d}} \quad (2.12)$$

3. Ефективна товщина провідного каналу зменшується до величини:

$$a_d = a - d_0 \quad (2.13)$$

У моделі ця нова зменшена товщина каналу підставлялася у формули струму відсічення I_P та опору Z на кожному кроці ітерації, щоб врахувати вплив газу. Розрахунок проводиться за $V_G = 0$, щоб виділити забезпечити роботу сенсора, де модуляція струму відбувається лише за рахунок адсорбції газу.

Для кількісної оцінки ефективності приладу вводиться поняття чутливості сенсора S , яке у загальному вигляді визначається як зміна вихідного струму I_{ds} по відношенню до зміни поверхневої концентрації адсорбованих молекул газу N_i :

$$S = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta N_i}, \quad (2.14)$$

де S – чутливість сенсора,

$\Delta I_{ds} = |I_{d2} - I_{d1}|$ – зміна сили струму [A],

$\Delta N_i = (N_{i2} - N_{i1})$ – зміна поверхневої концентрації молекул газу [м⁻²].

Варто уточнити, що у рамках даного комп'ютерного моделювання, де аналіз проводиться з дискретними параметрами, ця похідна (2.9) реалізується чисельно. Модель розраховує вихідний струм I_{d1} для початкової концентрації газу N_{i1} та струм I_{d2} для кінцевої концентрації N_{i2} .

Для практичного застосування зручніше використовувати відносний відгук сенсора (Response), який показує зміну струму у відсотках відносно базового рівня. Формула розрахунку залежить від типу газу, оскільки механізми їхньої дії є протилежними.

Адсорбція окислювальних газів на поверхні напівпровідника n -типу призводить до захоплення вільних електронів і розширення збідненої області, що зменшує струм стоку. Тому відгук сенсору на газ розраховується як падіння струму відносно його значення за відсутності газу:

$$\text{Відгук}_{\text{окисн.}} = \frac{I_{\text{повітря}} - I_{\text{газ}}}{I_{\text{повітря}}} \times 100\%, \quad (2.15)$$

де $I_{\text{повітря}}$ – базовий струм стоку за відсутності цільового газу (або у чистому повітрі);

$I_{\text{газ}}$ – струм стоку за наявності газу заданої концентрації.

Варто зазначити що діапазон відгуку для окисників фізично обмежений. Струм у середовищі газу ($I_{газ}$) не може бути меншим за нуль. Граничним випадком є повне перекриття каналу збідненою областю, коли струм припиняється. Тому максимальний теоретичний відгук на окисник не може перевищувати 100%.

Для газів-відновників механізм є принципово іншим і базується на ефекті рекомбінації. Важливо розуміти, що у нормальних атмосферних умовах поверхня оксидного напівпровідника вже не є "чистою" — вона вкрита шаром хемосорбованого кисню (іонів O^- або O^{2-}), який створює початкову щільність поверхневих станів кисню у чистому повітрі або базовий заряд $N_{баз}$. Цей заряд формує вихідну збіднену область ще до подачі цільового газу. Молекули газу-відновника вступають у хімічну реакцію з цим поверхневим киснем. У результаті електрони, що утримувалися киснем, повертаються назад у зону провідності. Це означає, що сумарний негативний заряд на поверхні зменшується. Для опису цього процесу вводиться поняття ефективної концентрації заряду ($N_{еф}$), що розраховується як різниця між базовим зарядом та величиною зменшення заряду ΔN_i внаслідок дії відновника:

$$N_{еф} = N_{баз} - \Delta N_i \quad (2.16)$$

Зменшення $N_{еф}$ призводить до звуження збідненої області та відповідно зростання струму. Оскільки цей процес фактично "відмикає" раніше перекритий канал, струм може зрости у кілька разів порівняно з базовим рівнем. Тому формула відгуку має вигляд:

$$\text{Відгук}_{\text{відновн.}} = \frac{I_{газ} - I_{повітря}}{I_{повітря}} \times 100\% , \quad (2.17)$$

Іншою важливою особливістю розробленої моделі є врахування фізичних умов відсічки (pinch-off), які визначають межі працездатності сенсора. Модель

враховує, що струм (а отже, і чутливість) може дорівнювати нулю, якщо виконується одна з двох умов:

1. Якщо концентрація газу N_i настільки висока, що розрахована товщина шару Дебая d_0 (2.7) перевищує початкову товщину каналу a , ефективна товщина a_d (2.8) стає нульовою або від'ємною. Це фізично означає, що канал повністю перекритий поверхневим зарядом від газу, і протікання струму неможливе.

2. Канал, вже звужений адсорбцією до товщини a_d , також знаходиться під дією вбудованого потенціалу V_{bi} (при $V_G = 0$). Модель розраховує напругу відсічення V_P для цієї нової товщини a_d за формулою (2.3). Якщо виявляється, що $V_{bi} \geq V_P$, це означає, що одного лише вбудованого потенціалу достатньо для повного перекриття каналу, який вже був звужений газом.

Врахування цих двох механізмів відсічки є критично важливим, оскільки дозволяє моделі прогнозувати не тільки робочі режими, але й умови повної втрати чутливості, що очікується за певних комбінацій низького легування N_D та високих напруг V_D .

2.4 Висновки до розділу 2

1. В аналітичній моделі польового транзистора замість сталої рухливості впроваджено її динамічний розрахунок залежно від напруженості електричного поля. Це дозволило врахувати ефекти розсіювання та насичення швидкості, що значно підвищило точність моделювання при високих напругах для широкозонних напівпровідників.
2. У моделі сенсору враховано відмінності напівпровідникових матеріалів у механізмах газочутливості через адаптацію геометричних параметрів каналу: для оксиду галію через його власну чутливу поверхню, а для інертного до газів нітриду галію через металевий затвор в якості рецептора.
3. Впроваджено розрахунок відгуку на різні типи газів, що дозволяє моделювати реакцію сенсора як на окисники (що призводять до додаткового збіднення каналу), так і на відновники (що викликають збагачення носіями заряду).

3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Параметри моделювання

У таблицях 3.1-3.3 показані параметри, які будуть використовуватися для моделюванні польового транзистора і сенсору газу на основі різних напівпровідникових матеріалів.

Таблиця 3.1 – Топологія приладу [37]

Параметр	MESFET	Сенсор газу
Ширина каналу, м	$10 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$
Товщина епітаксійного шару напівпровідника, м	$0,15 \cdot 10^{-6}$	
Довжина затвору, м	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Відстань між витоком і стоком, м		$10 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 3.2 – Характеристики напівпровідників [25]

Параметр	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	GaN
Площа чутливої поверхні сенсору, м^2	$8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Відносна діелектрична проникність, Σ	10	9
Електронна спорідненість, еВ	4	4,1
Температура ґратки, К	300	
Концентрація донорної домішки, м^{-3}	$5 \cdot 10^{23}$	
Поверхнева щільність адсорбованих молекул газу, м^{-2}	$1 \cdot 10^{16}$	
Вбудований потенціал для затвора Шоттки, В	0,8	

Таблиця 3.3 – Параметри апроксимації напівпровідників

Параметр	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	GaN
Низькопольова рухливість електронів, $\text{м}^2/\text{Вс}$	0,024	0.045
Дрейфова швидкість насичення електронів, м/с	$1,5 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$
Критична напруженість електричного поля, В/м	$1,6 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$

3.2 Моделювання поле-швидкісної характеристики

Результат розрахунків налаштованої апроксимаційної моделі залежності дрейфової швидкості від напруженості електричного поля на основі експериментальних даних для оксиду галію та нітриду галію зображений на рисунках 3.2.1 і 3.2.2

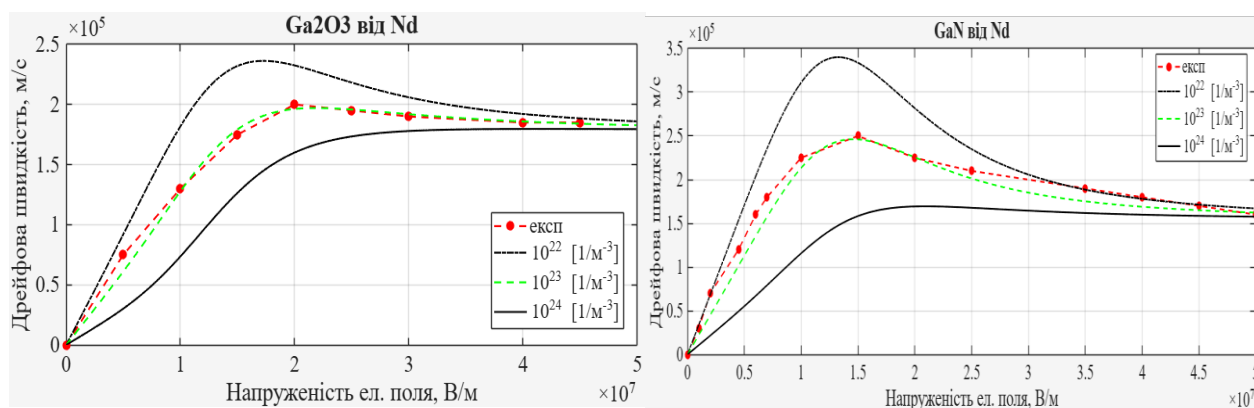


Рисунок 3.2.1 – Поле-швидкісна характеристика β -Ga₂O₃ та GaN у залежності від рівня легування донорами

Аналіз поле-швидкісних характеристик (рис. 3.2.1) підтвердив, що на відміну від GaN, який демонструє виражений пік швидкості завдяки високій початковій рухливості, для β -Ga₂O₃ характерне плавне монотонне насичення. Збільшення концентрації домішок очікувано пригнічує дрейфову швидкість в обох матеріалах внаслідок посилення розсіяння на іонізованих центрах, хоча GaN зберігає перевагу в абсолютних показниках.

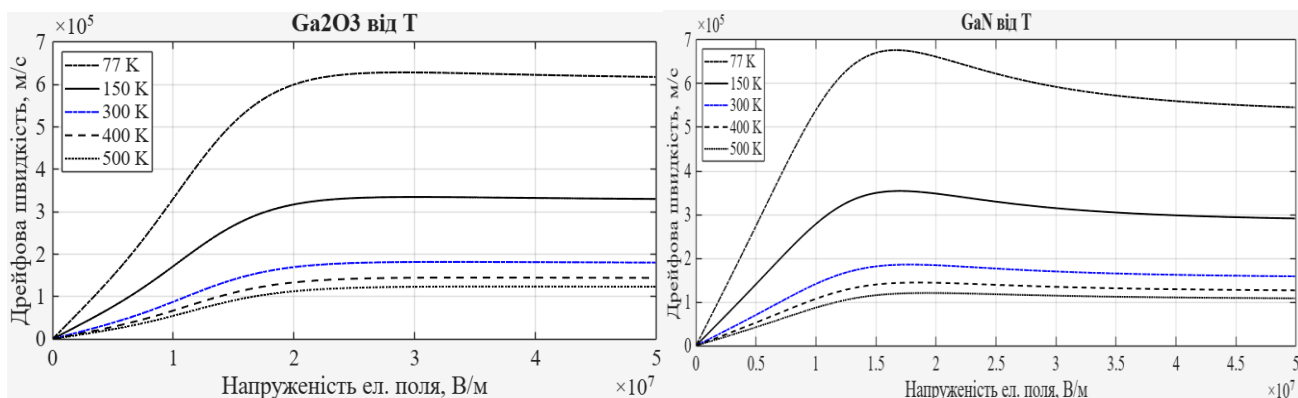


Рисунок 3.2.2 – Поле-швидкісна характеристика β -Ga₂O₃ та GaN у залежності від температури кристалічної ґратки

Температурна залежність (рис. 3.2.2) засвідчує домінування фононного механізму розсіювання у разі нагрівання: зі зростанням температури енергія коливань ґратки зростає, що ефективно гальмує електрони і знижує їхню швидкість. Помітно, що в області критично сильних полів транспортні характеристики β -Ga₂O₃ та GaN зближуються, нівелюючи початкову кінетичну перевагу нітриду.

Порівняльний аналіз графіків рухливості, отриманих за допомогою базової (рис. 3.2.3) та модернізованої (рис. 3.2.4) моделей, виявляє принципові відмінності у фізичних припущеннях, закладених в основу розрахунків.

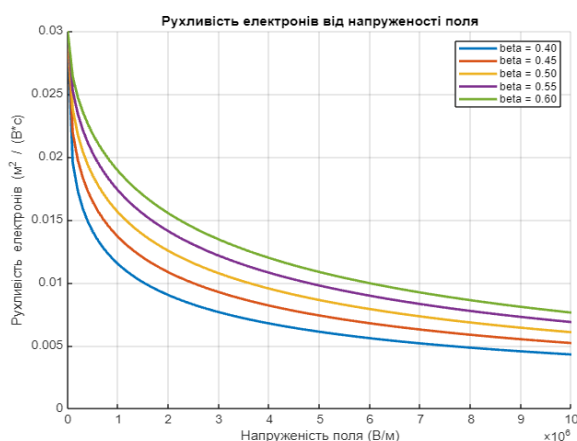


Рисунок 3.2.3 – Залежність рухливості електронів від напруженості електричного поля у базовій моделі Ga₂O₃ MESFET, розрахованої за емпіричною моделлю [37]

Базова модель, результати якої наведені на рис. 3.2.3, базується на емпіричній апроксимації і описує спрощений монотонний спад рухливості від ідеалізованого

початкового значення при зростанні напруженості поля. Такий підхід, хоч і відображає загальну тенденцію до насичення швидкості, ігнорує складні процеси взаємодії носіїв заряду з дефектами структури, що призводить до завищених оцінок провідності каналу.

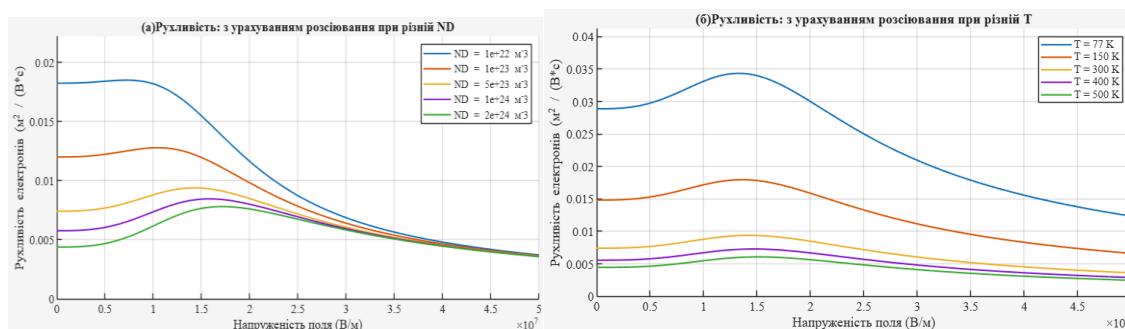


Рисунок 3.2.4 – Залежність рухливості електронів від електричного поля у модернізованій моделі Ga₂O₃ MESFET з урахуванням розсіювання: (а) за різних концентрацій домішок N_D ; (б) за різних температур T

Натомість модернізована модель (рис. 3.2.4) демонструє значно складнішу та фізично обґрунтовану поведінку, яка пояснюється конкуренцією двох механізмів розсіювання. На відміну від базової моделі, тут початкова рухливість за відсутності поля є значно нижчою, що зумовлено врахуванням розсіювання на іонізованих домішках, концентрація яких у каналі є високою. У разі збільшення напруженості електричного поля спостерігається нелінійне зростання рухливості з формуванням характерного піку, оскільки енергійні електрони менше взаємодіють з кулонівським потенціалом домішок. Однак у разі подальшого зростання поля домінуючим стає розсіювання на фонах (коливаннях ґратки), що спричиняє різкий спад рухливості.

Аналіз впливу температури підтверджує, що нагрів кристала суттєво посилює фонне розсіювання. Температура кристалічної ґратки T безпосередньо контролює його інтенсивність, тому її вплив є значним у всьому діапазоні полів.

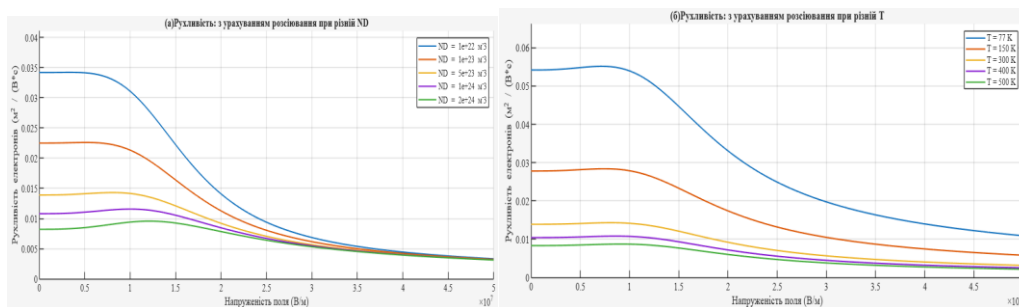


Рисунок 3.2.5 – Залежність рухливості електронів від електричного поля у модернізованій моделі GaN MESFET з урахуванням розсіювання для порівняння

Порівняння з нітридом галію, наведеним на рис.3.2.5 для співставлення, показує, що хоча загальний характер залежностей є схожим, GaN демонструє вищу пікову рухливість, проте Ga₂O₃ показує більш плавний перехід до режиму сильних полів, що є важливим для стабільності роботи приладу за високих напруг.

3.3 Моделювання ВАХ польового транзистора

Результат моделювання ВАХ транзистора у МАТЛАБ зображений на рис.3.3.1 Порівняльний аналіз вихідних характеристик, отриманих за допомогою базової моделі (рис. 3.3.1) та модернізованої моделі з урахуванням розсіювання (рис. 3.3.2), виявляє фундаментальний вплив врахування реальної фізики транспорту носіїв заряду на точність прогнозування параметрів приладу.

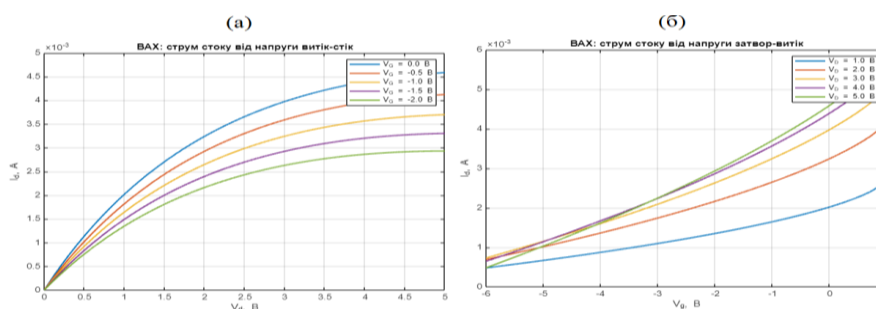


Рисунок 3.3.1 – ВАХ: (а) струм стоку від напруги джерела стоку (напруги між стоком і витокм U_{DS}), (б) струм стоку від напруги зміщення затвору (напруги між затвором і витокм U_{GS}) у базовій моделі Ga₂O₃ MESFET [37]

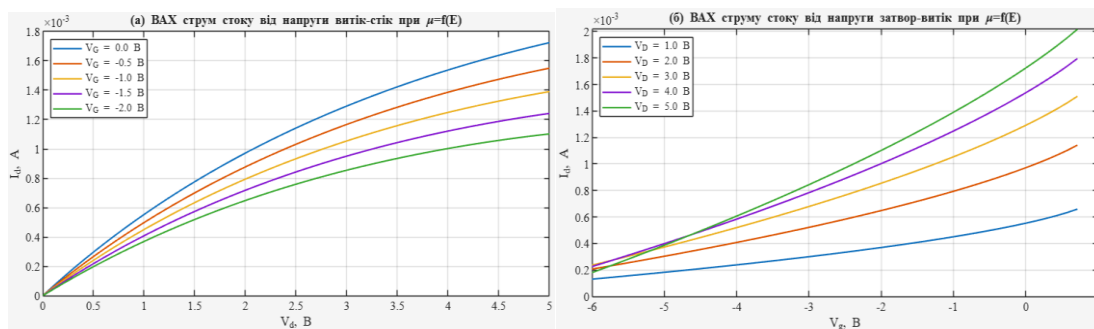


Рисунок 3.3.2 – ВАХ у моделі Ga_2O_3 MESFET з урахуванням розсіювання: (а) струм стоку від напруги джерела стоку (напруги між стоком і витоком U_{DS}); (б) струм стоку від напруги зміщення затвору (між затвором і витоком U_{GS})

Найбільш показовою відмінністю є абсолютна величина струму стоку. У базовій моделі (рис. 3.3.1, а), яка використовує ідеалізовану низькопольову рухливість, за нульового зміщення затвору та напрузі стоку 5 В струм сягає значення 4,5 мА. Натомість модернізована модель для того ж матеріалу $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (рис. 3.3.2, а) за ідентичних умов прогнозує струм лише на рівні 1,7 мА. Така суттєва розбіжність, що складає приблизно 2,65 рази, свідчить про те, що ігнорування ефектів розсіювання на іонізованих домішках та фононах у базовій моделі призводить до критичної переоцінки провідності каналу.

Окрім амплітудних значень, змінилася і сама форма кривих. Базова модель демонструє класичне «жорстке» насичення струму, де криві стають майже горизонтальними за напруг стоку вище 2,5 В. У модернізованій моделі перехід до області насичення є значно плавнішим, а повне вирівнювання струму досягається за вищих напруг. Це пояснюється тим, що у новій моделі рухливість є функцією електричного поля: зі зростанням напруги на стоці ефективна рухливість у каналі падає, що обмежує зростання струму ще до настання повного перекриття каналу, змінюючи класичну форму ВАХ. Аналіз передаточних характеристик (рис. 3.3.1, б та рис. 3.3.2, б) підтверджує, що модернізована модель прогнозує значно швидшу реакцію на затворну напругу, демонструючи менші струми у всьому діапазоні керуючих напруг.

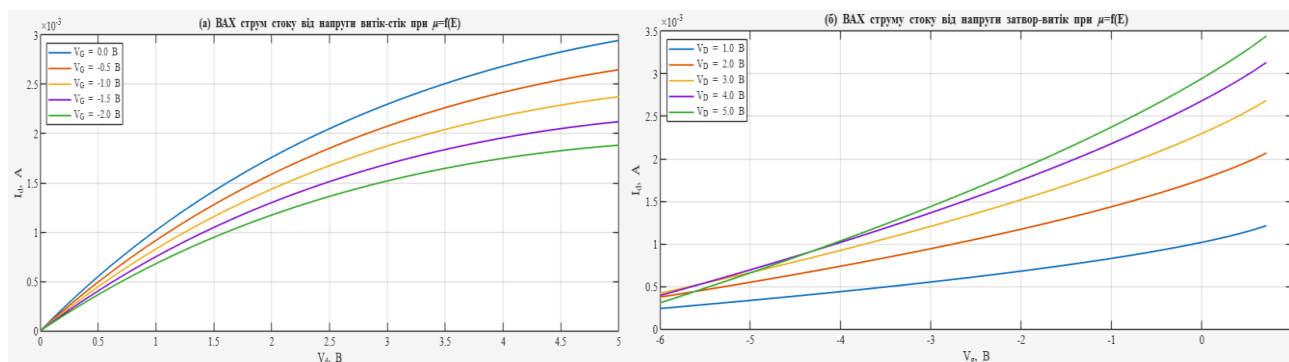


Рисунок 3.3.3 – ВАХ у моделі GaN MESFET з урахуванням розсіювання

Співставлення характеристик для оксиду галію та нітриду галію, розрахованих за єдиною модернізованою методикою, підтверджує перевагу нітридних структур у силових характеристиках. У разі однакових геометричних параметрів транзистор на основі GaN забезпечує максимальний струм близько 3 мА, що майже вдвічі перевищує показник для β -Ga₂O₃ (1,7 мА). Це є прямим наслідком вищої рухливості електронів у нітриді галію, що дозволяє досягати режиму насичення за менших напруг стоку та забезпечувати менший опір відкритого каналу, хоча оксид галію демонструє кращу стійкість до зростання напруги без ознак пробоя.

3.4 Моделювання характеристик сенсору газу

На цьому етапі було проведено моделювання модернізованої моделі сенсора газу на основі оксиду галію та нітриду галію. ВАХ та аналіз чутливості приладу у залежності від ключових параметрів зображені на рисунках 3.4.1-3.4.8.

Результати моделювання сенсорних характеристик модернізованої моделі для обох матеріалів демонструють чітку залежність вихідного струму від типу та концентрації газу. Деякі приклади результатів інших досліджень щодо сенсорів газу показані на рисунку 3.4.9.

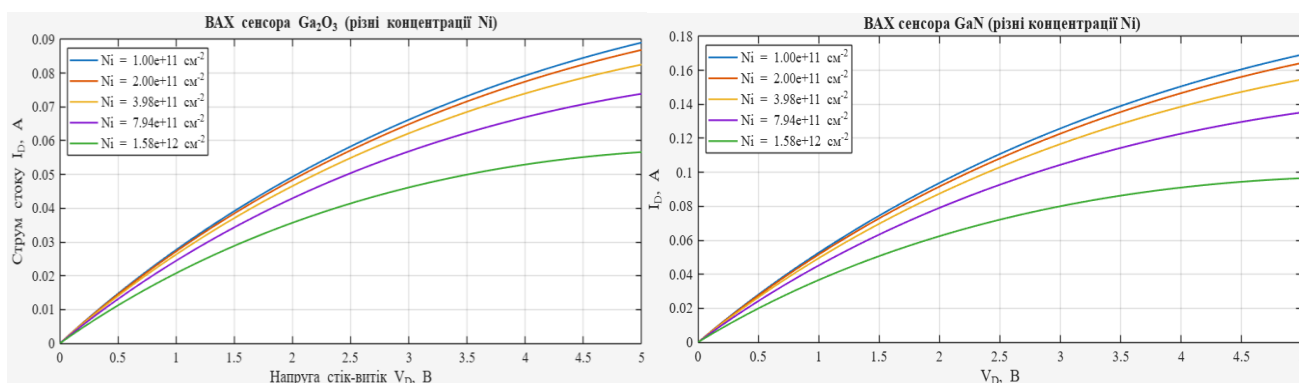


Рисунок 3.4.1 – Графіки залежності струму стоку від напруги стік-витік за різних концентрацій адсорбованих молекул газу-окисника у модернізованій моделі сенсорів Ga₂O₃ та GaN з урахуванням розсіювання

На рис. 3.4.1 для газу-окисника спостерігається зменшення струму стоку у разі збільшення концентрації адсорбованих молекул. Це пояснюється захопленням електронів та розширенням збідненої області, що звужує провідний канал. Важливо відзначити, що для Ga₂O₃ цей ефект реалізується через безпосередню взаємодію газу з відкритою поверхнею каналу площею $8 \cdot 10^{-9}$ м², тоді як у GaN активною є лише зона під затвором у 4 рази менша. Попри це GaN демонструє вищі абсолютні значення струму завдяки кращій рухливості носіїв, проте оксид галію показує порівнянну відносну зміну сигналу завдяки ефективній модуляції провідності у тонкому шарі.

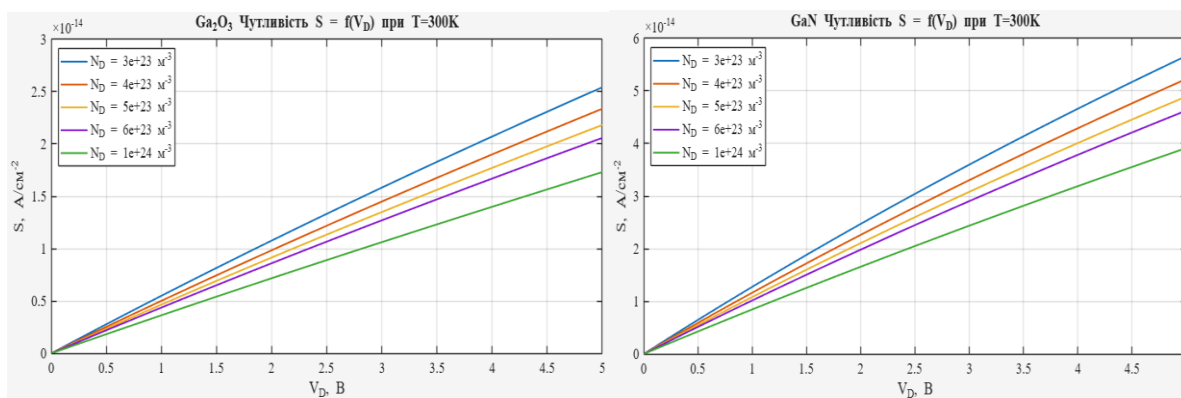


Рисунок 3.4.2 – Залежності чутливості сенсора від напруги стік-витік для різних рівнів легування каналу у модернізованій моделі сенсорів Ga_2O_3 та GaN для газу-окисника

Залежність чутливості від напруги на стоці (рис. 3.4.2) демонструє зростання чутливості у разі збільшення напруги, що підтверджує доцільність роботи сенсора в режимі насичення, де опір каналу є найбільш чутливим до змін поперечного перерізу. Спостерігається, що максимальна чутливість досягається законцентрацій домішок близько $4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Нижчі рівні легування є критичними через ймовірність повної відсічки струму власним вбудованим потенціалом ще до початку вимірювань.

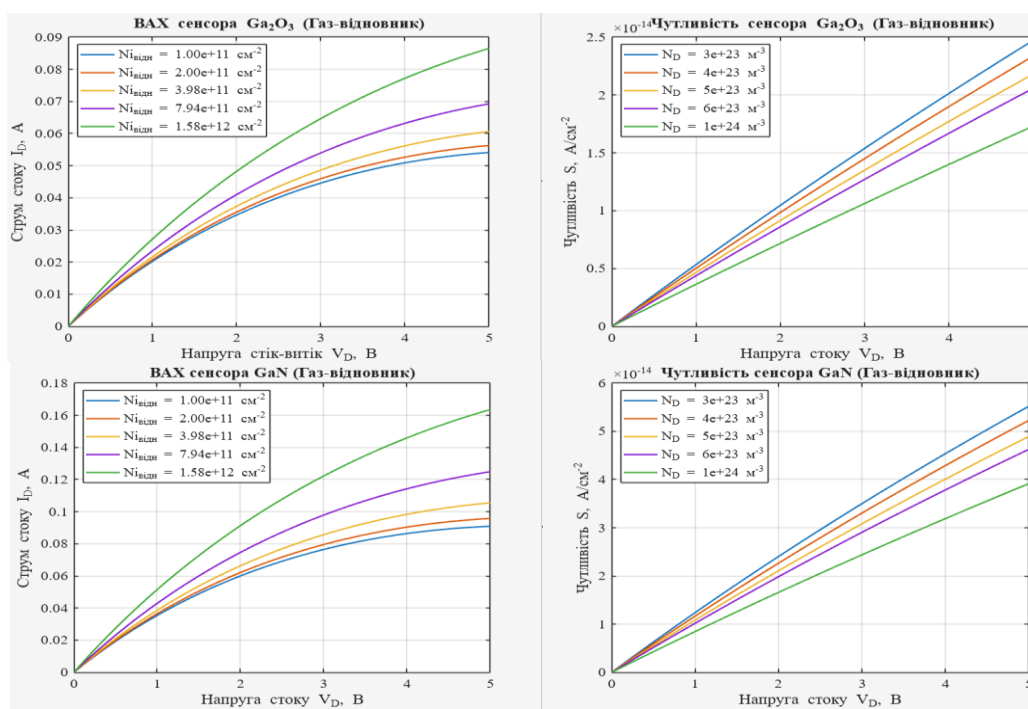


Рисунок 3.4.3 – Графіки залежності ВАХ та чутливості сенсорів Ga_2O_3 та GaN для газу-відновника

Діаметрально протилежна картина спостерігається для газу-відновника (рис. 3.4.3). Тут у разі збільшення концентрації струм зростає, оскільки відбувається вивільнення електронів назад у канал та зменшення початкового збіднення.

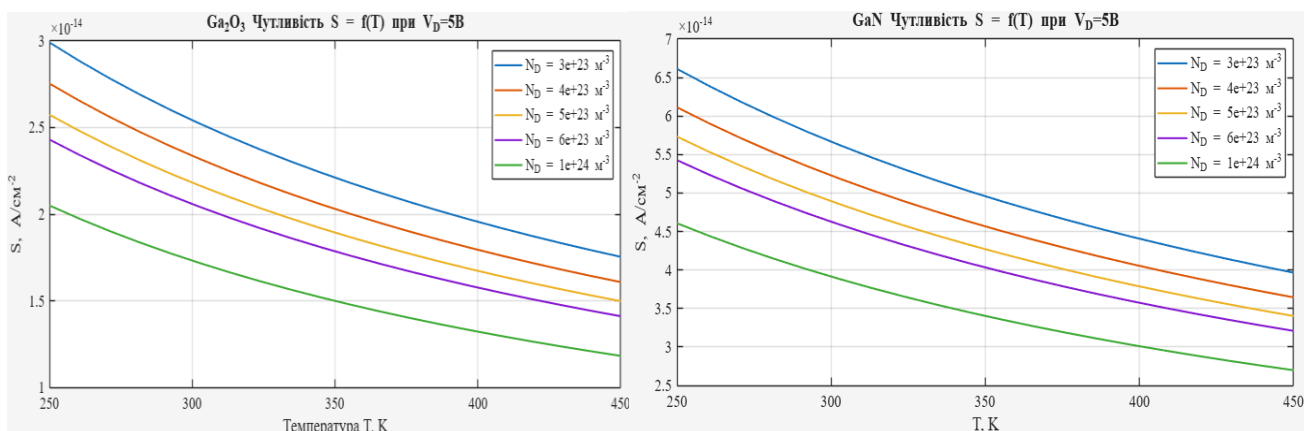


Рисунок 3.4.4 – Залежності чутливості сенсора від температури ґратки для різних рівнів легування каналу у модернізованій моделі сенсорів Ga₂O₃ та GaN для газу-окисника

Аналіз температурної стабільності на рис. 3.4.4 показує монотонне падіння чутливості у разі нагрівання для обох матеріалів. Це є наслідком конкуренції двох процесів: хоча хімічна кінетика прискорюється, домінування теплового розсіювання носіїв та посилення десорбції газу призводять до зниження корисного сигналу. Виражений пік оптимальної температури відсутній, тому що модель розглядає тільки стаціонарний стан (коли реакція вже відбулася) і припускає, що енергії достатньо для реакції навіть при низьких температурах.

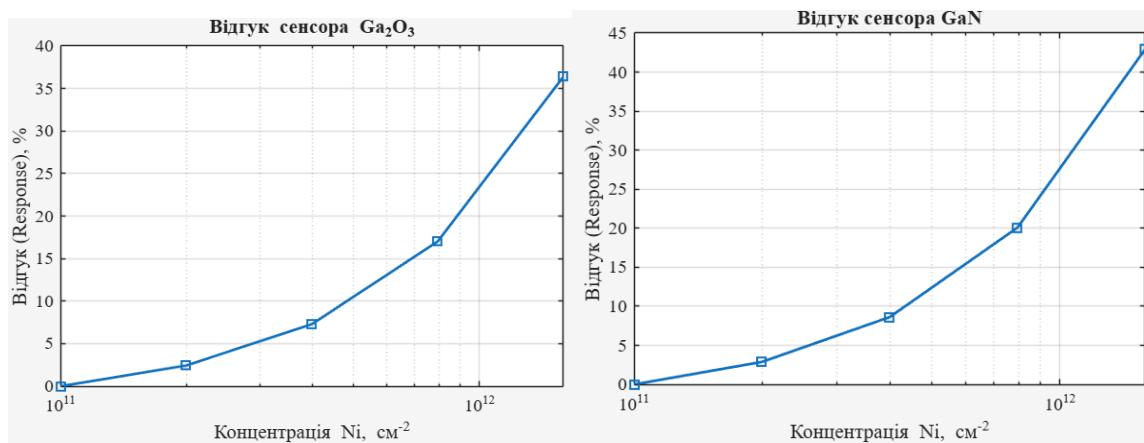


Рисунок 3.4.5 – Графіки залежності відносного відгуку сенсорів Ga₂O₃ та GaN на газ-окисник

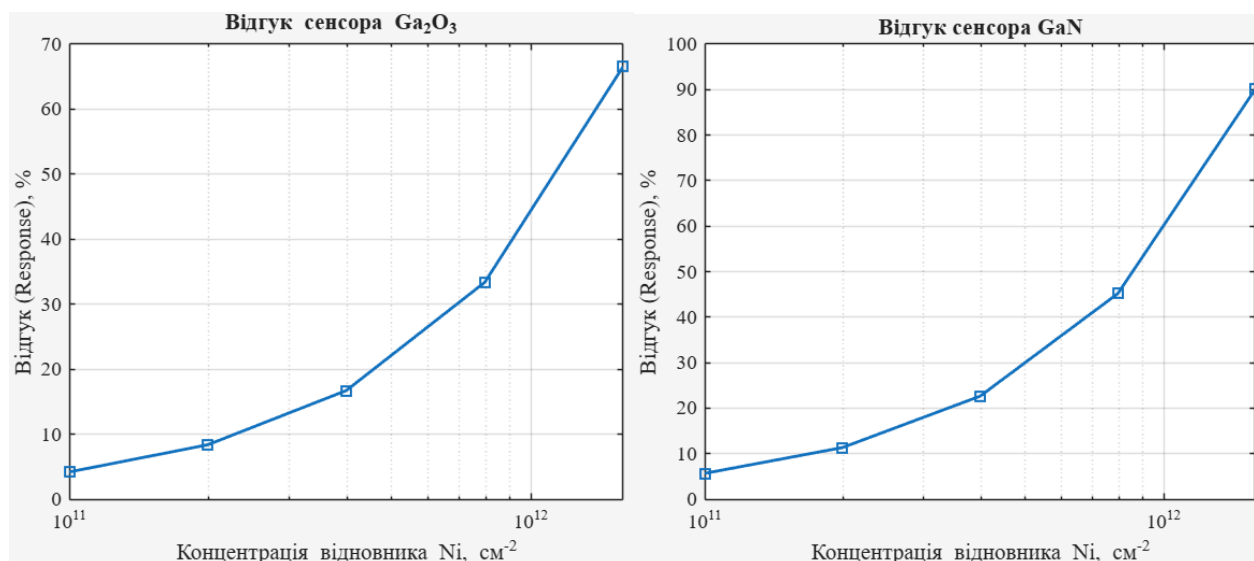


Рисунок 3.4.6 – Графіки залежності відносного відгуку сенсорів Ga₂O₃ та GaN на газ-відновник

Порівнюючи рис. 3.4.5 та рис. 3.4.7, можна констатувати суттєву асиметрію відгуку: реакція на відновник є значно сильнішою (до 90% для GaN та 68% для Ga₂O₃), ніж на окисник (43% та 36% відповідно). Це свідчить про те, що процес «відмикання» каналу відновником є енергетично ефективнішим за його подальше перекриття окисником.

Окрему увагу слід звернути на форму графіків відгуку (рис. 3.4.5 та 3.4.6). Отримані криві мають виражений експоненційний характер без виходу на насичення у досліджуваному діапазоні концентрацій. Порівнюючи це з результатами інших досліджень, наведеними на рис. 3.4.7, бачимо відмінності. Наприклад, на рис. 3.4.7 (б) експериментальна залежність для газу-окисника демонструє насичення, що пов'язано з вичерпанням доступних центрів адсорбції на поверхні реального зразка. Запропонована модель описує ідеалізований випадок, де кількість центрів адсорбції не є лімітуючим фактором, що теоретично забезпечує ширший динамічний діапазон. Водночас, графік на рис. 3.4.7 (в) показує більш складну, нелінійну поведінку, яка може бути зумовлена зернистістю плівки та впливом вологості, які у даній ідеальній моделі не враховувалися.

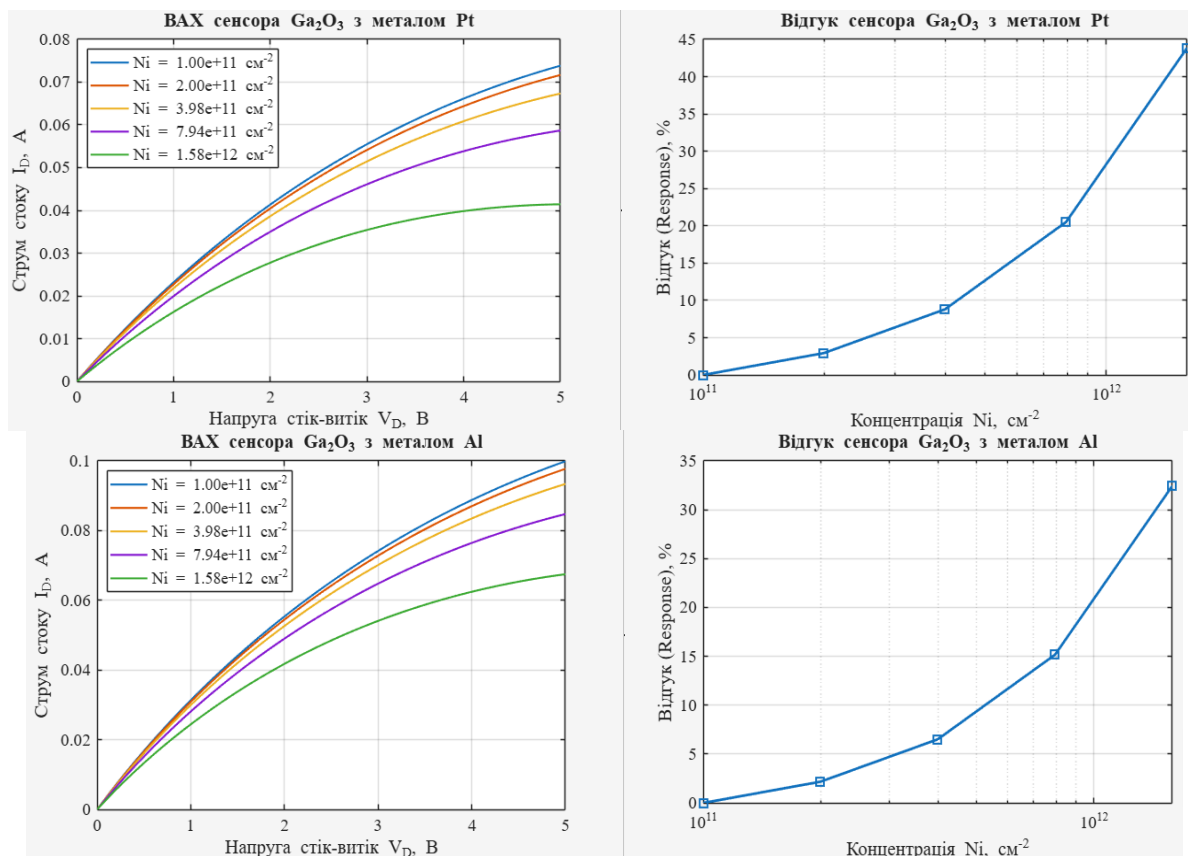


Рисунок 3.4.7 – Графіки залежності ВАХ та відгуку сенсору Ga₂O₃ для газу-окисника з металами на затворі Pt та Al

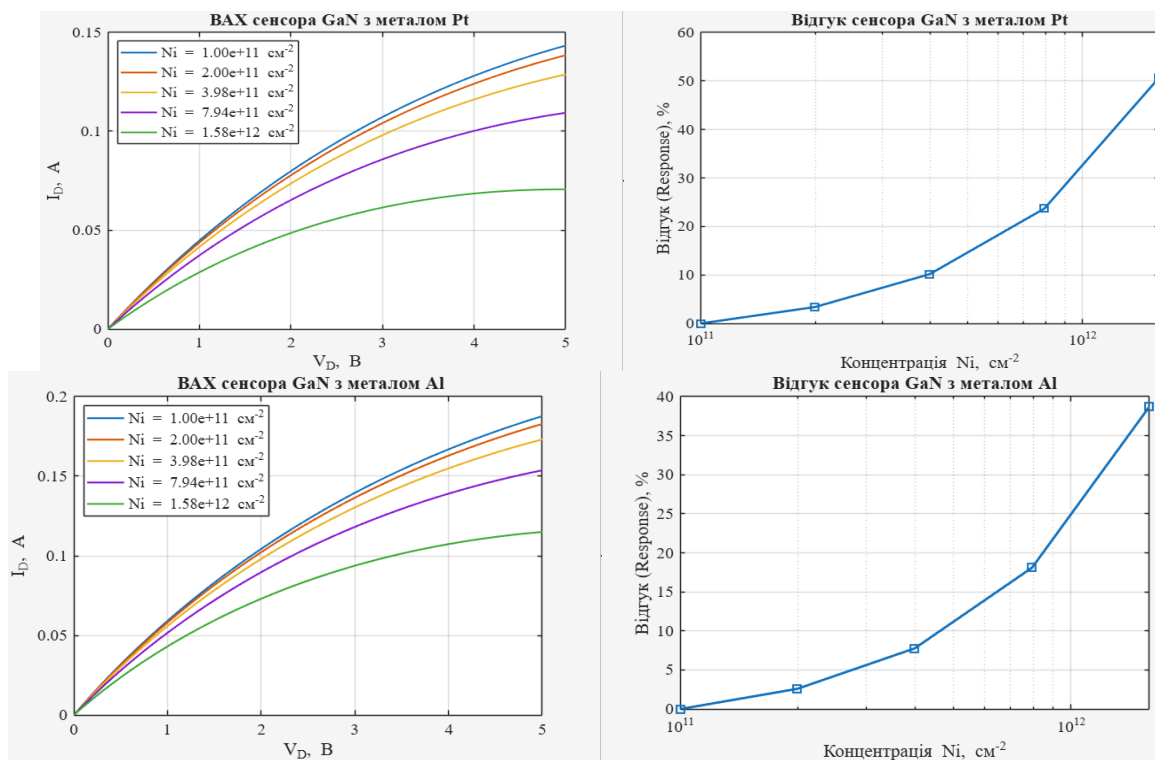


Рисунок 3.4.8 – Графіки залежності ВАХ та відгуку сенсору GaN для газу-окисника з металами на затворі Pt та Al

Вплив матеріалу затвора, показаний на рис. 3.4.7 та 3.4.8, підтверджує теорію бар'єрних контактів. Використання платини (Pt) з високою роботою виходу призводить до менших початкових струмів, але забезпечує значно вищий відносний відгук порівняно з алюмінієм (Al). Це робить платину пріоритетним вибором для високочутливих сенсорів, де важлива саме відносна зміна сигналу, а не його абсолютна величина.

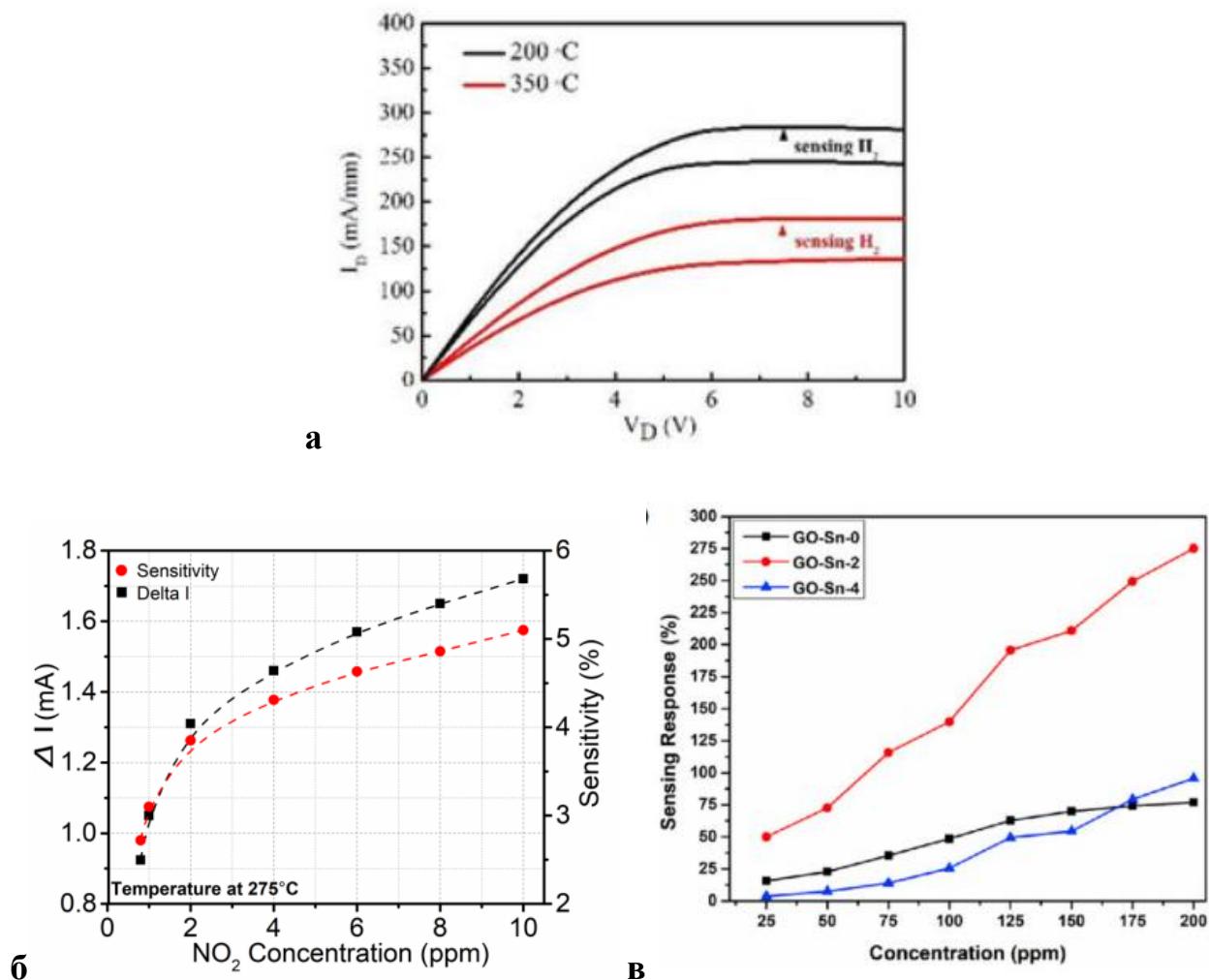


Рисунок 3.4.9 – Приклади результатів інших досліджень: (а) ВАХ газового сенсора H_2 AlGaN/GaN НЕМТ для різних значень температури та концентрації газу [40]; (б) чутливість та ΔI як функція концентрації NO_2 при 275 °С (GaN НЕМТ) [41]; (в) Відгук датчика кімнатної температури з тонкою плівкою Ga_2O_3 , легованою Sn, як функція концентрації NH_3 [42]

3.5 Висновки до розділу 3

1. Впровадження у модель залежності рухливості від напруженості поля дозволило значною мірою скорегувати розрахунки у порівнінні зі сталим значенням рухливості носіїв заряду : для транзистора на основі оксиду галію прогнозований струм знизився в 2,65 рази. Це доводить, що для моделювання широкозонних матеріалів критично важливо враховувати ефекти розсіювання носіїв заряду.
2. Порівняльний аналіз показав, що транзистори на основі нітриду галію забезпечують майже вдвічі вищий вихідний струм порівняно з оксидом галію завдяки вищій рухливості електронів. Однак оксид галію залишається достатньо ефективним завдяки більшій площі активної взаємодії з газом, що компенсує нижчу провідність.
3. Виявлено значну асиметрію чутливості до типу газу: відгук на газівідновники вдвічі вищий, ніж на окисники. Це пояснюється тим, що механізм «відмикання» каналу шляхом зняття збіднення є енергетично вигіднішим і дає більший приріст струму, ніж спроба повністю перекрити канал окисником.
4. Результати моделювання свідчать про вплив температури кристалічної ґратки і матеріалів: підвищення робочої температури знижує чутливість через падіння рухливості, а використання платини (Pt) замість алюмінію (Al) на затворі суттєво підвищує відносний відгук, незважаючи на зменшення абсолютного струму.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано принцип роботи, сфери застосування та класифікацію сенсорів газу на основі напівпровідникових матеріалів. Наведено основні характеристики сенсорів та методи покращення їх ефективності. Досліджено перспективні газочутливі напівпровідникові матеріали та проведено порівняльний аналіз їх властивостей, включаючи поле-швидкісні характеристики і механізми розсіювання для оксиду галію та нітриду галію. Пояснено принципи взаємодії з газами для різних напівпровідників.

2. Проведено моделювання поле-швидкісних характеристик оксиду галію та нітриду галію шляхом налаштування параметрів на основі їх апроксимаційних залежностей. Модернізовано аналітичну модель сенсора газу завдяки впровадженню розрахунку рухливості носіїв заряду залежної від напруженості електричного поля, що дозволяє врахувати ефекти розсіювання та насичення дрейфової швидкості на вихідні характеристики. Адаптовано модель сенсора газу для напівпровідників з різними механізмами газочутливості. Враховано різну реакцію сенсора нагази-окисники тагази-відновники.

3. Здійснено математичне моделювання характеристик польових структур у програмному середовищі MATLAB. Визначено вплив розсіювання електронів у сильних полях і вплив на вихідні ВАХ. Для сенсора на основі оксиду галію та нітриду галію побудовані та досліджені залежності вольт-амперних характеристик та чутливості від ряду параметрів, таких як концентрація донорної домішки, концентрація адсорбованих молекул газу, температура, топологія приладу та матеріали металевого затвора. Представлено результати порівняльного аналізу сенсорів на основі оксиду галію та нітриду галію. Здійснено аналіз відносного відгуку сенсорів на газ-окисник та газ-відновник.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Panda, S., Mehlawat, S., Dhariwal, N., Kumar, A., Sanger, A. Comprehensive review on gas sensors: Unveiling recent developments and addressing challenges // *Materials Science and Engineering: B*. – 2024. – Vol. 308. – 117616. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117616>.
2. Tamersit, K., Kouzou, A., Rodriguez, J., Abdelrahem, M. Electrostatically Doped Junctionless Graphene Nanoribbon Tunnel Field-Effect Transistor for High-Performance Gas Sensing Applications: Leveraging Doping Gates for Multi-Gas Detection // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14, Issue 2. – 220. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/nano14020220>.
3. Sisman, O., Erkovan, M., Kilinc, N. Hydrogen sensors for safety applications // *Towards Hydrogen Infrastructure*. – 2024. – P. 275-314. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95553-9.00061-3>.
4. Jaaniso, R., Tan, O. K. (Eds.) *Semiconductor Gas Sensors*. – 2nd Edition. – Woodhead Publishing, 2019. – 616 p. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/905550317/44246732>
5. Korotcenkov, G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? // *Materials Science and Engineering: B*. – 2007. – Vol. 139, Issue 1. – P. 1-23. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.044>.
6. Strikha, V. I. SEMICONDUCTOR SENSORS – SEMICONDUCTOR ELECTRONICS PROMISING DIRECTION // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2021. – Vol. 18, Issue 2. – P. 47-53. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/355323267_SEMICONDUCTOR_SENSORS_-_SEMICONDUCTOR_ELECTRONICS_PROMISING_DIRECTION
7. Nikolic, M. V., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z. Z., Stamenkovic, Z. *Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application* // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, Issue 22. – 6694. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s20226694>.

8. Hudeish, A. Y. O. GALLIUM NITRIDE (GaN) BASED GAS SENSOR USING CATALYTIC METAL : Diss. ... Doctor of Philosophy / Universiti Sains Malaysia. – 2005. – 209 p. – Режим доступа: https://eprints.usm.my/8635/1/GALLIUM_NITRIDE_%28GaN%29_BASED_GAS_SENSOR.pdf

9. Tian, W., Liu, X., Yu, W. Research Progress of Gas Sensor Based on Graphene and Its Derivatives: A Review // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, Issue 7. – 1118. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/app8071118>.

10. Hong, S., Wu, M., Hong, Y., Jeong, Y., Jung, G., Shin, W., Park, J., Kim, D., Jang, D., Lee, J.-H. FET-type gas sensors: A review // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2021. – Vol. 330. – 129240. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129240>.

11. Liang, C., Cao, Z., Hao, J., Zhao, S., Yu, Y., Dong, Y., Liu, L., Huang, C., Gao, C., Zhou, Y., He, Y. Gas Sensing Properties of Indium–Oxide–Based Field–Effect Transistor: A Review // Sensors. – 2024. – Vol. 24, Issue 18. – 6150. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s24186150>.

12. Mukherjee, A., Rosenwaks, Y. Recent Advances in Silicon FET Devices for Gas and Volatile Organic Compound Sensing // Chemosensors. – 2021. – Vol. 9, Issue 9. – 260. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/chemosensors9090260>.

13. Yoshizumi, T., Miyahara, Y. Field-Effect Transistors for Gas Sensing // Different Types of Field-Effect Transistors - Theory and Applications / Ed. by M. M. Pejović, M. M. Pejovic. – IntechOpen, 2017. – Режим доступа: <https://doi.org/10.5772/intechopen.68481>.

14. Zhang, M., Liu, Z., Yang, L., Yao, J., Chen, J., Zhang, J., Wei, W., Guo, Y., Tang, W. β -Ga₂O₃-Based Power Devices: A Concise Review // Crystals. – 2022. – Vol. 12, Issue 3. – 406. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/cryst12030406>.

15. Maimon, O., Li, Q. Progress in Gallium Oxide Field-Effect Transistors for High-Power and RF Applications // Materials. – 2023. – Vol. 16, Issue 24. – 7693. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/ma16247693>.

16. Chi, Z., Asher, J. J., Jennings, M. R., Chikoidze, E., Pérez-Tomás, A. Ga₂O₃ and Related Ultra-Wide Bandgap Power Semiconductor Oxides: New Energy Electronics Solutions for CO₂ Emission Mitigation // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Issue 3. – 1164. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/ma15031164>.
17. Tsao, J. Y., Chowdhury, S., Hollis, M. A., Jena, D., Johnson, N. M., Jones, K. A., Kaplar, R. J., Rajan, S., Van de Walle, C. G., Bellotti, E., Chua, C. L., Collazo, R., Coltrin, M. E., Cooper, J. A. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges // *Advanced Electronic Materials*. – 2018. – Vol. 4, Issue 1. – 1600501. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/aelm.201600501>.
18. Trew, R. J. High-Frequency Solid-State Electronic Devices // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2005. – Vol. 52, Issue 5. – P. 638-649. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/TED.2005.845862>.
19. Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10, Issue 3. – P. 2088-2106. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s100302088>.
20. Monteparo, C. N. Gallium Nitride Sensors for Hydrogen/Nitrogen and Hydrogen/Carbon Monoxide Gas Mixtures : Thesis ... Master of Science in Chemical Engineering / University of South Florida. – 2009. – 80 p. – Режим доступа: <https://digitalcommons.usf.edu/etd/2112>.
21. Higashiwaki, M. β -Ga₂O₃ material properties, growth technologies, and devices: a review // *AAPPS Bulletin*. – 2022. – Vol. 32. – 3. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43673-021-00033-0>
22. Sheng, S., Wang, T., Liu, S., Liu, F. Atomic-Scale Investigation of the Lattice-Asymmetry-Driven Anisotropic Sublimation in GaN // *Advanced Science*. – 2022. – Vol. 9, Issue 22. – 2106028. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/361038861_Atomic-Scale_Investigation_of_the_Lattice-Asymmetry-Driven_Anisotropic_Sublimation_in_GaN
23. Jiang, Y., Li, W., Du, F., Sokolovskij, R. Comprehensive review of gallium nitride (GaN)-based gas sensors and their dynamic responses // *Journal of Materials*

Chemistry C. – 2023. – Vol. 11, Issue 6. – P. 1993-2016. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1039/D3TC01126G>.

24. Joshi, R. P. Monte Carlo Transport Studies of GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) for Microwave Applications : Final Report / Old Dominion University ; U.S. Army Research Office. – 2004. – 46 p. – Режим доступа: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA421515.pdf>

25. Pearton, S. J., Yang, J., Cary, P. H., Ren, F., Kim, J., Tadjer, M. J., Mastro, M. A. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices // Applied Physics Reviews. – 2018. – Vol. 5, Issue 1. – 011301. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.5006941>.

26. Ghosh, K., Singiseti, U. Ab initio velocity-field curves in monoclinic β -Ga₂O₃ // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 122, Issue 3. – 035702. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.4986174>.

27. Sabui, G., Parbrook, P. J., Arredondo, M., Shen, Z. J. Modeling and simulation of bulk gallium nitride power semiconductor devices // AIP Advances. – 2016. – Vol. 6, Issue 5. – 055006. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.4948794>.

28. Ma, N., Tanen, N., Verma, A., Guo, Z., Luo, T., Xing, H. G., Jena, D. Intrinsic Electron Mobility Limits in β -Ga₂O₃ // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 109, Issue 21. – 212101. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1063/1.4968550>.

29. Kang, Y., Krishnaswamy, K., Peelaers, H., Van de Walle, C. G. Fundamental limits on the electron mobility of β -Ga₂O₃ // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2017. – Vol. 29, Issue 23. – 234001. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa6f66>.

30. Wei, X., He, X., Wu, P., Gong, F., Wang, D., Wang, S., Lu, S., Zhang, J., Xiang, S., Kai, T., Ding, P. Recent advances in the design of semiconductor hollow microspheres for enhanced photocatalytic water splitting // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, Issue 55. – P. 27974-27996. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.076>.

31. Skromme, B. J. Junctions and Barriers // Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition). – Elsevier, 2003. – P. 1-12. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01896-9>.

32. Nikolić, M. V., Milovanović, V., Vasiljević, Z. Z., Stamenković, Z. Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Food Industry // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, Issue 23. – 9548. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s23239548>.
33. Raju, P., Li, Q. Review—Semiconductor Materials and Devices for Gas Sensors // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2022. – Vol. 169, Issue 5. – 057518. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6e0a>.
34. Hammod, I. A., Ridha, J., Tahir, K. J., Kamel, F. Semiconductor Gas Sensors: Metal Oxides, Synthesis Methods, Applications as Gas Sensors and Oxidation and Reduction Mechanisms // *Indonesian Journal of Chemistry*. – 2025. – Vol. 25, Issue 1. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/388177543_Semiconductor_Gas_Sensors_Metal_Oxides_Synthesis_Methods_Applications_as_Gas_Sensors_and_Oxidation_and_Reduction_Mechanisms
35. Hammod, I. A., Ridha, N. J., Tahir, K. J., Mohamad Alosfur, F. K., Yasir, A. S., Majeed, L. A. Semiconductor Gas Sensors: Metal Oxides, Synthesis Methods, Applications as Gas Sensors, and Oxidation and Reduction Mechanisms // *Indonesian Journal of Chemistry*. – 2025. – Vol. 25, Issue 1. – P. 306-332. – Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/1d29/cf071c768611aa7cf3d31949aaacee54b740.pdf?gclid=1*brsmwz*_gclid=au*MTM4NzE3NjkwNi4xNzYxODg0MDQ1*_ga*MTk3MzgyOTEyNS4xNzYxODg0MDQ2*_ga_H7P4ZT52H5*cze3NjUyNTQ3NTQkbzYkZzAkdDE3NjUyNTQ3NTUkajU5JGwwJGgw
36. Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., Gao, R. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10, Issue 3. – P. 2088-2106. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/3/2088>
37. Халус М. С. Моделювання польових структур сенсорів газу на основі оксиду галію : дипломна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Факультет електроніки. – Київ, 2024. – [62] с.

38. Murray, S.P., Roenker, K.P. An analytical model for SiC MESFETs // Solid-State Electronics. – 2002. – Vol. 46, Issue 10. – P. 1495-1505. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(02\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00094-1).
39. Ranjan, A., Agrawal, M., Radhakrishnan, K., Dharmarasu, N.¹ AlGaIn/GaN HEMT-based high-sensitive NO_2 gas sensors // Japanese Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 58, № SC. – SCCD23.² – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/1347-4065/ab1391>
40. Chung, G. H., Vuong, T. A., Kim, H. Demonstration of Hydrogen Sensing Operation of AlGaIn/GaN HEMT gas sensors in Extreme Environment // Results in Physics. – 2019. – Vol. 12. – P. 326-329. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/329120737_Demonstration_of_Hydrogen_Sensing_Operation_of_AlGaInGaN_HEMT_gas_sensors_in_Extreme_Environment
41. Ranjan, A. Studies on GaN HEMT based gas sensors for low concentrations of NO_2 and NH_3 : Doctoral thesis / Nanyang Technological University. – Singapore, 2019. – 186 p. – Режим доступа: <https://dr.ntu.edu.sg/entities/publication/b50f997d-866f-402d-8d86-6fa8e5377c50>
42. Zhu, J., Xu, Z., Ha, S., Li, D., Zhang, K., Zhang, H., Feng, J. Gallium Oxide for Gas Sensor Applications: A Comprehensive Review // Materials (Basel). – 2022. – Vol. 15, Issue 20. – 7339. – Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9611408/>.