

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171 Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Приладово-технологічне моделювання та застосування двовимірних польових транзисторів

Здобувача групи ЕІск3-01б

(шифр групи)

Федченка Євгенія Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

(підпис)

Євгеній ФЕДЧЕНКО

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник викладач, к.ф.-м.н., доцент, Іван БУРИК

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант<sup>1)</sup>

(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Обґрунтуванням актуальності теми є потенціал використання двовимірних польових транзисторів в інтегральних мікросхемах, що обумовлено їх високою продуктивністю та енергоефективністю.

Метою роботи є дослідження структури та параметрів двовимірних польових транзисторів та аналіз їх застосування в сучасних електронних пристроях.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- аналіз потенціалу застосування двовимірних польових транзисторів у різних галузях, таких як високошвидкісні процесори, енергоефективні схеми та сенсорні пристрої;
- моделювання електричних характеристик двовимірних польових транзисторів із використанням сучасних програмних засобів та методів.

При виконанні даної роботи використовувався метод приладово-технологічного моделювання.

У результаті проведених досліджень було виконано приладово-технологічне моделювання польового транзистора із каналом у вигляді двовимірного матеріалу. За результатами комп'ютерної симуляції зроблено висновки про узгодженість з літературними даними отриманих результатів.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є транспорт носіїв заряду та характеристики польових транзисторів як елементів інтегральних мікросхем.

Предмет досліджень приладово-технологічне моделювання, принципи роботи, конструкційні особливості та застосування двовимірних польових транзисторів в електроніці.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 11 рисунків, 1 таблицю, список цитованої літератури із 35 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** польові транзистори, двовимірні наноструктури, приладово-технологічне моделювання, молібден сульфід

**ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ХАРАКТЕРИСТИК ДВОВИМІРНИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ</b> .....	5
1.1. Кристалічна структура та властивості 2D матеріалів.....	5
1.2. Особливості будови та принципу дії 2D FET.....	8
1.3. Порівняльні характеристики FET's.....	10
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	13
2.1. Програмні засоби приладового моделювання.....	13
2.2. Методика моделювання в Silvaco TCAD та NanoHub .....	15
<b>РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ</b> .....	18
3.1. Структура та характеристики 2DFET із каналом MoS <sub>2</sub> .....	18
3.2. Застосування 2D FET у високошвидкісних процесорах.....	23
3.3. Енергоефективні системи на основі 2D FET.....	25
3.4. Сенсорні пристрої на основі 2D FET.....	27
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	30
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	31
<b>ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ</b> .....	35

## ВСТУП

Стрімкий розвиток електроніки вимагає вдосконалення та мініатюризації компонентів. Традиційні кремнієві транзистори досягли своїх меж, тому дослідники цікавляться 2D матеріалами, такими як графен та дихалькогеніди перехідних металів. Ці двовимірні матеріали мають унікальні властивості, що відкривають можливості для підвищення продуктивності та енергоефективності пристроїв.

Мета цієї дипломної роботи – приладово-технологічне моделювання двовимірних польових транзисторів (2D FET) та їх застосування в сучасних електронних пристроях. Робота фокусується на принципах роботи, конструкційних особливостях, методах виготовлення та електричних характеристиках 2D FET, а також на їх потенціалі у високошвидкісних процесорах, енергоефективних схемах та сенсорах.

У дослідженні застосовуються сучасні програмні засоби для симуляції характеристик 2D FET. Це дозволяє детально вивчити поведінку транзисторів під різними умовами та оптимізувати їх параметри для практичного використання. Отримані результати можуть стати основою для подальших експериментальних досліджень і розробки нових електронних компонентів.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання результатів для створення ефективніших електронних пристроїв. Зокрема, це сприятиме розвитку високопродуктивних та енергоефективних процесорів для комп'ютерних систем і мобільних пристроїв. Двовимірні польові транзистори також можуть бути корисними в сенсорних системах, що потребують високої чутливості та низького енергоспоживання.

Таким чином, дослідження двовимірних польових транзисторів є актуальним і перспективним напрямком у сучасній мікроелектроніці. Вивчення їх властивостей, методів виготовлення та можливостей застосування відкриває нові горизонти для розвитку електроніки та технологій майбутнього.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ХАРАКТЕРИСТИК ДВОВИМІРНИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

### 1.1. Кристалічна структура та властивості 2D матеріалів

Двовимірні матеріали привернули увагу науковців завдяки своїм унікальним властивостям, які відкривають нові перспективи в різних галузях науки і техніки. Графен, дихалькогеніди перехідних металів (TMDs), чорний фосфор та інші мають значний потенціал для використання у сучасній електроніці [1-5]. TMDs мають шарувату структуру, де кожен шар складається з атомів металу, розташованих між двома шарами атомів халькогену (рис.1.1).

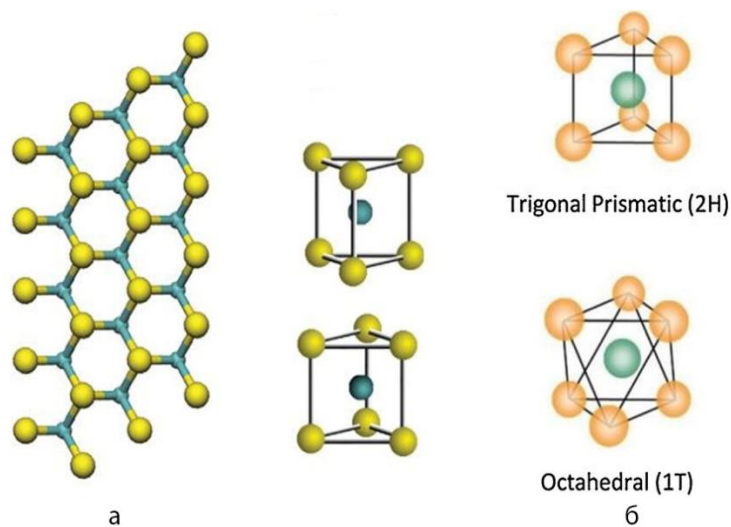


Рис.1.1. Кристалічна структура MoS<sub>2</sub> [6]: а – вид зверху на одношарову гексагональну кристалічну структуру; б – тригональна призматична (2H) та октаедрична (1T) структури елементарних комірок

Графен має унікальні електронні властивості, зокрема високу рухливість носіїв заряду, низький опір, високу міцність і гнучкість, а також прозорість. Ці властивості роблять його ідеальним матеріалом для широкого спектра застосувань, включаючи транзистори, сенсори, гнучкі екрани та електроди для

аккумуляторів. Однак, відсутність забороненої зони у графені обмежує його використання у польових транзисторах, оскільки це ускладнює керування потоком носіїв заряду.

Для подолання цих обмежень дослідники звернули увагу на інші двовимірні матеріали, такі як TMDs. До них належать матеріали типу  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$  та інші.

Однією з головних переваг TMDs є наявність забороненої зони, що робить їх придатними для використання у польових транзисторах. Крім того, вони мають високу рухливість носіїв заряду та стабільні електронні властивості, що робить їх перспективними для використання у високоефективних та енергоефективних електронних пристроях.

Чорний фосфор є ще одним важливим двовимірним матеріалом, який привернув увагу науковців. Він має шарувату структуру, де атоми фосфору утворюють багат шарову кристалічну решітку (рис.1.2). Чорний фосфор має високу рухливість носіїв заряду та анізотропні електронні властивості, що робить його цікавим матеріалом для використання у транзисторах та оптоелектронних пристроях. Крім того, він має широку заборонену зону, яка може бути налаштована шляхом контролю товщини шару, що дозволяє створювати транзистори з різними електронними характеристиками [3-8].

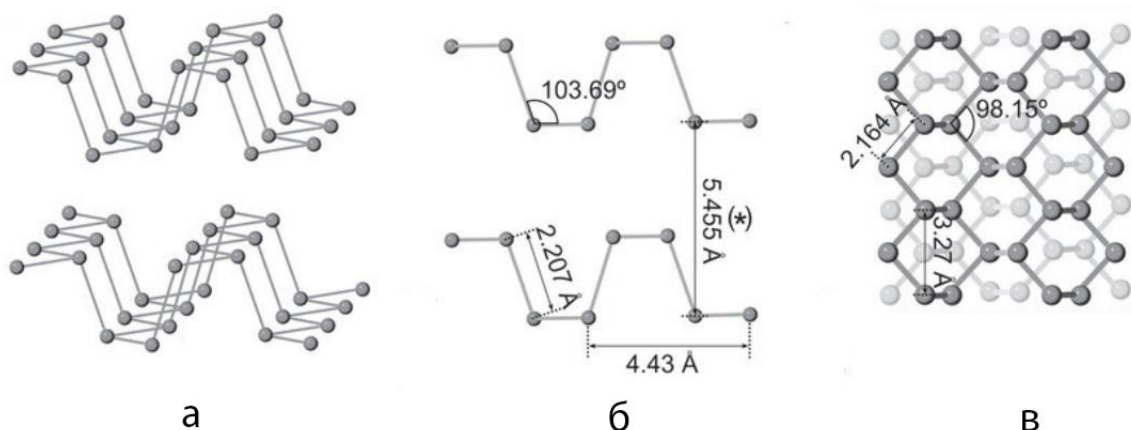


Рис.1.2. Кристалічна структура чорного фосфору [9]: а – тривимірне зображення; б – вид збоку; в – вид зверху

Інші двовимірні матеріали, такі як гексагональний нітрид бору (h-BN), також досліджуються для використання у електроніці. h-BN має високу діелектричну постійну та стабільність, що робить його ідеальним матеріалом для створення ізоляційних шарів у двовимірних пристроях.

Двовимірні матеріали мають унікальні фізичні, електронні та механічні властивості, що робить їх особливо привабливими для використання у різних галузях науки і техніки.

Однією з ключових особливостей двовимірних матеріалів є їхня надзвичайно тонка атомарна структура. Це дозволяє створювати дуже тонкі, але при цьому міцні електронні пристрої. Тонка структура двовимірних матеріалів також сприяє підвищенню щільності інтеграції компонентів у мікросхемах, що є важливим для подальшого розвитку мініатюризації електроніки.

Електронні властивості двовимірних матеріалів відзначаються високою рухливістю носіїв заряду та низьким рівнем дефектів у кристалічній решітці. Це дозволяє створювати транзистори з високою швидкістю роботи та низьким енергоспоживанням. Наприклад, графен має надзвичайно високу рухливість носіїв заряду, що робить його одним з найшвидших електронних матеріалів. Однак, відсутність забороненої зони у графені обмежує його використання у транзисторах. TMDs, з іншого боку, мають природну заборонену зону, що дозволяє ефективно керувати потоком носіїв заряду і створювати транзистори з високою продуктивністю [10-13].

Механічні властивості двовимірних матеріалів також є важливими для їх застосування. Графен, наприклад, має надзвичайно високу міцність та гнучкість, що робить його ідеальним матеріалом для створення гнучкої електроніки. Гнучкість та прозорість графену відкривають нові можливості для розробки гнучких дисплеїв, сенсорів та інших пристроїв, які можуть бути інтегровані у текстиль, медичні пристрої та інші об'єкти.

Крім того, двовимірні матеріали мають унікальні оптичні властивості. Наприклад, графен має високий коефіцієнт поглинання світла та може

використовуватись у фотодетекторах, сонячних елементах та інших оптоелектронних пристроях. TMDs також мають цікаві оптичні властивості, які можуть бути використані у різних фотонних пристроях.

## 1.2. Особливості будови та принципу дії 2D FET

Польовий транзистор (FET) є основним компонентом інтегральних мікросхем, забезпечує функції підсилення та перемикачання в них. Основний принцип роботи FET полягає у керуванні потоком електронів через канал між джерелом (source) та стоком (drain) за допомогою електричного поля, що створюється на затворі (gate) (рис.1.3).

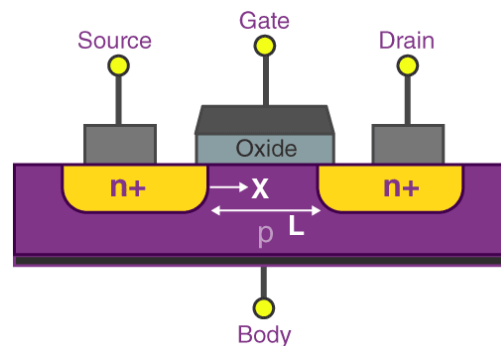


Рис.1.3. Структура польового транзистора [14]

В традиційних кремнієвих FET канал формується у напівпровідниковій підкладці під впливом напруги на затворі. Зміна напруги на затворі дозволяє контролювати концентрацію носіїв заряду у каналі, тим самим керуючи провідністю транзистора. Це дозволяє використовувати FET як підсилювачі сигналів або як електронні перемикачі у цифрових схемах.

Зменшення розмірів кремнієвих транзисторів до нанометрових масштабів призвело до виникнення значних проблем, таких як витіки струму та короткі канали. Ці ефекти обмежують подальше зменшення розмірів транзисторів і ускладнюють створення більш компактних та енергоефективних електронних пристроїв. Для подолання цих обмежень дослідники звернули увагу на використання двовимірних матеріалів для створення польових транзисторів.



Двовимірні польові транзистори (2D FET) використовують двовимірні матеріали для формування каналу. Тонка атомарна структура таких матеріалів дозволяє ефективно контролювати електричні властивості каналу навіть на надмалих масштабах. Це знижує вплив короткоканальних ефектів і покращує загальну продуктивність транзистора. Крім того, двовимірні матеріали мають високу рухливість носіїв заряду, що забезпечує високу швидкість роботи транзисторів. Двомірні польові транзистори можуть бути із заднім затвором і з переднім (подвійним) затвором (рис.1.5). Задній затвор частіше використовується в наукових дослідженнях, де простота і можливість варіації експериментальних умов є важливими факторами. Передній або подвійний затвор, навпаки, більш придатний для комерційного виробництва транзисторів з високою продуктивністю та енергоефективністю, які використовуються в сучасних електронних пристроях, таких як смартфони та комп'ютери. [11].

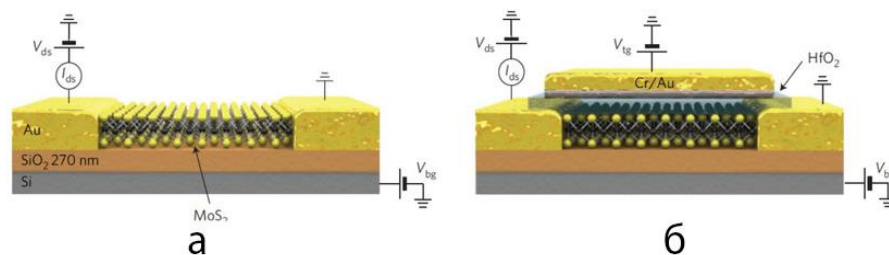


Рис.1.5. Поперечний переріз 2D-транзистора [15]: а – транзистор із заднім затвором; б – транзистор із переднім (подвійним) затвором

Графенові транзистори, наприклад, мають надзвичайно високу рухливість носіїв заряду, що дозволяє створювати транзистори з високою швидкістю роботи. Однак, відсутність забороненої зони у графені ускладнює використання його у польових транзисторах. Дихалькогеніди перехідних металів, такі як  $\text{MoS}_2$ , мають природну заборонену зону, що робить їх більш придатними для використання у 2D FET. Транзистори на основі TMDs можуть досягати високої продуктивності та енергоефективності, що робить їх перспективними для використання у високошвидкісних процесорах та інших електронних пристроях.

### 1.3. Порівняльні характеристики польових транзисторів

Традиційні кремнієві транзистори (Si FET) були основою мікроелектроніки протягом багатьох десятиліть завдяки своїм добрим електронним властивостям, доступності матеріалів та зрілій технології виробництва. Кремній має високу рухливість носіїв заряду, стабільні електронні властивості та відносно низьку вартість, що робить його ідеальним матеріалом для масового виробництва транзисторів. Однак, зменшення розмірів Si FET до нанометрових масштабів зіткнулося з фізичними обмеженнями, такими як короткоканальний ефект, підвищене енергоспоживання та витoki струму.

Двовимірні польові транзистори (2D FET) мають ряд переваг над кремнієвими аналогами. По-перше, їх тонка атомарна структура дозволяє ефективно контролювати електричні властивості каналу навіть на нанометрових масштабах. Це знижує вплив короткоканальних ефектів і покращує загальну продуктивність транзистора. Наприклад,  $\text{MoS}_2$  має широку заборонену зону, що дозволяє створювати транзистори з низьким рівнем витоків струму і високою енергоефективністю [13-16]. Основні відмінності між традиційними кремнієвими та двовимірними польовими транзисторами наведено в табл.1.1.

По-друге, двовимірні матеріали мають високу рухливість носіїв заряду, що забезпечує швидшу роботу транзисторів. Це є критично важливим для високошвидкісних процесорів, де швидкість роботи транзисторів визначає загальну продуктивність системи. Наприклад, графенові транзистори (GFET) можуть працювати при частотах, що перевищують можливості кремнієвих транзисторів, завдяки своїй високій рухливості носіїв заряду.

Крім того, двовимірні матеріали дозволяють створювати гнучкі та прозорі електронні пристрої, що відкриває нові можливості для розвитку технологій. Гнучкі дисплеї, носима електроніка та прозорі сенсори є перспективними напрямками, де 2D FET можуть знайти своє застосування. Графен, наприклад,

може використовуватися для створення гнучких дисплеїв та сенсорів, які можуть бути інтегровані у текстиль, медичні пристрої та інші об'єкти.

*Таблиця 1.1*

**Основні відмінності між традиційними кремнієвими та двовимірними польовими транзисторами**

<b>Параметр</b>	<b>Традиційні кремнієві транзистори</b>	<b>2D FET</b>
Матеріал	Кремній	Двовимірні матеріали (графен, MoS <sub>2</sub> , WS <sub>2</sub> і т.п)
Мобільність носіїв	Відносно висока	Вища мобільність в деяких 2D матеріалах
Ефекти масштабу	Обмежені розмірами з'єднань	Менше ефектів масштабу завдяки атомарній товщині
Канальний струм	Високий	Залежить від матеріалу, може бути дуже високим
Струм витоку	Може бути значним	Знижений завдяки кращій електростатичній керуваності
Керуваність каналом	Обмежена	Покращена завдяки атомарній товщині
Технологічна зрілість	Висока	Низька, нові матеріали все ще досліджуються
Складність виробництва	Добре відпрацьована технологія	Складніше у виробництві через новизну матеріалів
Температурна стабільність	Висока	Залежить від матеріалу, може бути менш стабільною
Застосування	Широкий спектр (комп'ютери, мобільні пристрої)	Потенційні застосування в електроніці наступного покоління
Енергоефективність	Відносно висока	Потенційно вища завдяки меншій товщині та зниженню струмів витоку
Ціна	Відносно низька (масове	Вища (нова технологія,

	виробництво)	обмежене виробництво)
--	--------------	-----------------------

Незважаючи на всі переваги двовимірних польових транзисторів, існують також певні виклики, пов'язані з їх використанням. Одним з головних викликів є інтеграція двовимірних матеріалів у сучасні виробничі процеси. Виробництво високоякісних двовимірних матеріалів у великій кількості є складним завданням, що потребує подальших досліджень і розвитку технологій. Крім того, необхідно розробити методи для стабільного і надійного контактування двовимірних матеріалів з іншими компонентами електронних пристроїв [11-18].

Таким чином, двовимірні польові транзистори мають значний потенціал для заміни традиційних кремнієвих транзисторів у багатьох застосуваннях, забезпечуючи при цьому підвищену продуктивність, енергоефективність та нові можливості для розвитку електроніки.

Моделювання електронних пристроїв є ключовим етапом у процесі їхнього проектування та оптимізації. Завдяки моделюванню можна значно скоротити час і витрати на розробку нових напівпровідникових пристроїв, таких як польові транзистори. Зокрема, моделювання дозволяє досліджувати фізичні процеси всередині пристроїв, аналізувати їх роботу під різними умовами та оптимізувати параметри для досягнення найкращих характеристик.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

#### 2.1. Програмні засоби приладового моделювання

Одним із провідних програмних комплексів для моделювання напівпровідникових пристроїв є Silvaco TCAD (Technology Computer-Aided Design). Silvaco TCAD пропонує потужні інструменти для симуляції та аналізу електричних, теплових, оптичних і механічних властивостей напівпровідників. Використання цього програмного забезпечення дозволяє інженерам моделювати як окремі компоненти, так і цілі системи, що є критичним для розробки сучасних електронних пристроїв [19-20].

Особливо важливим є моделювання двовимірних польових транзисторів (2D FET), які широко використовуються в різних електронних пристроях, включаючи мікропроцесори, силові пристрої та аналогові схеми. Завдяки Silvaco TCAD, інженери можуть досліджувати різні аспекти роботи FET, включаючи поведінку носіїв заряду, вплив температури, варіабельність технологічних процесів і багато іншого.

Silvaco TCAD є комплексним набором інструментів для моделювання та аналізу напівпровідникових пристроїв. Програмне забезпечення складається з кількох модулів, кожен з яких відповідає за різні аспекти моделювання. Всі компоненти Silvaco TCAD взаємодіють між собою (рис.2.1.)

Завдяки своїй модульній структурі Silvaco TCAD дозволяє користувачам налаштовувати процес моделювання. Основні модулі Silvaco TCAD:

1. DeckBuild – основний інтерфейс для створення, редагування та виконання сценаріїв моделювання. DeckBuild забезпечує інтерактивне середовище для керування всіма аспектами процесу моделювання, дозволяючи користувачам легко задавати параметри моделювання, виконувати розрахунки та аналізувати результати. DeckBuild підтримує скриптову мову, що робить його гнучким інструментом для автоматизації складних завдань моделювання.

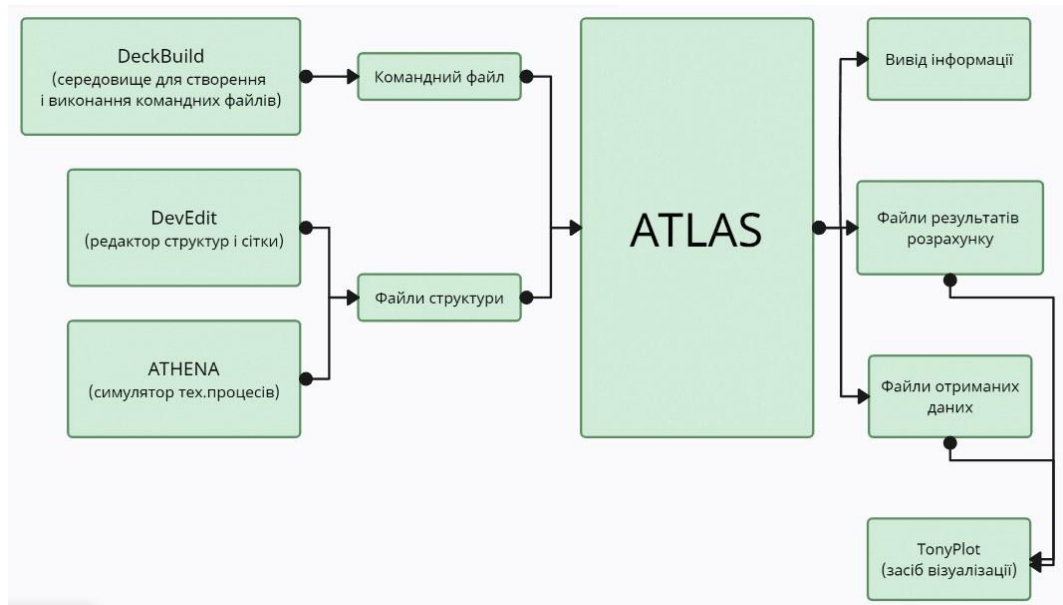


Рис.2.1. Блок-схема складових компонентів Silvaco TCAD [21]

2. Athena – модуль для моделювання технологічних процесів, таких як дифузія, імплантація домішок, травлення, термічні процеси і інші етапи виробництва напівпровідникових пристроїв. Athena дозволяє створювати профілі легування та аналізувати вплив технологій на властивості пристроїв.

3. Atlas – модуль для електричного, теплового та оптичного моделювання напівпровідникових пристроїв. Atlas дозволяє моделювати роботу пристроїв під різними умовами, включаючи вплив напруги, температури, світлового випромінювання та інших факторів. Модуль підтримує широкий спектр фізичних моделей, що дозволяє точно відтворювати поведінку пристроїв.

4. DevEdit – інструмент для створення та редагування двовимірних і тривимірних сіток. DevEdit дозволяє користувачам визначати геометрію пристроїв, задавати властивості матеріалів та створювати точні сітки для подальшого моделювання в Atlas. Інтуїтивний інтерфейс DevEdit спрощує процес підготовки моделей і забезпечує високу точність дискретизації.

5. TonyPlot – модуль для візуалізації та аналізу результатів моделювання. TonyPlot надає зручний інтерфейс для перегляду графіків, контурних карт, тривимірних зображень і інших видів даних, отриманих під час моделювання.

Це дозволяє інженерам швидко оцінювати результати, виявляти аномалії та проводити детальний аналіз роботи пристроїв.

6. Virtual Wafer Fab (VWF) – інструмент для оптимізації технологічних процесів та проектування пристроїв. VWF дозволяє проводити багатопараметричну оптимізацію, аналізувати варіабельність параметрів виробництва та створювати статистичні моделі для підвищення надійності та ефективності виробництва.

## 2.2. Методика моделювання в **Silvaco TCAD** та **NanoHub**

Для дослідження нанорозмірних транзисторних структур із каналом на основі двовимірного матеріалу використовуються онлайн-ресурси NanoHUB. Моделювання базується на розв'язуванні систем рівнянь Пуассона та Шредінгера в рамках нерівноважного зв'язку функції Гріна. Для розв'язання рівняння Пуассона, яке пов'язує заряди та потенціали всередині каналу, використовується тривимірна задача. У цьому випадку сітка будується навколо кожного окремого елемента (атома, іона) структури. Двовимірна модель Шредінгера визначає можливість знаходження носіїв заряду в поперечних перерізах каналу, а сам транспорт враховується одновимірним рівнянням.

Моделювання двовимірних польових транзисторів у Silvaco TCAD включає декілька ключових етапів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні точності та ефективності кінцевого результату (рис.2.2). Ключові етапи моделювання 2D FET у Silvaco TCAD :

1. Процес моделювання двовимірного польового транзистора розпочинається зі створення його геометричної моделі. Для цього використовується модуль DevEdit, який дозволяє задавати необхідні параметри, такі як товщина шарів, довжина каналу, розташування джерела і стоку. Точне моделювання геометрії є критичним для правильного відтворення фізичних процесів у пристрої. Це дозволяє визначити фізичні розміри транзистора, такі як довжина і ширина каналу, товщина шарів, і положення електродів.



Рис.2.2. Алгоритм проектування в Silvaco TCAD. Адаптовано з [22]

2. Наступним кроком є визначення фізичних моделей, які описують поведінку носіїв заряду, рекомбінацію, мобільність тощо. Atlas надає широкий вибір моделей для точного відтворення фізичних процесів. Важливо правильно підібрати моделі, враховуючи матеріали та умови експлуатації пристрою. Основні фізичні моделі, що використовуються у моделюванні FET, включають:

- SRH (Shockley-Read-Hall) рекомбінація враховує рекомбінацію через дефекти в матеріалі, що є критичним для визначення ефективного часу життя носіїв;
- Auger рекомбінація враховує взаємодію трьох носіїв заряду, що стає важливим при високих концентраціях носіїв;
- BGN (Bandgap Narrowing) враховує зміни ширини забороненої зони через високі концентрації домішок, що впливає на енергетичні рівні носіїв;
- Mobility Models (мобільність) включають моделі залежності мобільності від електричного поля, концентрації домішок, температури, що є важливим для точного моделювання динамічних процесів у транзисторі

3. Важливим етапом є визначення початкових умов, таких як концентрація домішок, початковий розподіл потенціалу, а також властивості матеріалів. Це включає задавання профілів легування для різних областей транзистора, таких як канал, джерело і стік. Правильне визначення концентрації домішок критично



впливає на поведінку транзистора, оскільки від цього залежить ширина каналу, рівень субстратного допінгу та інші параметри.

4. Визначаються умови на електродах (контактах) пристрою, такі як потенціал, струм та інші граничні умови. Контакти є важливими елементами, через які пристрій взаємодіє з зовнішнім світом, і їх коректне моделювання є ключовим для точності симуляції. На цьому етапі задаються також граничні умови для теплових та електричних симуляцій, що дозволяє моделювати вплив навколишнього середовища на роботу транзистора.

5. Після задання всіх необхідних параметрів виконується розрахунок робочих характеристик транзистора. Atlas дозволяє отримувати I-V характеристики, розподіл електричного поля, концентрацію носіїв заряду та інші важливі параметри [21]. Розрахунок проводиться в кілька етапів, починаючи з початкової розв'язки для стабілізації системи та переходячи до детального аналізу при різних значеннях напруги на електродах. Це дозволяє отримати повну картину поведінки транзистора під різними робочими умовами.

Після завершення моделювання результати аналізуються за допомогою TonyPlot, який надає зручний інтерфейс для візуалізації даних. TonyPlot дозволяє вивчати різні аспекти роботи транзистора, такі як розподіл електричного поля, концентрацію носіїв заряду, потенціал, температуру тощо [24]. Візуалізація даних є важливою частиною аналізу, оскільки дозволяє швидко і наочно оцінити результати моделювання, виявити аномалії та прийняти обґрунтовані рішення щодо подальшої оптимізації пристрою.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. Структура та характеристики 2DFET із каналом MoS<sub>2</sub>

Для вирішення ряду питань, пов'язаних з масштабуванням транзисторних структур, дослідники виявили значний інтерес до двовимірних матеріалів, подібних до графену. Ці матеріали мають листоподібну структуру з товщиною в один або кілька атомних шарів, хоча бічні розміри можуть досягати мікроскопічних розмірів або навіть більших. Завдяки субнанометровій товщині каналу, носії заряду обмежені в одноатомному або багат шаровому каналі. Застосування двовимірних матеріалів як каналів у транзисторах із польовим ефектом обмежується низькою рухливістю носіїв заряду, яка знижується під впливом підкладки. У статті наводиться огляд експлуатаційних характеристик транзистора з польовим ефектом із двовимірним каналом. Обговорюються основи моделювання таких структур за допомогою програмного середовища NanoHub. Результати досліджень демонструють його вищу продуктивність у порівнянні з іншими транзисторами з польовим ефектом. Числове моделювання експлуатаційних характеристик транзистора з каналом на основі двовимірного матеріалу виявляє проблемні аспекти та особливості застосування двовимірних матеріалів у проєктуванні електронних пристроїв. Отримані результати демонструють прийнятні значення електричних параметрів і можуть бути застосовані для вивчення особливостей комп'ютерного моделювання структур пристроїв у нанoeлектроніці.

Балістичний транспорт може забезпечити високу швидкість носіїв заряду, оскільки вони не зазнають затримок через розсіювання. Це може призвести до робочих характеристик транзисторів (рис. 3.1). Таким чином, балістичний транспорт може дати кращий результат при моделюванні роботи двовимірних транзисторів у порівнянні з моделлю розсіювання носіїв.

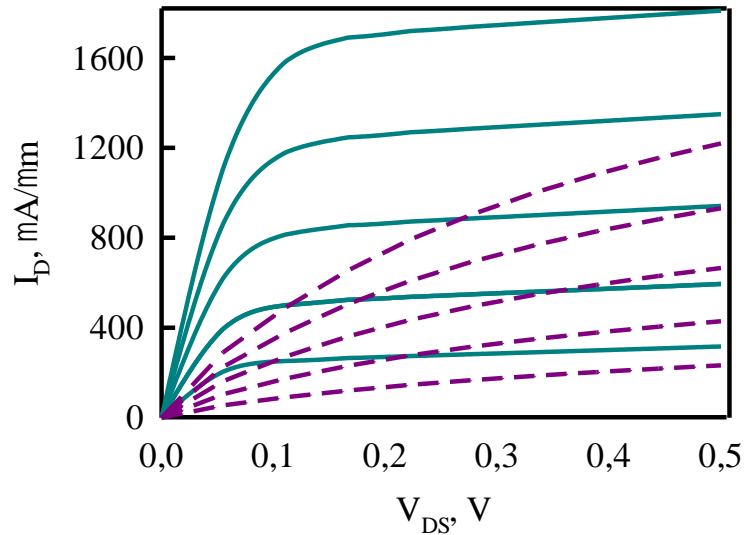


Рис.3.1. Вихідні ВАХ польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою NanoHUB у моделі з розсіюванням носіїв (штрихова лінія) та балістичним транспортом (суцільна лінія).

З моменту відкриття графену в 2004 році спостерігається значний прогрес у дослідженні двовимірних (2D) матеріалів, з яких на сьогоднішній день отримано велику кількість. Поряд із графеном з'явився окремий великий клас шаруватих структур, що складаються з халькогенідів (S, Se, Te) і перехідних металів (Mo, W, Cr, Zr, V, Ti, Nb, Hf, Ta, Pd, Pt) з формулою  $\text{MeX}_2$ . Завдяки характерній субнанометровій товщині та листоподібній структурі, електронні, оптоелектронні, фізичні та хімічні властивості цих матеріалів є надзвичайно привабливими і викликали інтерес до досліджень. Транспортування носіїв заряду (електронів/дір), фононів та фотонів сильно обмежене зовнішніми поверхнями двовимірних матеріалів. Під впливом розмірних ефектів спостерігаються зміни їх електронних, теплових та оптичних властивостей. Це було відзначено у кількох дослідженнях, присвячених цим питанням.

Варто зазначити, що двовимірні матеріали показують незначну зміну рухливості носіїв із зменшенням товщини. Крім того, багат шарові структури не конкурують з об'ємними матеріалами (такими як Si або GaAs), тоді як двовимірні матеріали часто демонструють очевидні переваги в діапазоні

товщини менше 3 нм, що є критичним для продовження масштабування транзисторів. Рухливість кремнію швидко знижується при товщині менше 5 нм, тоді як рухливість двовимірних матеріалів менше залежить від товщини і значно вища в цьому випадку. Двовимірні транзистори також демонструють набагато менший субпороговий нахил, що важливо для постійного масштабування довжини затвора до менше 10 нм. Підтримання високої електронної провідності на рівні остаточного обмеження ( $< 1$  нм) може дозволити використовувати транзистори з довжиною затвора менше 10 нм, зберігаючи при цьому відносно низький субпороговий нахил і струм витоку, що важко досягти за допомогою кремнієвої електроніки, навіть із передовими конструкціями FinFET. Таким чином, застосування атомарно тонких двовимірних матеріалів відкриває шлях для технологічних вузлів 5 нм.

У класичній теорії для визначення щільності носіїв, коефіцієнтів генерації та рекомбінації та інших параметрів зазвичай використовуються рівняння Пуассона і рівняння неперервності як основні рівняння. Для прогнозування експлуатаційних характеристик транзисторів з польовим ефектом можуть застосовуватися моделі дифузійно-дрейфового транспорту з використанням статистики Больцмана або Фермі-Дірака. Врахування квантового потенціалу бар'єру дозволяє подолати труднощі у їх валідації при виникненні короткоканальних ефектів. Варто зазначити, що так звані балістичні транзистори мають характерну енергетичну схему з контрольованим бар'єром. Існує невелика область (вікно Фермі) з балістичною провідністю. Сила струму в каналі визначається відповідно до концепції Ландауера. Завдяки відсутності зворотного розсіювання (середня довжина вільного пробігу збільшується до лінійного розміру каналу), такі транзистори можуть мати відмінні характеристики. Крім того, між металевим електродом і каналом утворюється бар'єр Шотткі. Це довгий час стримувало розвиток балістичних транзисторів. Цю проблему успішно вирішили, використовуючи паладій як матеріал електрода. Інструментальні програмні засоби, які можна використовувати для

моделювання двовимірних транзисторів із польовим ефектом, включають пакети такі, як Silvaco TCAD, Sentaurus TCAD та інші.

У даній роботі для прогнозування в Silvaco TCAD робочих характеристик польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{Mo}_2\text{S}$  було застосовано дифузійно-дрейфову транспортну модель із статистикою Фермі-Дірака. Врахування квантового потенціалу Бома дозволило подолати проблеми її апробації при проявленні ефектів короткого каналу.

Як приклад на рис. 3.2 наведено структуру в масштабі мікронної шкали та передавальні вольт-амперні характеристики для польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою Silvaco TCAD

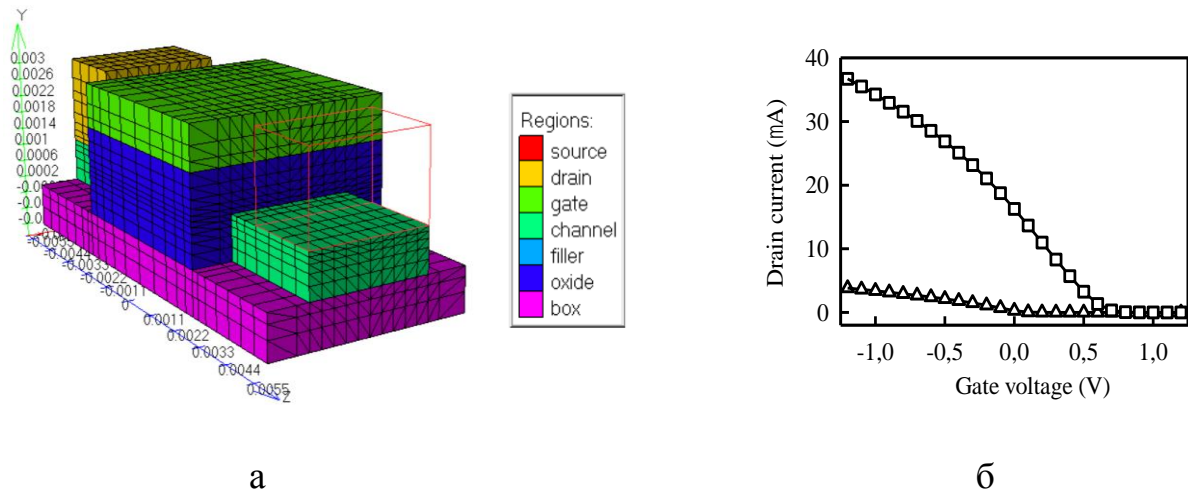


Рис.3.2. Геометрична модель (а) та передавальні ВАХ (б) для польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою Silvaco TCAD. Високий та низький рівні напруги на електродах витоків та стоку відповідно  $V_{dsH}=0,60$  В (квадрати) та  $V_{dsL}=0,03$  В (трикутники)

Основні етапи приладового моделювання польових транзисторів із каналом у вигляді 2D матеріалів: створення геометричної моделі, яке включає визначення розмірів транзистора, розташування електродів (затвор, стік та витік) і властивостей матеріалів; генерація обчислювальної сітки окремих областей транзистора для чисельного аналізу; встановлення граничних умов на контактних поверхнях для симуляції зовнішніх впливів (наприклад,

прикладення напруги до затвору, впливу температури, тощо); використання чисельних методів для розв'язання системи транспортних рівнянь; оцінка робочих характеристик транзистора, таких як сила струму стік-витік, коефіцієнт підсилення, порогова напруга тощо. Поряд з цим у класичній теорії для визначення густоти струму носіїв, коефіцієнтів генерації, рекомбінації та інших параметрів як базові використовують традиційні рівняння Пуассона та безперервності.

Порогова напруга була визначена для зміщення стоку 0,03 В та 0,60 В, при цьому на затворі напруга змінювалася від 0 В до 1,20 В. Отримані результати дозволили визначити наступні електричні параметри: порогова напруга 0,4-0,5 В; допороговий розкид 110-120 мВ/декаду; струм для відкритого та закритого каналу відповідно становив  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  А та  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  А, їх відношення  $10^5$ - $10^7$  (коефіцієнт підсилення); зниження бар'єру, індуковане стоком 800-850 мВ/В. В рамках моделі Шоклі при напрузі зміщення 0,60 В рухливість носіїв становила близько  $80\text{см}^2/\text{Вс}$ . Отримані результати добре узгоджуються з відомими даними для польових транзисторів із каналом  $\text{MoS}_2$ .

Польові транзистори із каналом у вигляді 2D матеріалів демонструють набагато меншу величину допорогового розкиду, що важливо для масштабування транзисторів. Це важко досягти в кремнієвих структурах, навіть якщо використовуються передові конструкції FinFET, VGAA та інші.

### **3.2. Застосування 2D FET у високошвидкісних процесорах**

Двовимірні польові транзистори є однією з найінноваційніших технологій у галузі напівпровідників, які можуть значно покращити характеристики високошвидкісних процесорів. Висока рухливість носіїв заряду, ультратонкий канал і можливість зменшення товщини бар'єра в цих транзисторах створюють умови для значного підвищення швидкодії процесорів.

Основною перевагою 2D FET є їх здатність працювати при значно вищих частотах, що забезпечується низькою ємністю затвора. Зменшення ємності

затвора дозволяє знижувати затримки при перемиканні, що, в свою чергу, підвищує загальну швидкодію процесорів. Наприклад, графенові транзистори мають надзвичайно високу рухливість електронів, що досягає  $200,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  при кімнатній температурі, що може призвести до збільшення швидкості обробки даних на порядки порівняно з традиційними кремнієвими транзисторами [25-26].

Рухливість вимірює швидкість руху електронів у матеріалі під дією електричного поля (тобто напруги). При кімнатній температурі основним обмеженням рухливості є коливання кристалічної решітки, так звані фонони, які розсіюють електрони.

Дослідники UMD-MRSEC вперше виміряли обмеження на рухливість, що накладаються фононами в графені (шар графіту товщиною в один атом), і виявили, що фонони в графені надзвичайно слабкі, обмежуючи рухливість до  $\sim 200\,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  при низькій густині носіїв заряду, що більш ніж у 100 разів вище, ніж у кремнію, і вище, ніж у будь-якому іншому відомому напівпровіднику. Вплив фононів у графені настільки слабкий, що інші ефекти, розсіювання домішками та фононами в підкладці під графеном, є сильнішими. Ця робота прокладає шлях до вищої рухливості в графені (шляхом видалення домішок та використання різних підкладок), що може призвести до створення надзвичайно швидкісних електронних пристроїв (рис3.3) [27].

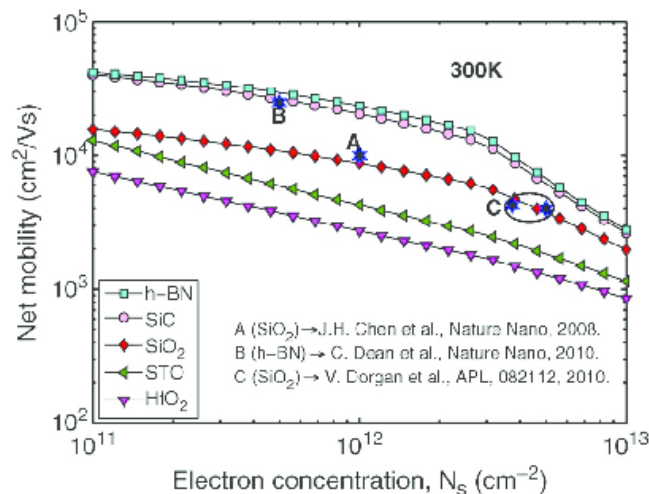


Рис.3.3. Рухливість електронів у графені на різних підкладках [28]

Крім того, 2D FET мають вищу теплову стабільність. Це означає, що процесори, створені на основі таких транзисторів, можуть ефективно працювати при високих температурах, що є критично важливим для високопродуктивних обчислювальних систем. Зменшення потреби в складних системах охолодження не лише знижує енергоспоживання, але й дозволяє створювати більш компактні та потужні процесори.

Важливим аспектом використання 2D FET у високошвидкісних процесорах є можливість їх інтеграції з іншими сучасними технологіями, такими як нанофотоніка та спінтроніка. Це відкриває нові горизонти для створення гібридних процесорів, які поєднують обробку електронних та фотонних сигналів, що ще більше підвищує їхню продуктивність та швидкодію.

Провідні компанії та дослідницькі інститути вже активно працюють над впровадженням 2D FET у виробництво високошвидкісних процесорів. Наприклад, IBM та Samsung інвестують значні ресурси у дослідження та розробки у цій галузі, прагнучи створити процесори наступного покоління, здатні забезпечити значний стрибок у продуктивності обчислювальних систем.

### **3.3. Енергоефективні системи на основі 2D FET**

Сучасна електроніка стикається з величезними викликами в контексті енергоефективності, і 2D FET пропонують інноваційні рішення для зниження енергоспоживання електронних пристроїв. Висока рухливість носіїв заряду та можливість зниження робочої напруги в таких транзисторах дозволяють створювати значно енергоефективніші схеми.

Один з основних аспектів зниження енергоспоживання за допомогою 2D FET полягає у зменшенні статичних і динамічних втрат енергії. Статичні втрати енергії пов'язані з струмом витоку, який можна значно знизити, використовуючи двовимірні матеріали з низьким рівнем дефектів та високоізоляційними властивостями. Динамічні втрати енергії залежать від ємності затвора і швидкості перемикання транзисторів. 2D FET з малою ємністю затвора



дозволяють знижувати ці втрати, що сприяє загальному зменшенню енергоспоживання. Втрати енергії при перемиканні транзистора ( $E$ ) може бути розрахована як:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 f \quad (1.1)$$

де  $E$  – втрати енергії;  $C$  – ємність затвора;  $V$  – робоча напруга;  $f$  – частота перемикань.

Використання 2D FET особливо ефективно у портативних електронних пристроях, таких як смартфони, планшети та інші гаджети з живленням від батарей. Зменшення енергоспоживання дозволяє значно продовжити час роботи без підзарядки, що є важливою перевагою для користувачів. Крім того, зменшення тепловиділення внаслідок нижчого енергоспоживання покращує надійність і довговічність таких пристроїв.

Важливим аспектом енергоефективних схем на основі 2D FET є їхня сумісність з сучасними технологіями виготовлення інтегральних схем. Використання двовимірних матеріалів не вимагає кардинальних змін у виробничих процесах, що знижує бар'єри для їх впровадження. Наприклад, двовимірні матеріали можуть бути інтегровані в існуючі CMOS-технології, що дозволяє зберігати виробничі потужності та знижувати витрати на впровадження нових технологій.

Застосування 2D FET у енергоефективних схемах також відкриває нові можливості для розвитку енергозберігаючих технологій у широкому спектрі галузей, включаючи Інтернет речей (IoT), розумні міста та енергоефективні обчислювальні центри. Використання таких транзисторів у мережах IoT дозволяє створювати сенсори та інші пристрої з наднизьким енергоспоживанням, що є критично важливим для забезпечення автономної роботи протягом тривалого часу.

Впровадження двовимірних польових транзисторів у промисловість має великі перспективи завдяки їхнім унікальним властивостям та можливостям

інтеграції з існуючими технологіями. Використання 2D FET може значно покращити продуктивність, знизити витрати на виробництво та відкрити нові горизонти для розвитку електроніки.

Однією з головних переваг 2D FET є їхня сумісність з існуючими процесами виробництва напівпровідників. Двовимірні матеріали, такі як графен, дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ), фосфорен та інші, можуть бути синтезовані на великих площах, що робить їх придатними для масового виробництва. Це дозволяє використовувати вже існуючі виробничі потужності та технологічні процеси, що значно знижує витрати на впровадження нових матеріалів [29].

Інша важлива перспектива впровадження 2D FET у промисловість пов'язана зі зниженням вартості виробництва електронних компонентів. Ультратонкі шари двовимірних матеріалів дозволяють значно зменшити кількість використаних матеріалів, що безпосередньо впливає на зниження витрат.

Впровадження 2D FET також відкриває нові можливості для розвитку гнучкої електроніки. Гнучкі та прозорі електронні пристрої на основі двовимірних матеріалів можуть стати основою для нових поколінь екранів, сенсорів, батарей та інших компонентів, що використовуються в сучасних електронних гаджетах. Це дозволяє створювати інноваційні пристрої з новими функціональними можливостями, які раніше були недосяжні.

Застосування 2D FET у гнучкій електроніці може призвести до створення нових ринків та сегментів, таких як носима електроніка, гнучкі дисплеї, електронні текстильні вироби та інші інноваційні продукти.

Крім того, перспективи впровадження 2D FET у промисловість пов'язані з розвитком Інтернету речей (IoT). Використання енергоефективних та високочутливих транзисторів дозволяє створювати сенсори та інші пристрої з низьким енергоспоживанням, що є критично важливим для забезпечення тривалої автономної роботи у мережах IoT.

Впровадження 2D FET у промисловість також може мати значний вплив на екологічні аспекти. Зниження енергоспоживання та матеріалоемності виробництва сприяє зменшенню вуглецевого сліду та покращенню екологічної

стійкості виробничих процесів.

### 3.4. Сенсорні пристрої на основі 2D FET

Сенсорні пристрої є однією з найбільш перспективних галузей застосування двовимірних польових транзисторів завдяки їх високій чутливості, швидкій реакції та здатності виявляти різноманітні фізичні, хімічні та біологічні сигнали. Використання 2D FET у сенсорах дозволяє створювати пристрої з винятковими характеристиками, що відкриває нові можливості для їх застосування у різних сферах.

Одним з найпоширеніших напрямків застосування 2D FET є створення газових сенсорів (рис.3.4). Завдяки великій поверхні взаємодії з навколишнім середовищем та високій рухливості носіїв заряду, двовимірні матеріали можуть виявляти навіть дуже низькі концентрації газів. Це робить їх надзвичайно перспективними для використання у системах моніторингу якості повітря, промислової безпеки, а також у медицині для діагностики захворювань за аналізом видиху пацієнта. Чутливість хімічного сенсора ( $S$ ) може бути розрахована як:

$$S = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_{\text{газ}} - I_0}{I_0} \quad (1.2)$$

де  $S$  – чутливість;  $\Delta I$  – зміна струму;  $I_0$  – початковий струм;  $I_{\text{газ}}$  – струм при наявності газу.

Графенові транзистори, наприклад, демонструють високу чутливість до молекул газів завдяки їх двовимірній структурі, яка забезпечує максимальну площу поверхні для адсорбції молекул. Це дозволяє виявляти навіть найменші зміни в концентрації газів, що є критично важливим для точного моніторингу та швидкої реакції на зміни в навколишньому середовищі.

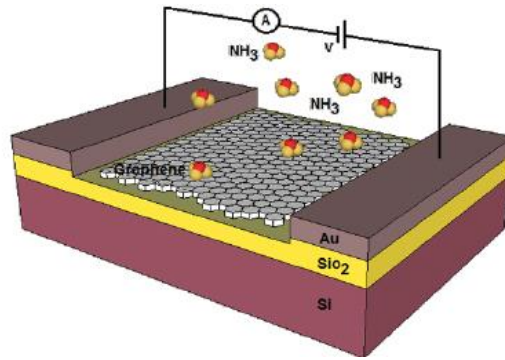


Рис.3.4. Структура газового сенсора з графеновим каналом [30]

Біосенсори на основі 2D FET є ще одним перспективним напрямком. Висока чутливість двовимірних матеріалів до змін електричних властивостей дозволяє створювати біосенсори, які можуть виявляти надзвичайно низькі концентрації біомаркерів. Це відкриває нові можливості для ранньої діагностики захворювань, моніторингу стану пацієнтів та проведення високоточних біомедичних досліджень [31-32]. Чутливість біосенсора ( $S$ ) може бути розрахована як:

$$S = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{I_{\text{біо}} - V_0}{V_0} \quad (1.3)$$

де  $S$  – чутливість;  $\Delta V$  – зміна напруги;  $V_0$  – початкова напруга;  $I_{\text{біо}}$  – напруга при наявності біомолекул.

Біосенсори на основі 2D FET можуть бути використані для виявлення різноманітних біомолекул, включаючи білки, ДНК, віруси та інші важливі біологічні маркери (рис.3.5). Це дозволяє створювати портативні та швидкі системи діагностики, які можуть бути використані безпосередньо на місці проведення медичних досліджень або в умовах відсутності лабораторного обладнання [31-33].

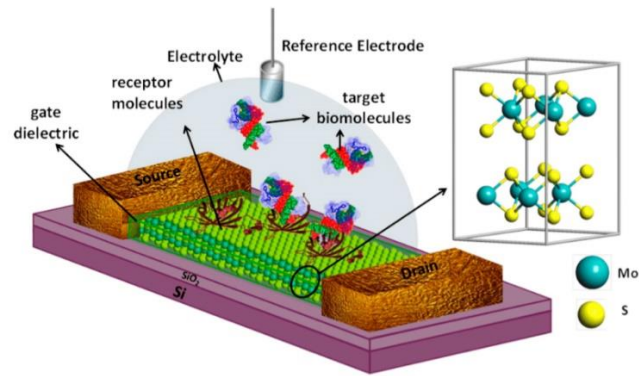


Рис.3.5. Структурна схема біосенсора з рідинним затвором на основі 2D FET на основі MoS<sub>2</sub> [34]

Крім того, 2D FET можуть бути інтегровані у складні сенсорні системи, що використовуються у різних галузях, від екологічного моніторингу до промислової автоматизації. Наприклад, такі сенсори можуть бути використані для контролю параметрів навколишнього середовища у режимі реального часу, забезпечуючи точний та надійний збір даних для подальшого аналізу та прийняття рішень [35].

## ВИСНОВКИ

1. Провівши приладово-технологічне моделювання двомірного польового транзистора із каналом  $\text{MoS}_2$  отримано наступні електричні параметри: порогова напруга 0,4-0,5 В (порогова напруга була визначена для зміщення стоку 0,03 В та 0,60 В, при цьому на затворі напруга змінювалася від 0 В до 1,20 В); допороговий розкид 110-120 мВ/декаду; струм для відкритого та закритого каналу відповідно становив  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  А та  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  А, їх відношення  $10^5$ - $10^7$  (коефіцієнт підсилення); зниження бар'єру, індуковане стоком 800-850 мВ/В. В рамках моделі Шоклі при напрузі зміщення 0,60 В рухливість носіїв становила близько  $80\text{cm}^2/\text{Vs}$ . Отримані результати добре узгоджується з відомими літературними даними для польових транзисторів із каналом  $\text{MoS}_2$ .

2. Польові транзистори із каналом у вигляді 2D матеріалів демонструють набагато меншу величину допорогового розкиду, що важливо для масштабування транзисторів. Це важко досягти в кремнієвих структурах, навіть якщо використовуються передові конструкції FinFET, VGAA та інші.

3. Двовимірні транзистори також демонструють набагато менший субпороговий нахил, що важливо для постійного масштабування довжини затвора до менше 10 нм. Підтримання високої електронної провідності на рівні остаточного обмеження ( $< 1$  нм) може дозволити використовувати транзистори з довжиною затвора менше 10 нм, зберігаючи при цьому відносно низький субпороговий нахил і струм витоку, що важко досягти за допомогою кремнієвої електроніки, навіть із передовими конструкціями FinFET. Таким чином, застосування атомарно тонких двовимірних матеріалів відкриває шлях для технологічних вузлів 5 нм.

література :

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Graphene transistors / Schwierz, F. // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – V.5. – P. 487-496.
2. Electrical characterization of 2D materials-based field-effect transistors / B.M Sekhar. // *2D Mater.* – 2021. – V.8. – P. 29.
3. The rise of graphene / Geim, A. K., Novoselov, K. S. // *Nature materials*. – 2007. – V.6. – P. 183-191.
4. High performance multilayer MoS<sub>2</sub> transistors with scandium contacts / Das, S., Chen, H. Y., Penumatcha, A. V., Appenzeller, J. // *Nano letters*. – 2013. – V.13. – P. 100-105.
5. High-performance single layered WSe<sub>2</sub> p-FETs with chemically doped contacts / Fang, H., Battaglia, C., Carraro, C., Nemsak, S., Ozdol, B., Kang, J. // *Nano Letters*. – 2012. – V.12. – P. 3788-3792.
6. [https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-MoS2-a-Top-view-of-MoS2-monolayer-hexagonal-crystal-structure\\_fig1\\_325970119](https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-MoS2-a-Top-view-of-MoS2-monolayer-hexagonal-crystal-structure_fig1_325970119) – Crystal structures of MoS<sub>2</sub>, дата доступу: 10.04.2024.
7. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides / Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., Strano, M. S. // *Nature Nanotechnology*. – 2012. – V.7. – P. 699-712.
8. Black phosphorus field-effect transistors / Li, L., Yu, Y., Ye, G. J., Ge, Q., Ou, X. // *Nature nanotechnology*. – 2014. – V.9. – P. 372-377.
9. [https://www.researchgate.net/figure/Black-phosphorus-structure-Schematic-diagram-of-the-crystalline-structure-of-black\\_fig1\\_260483012](https://www.researchgate.net/figure/Black-phosphorus-structure-Schematic-diagram-of-the-crystalline-structure-of-black_fig1_260483012) – Black phosphorus structure, дата доступу: 14.04.2024.
10. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics / Dean, C. R., Young, A. F., Meric, I., Lee, C., Wang, L., Sorgenfrei // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – V.5. – P. 722-726.

11. 2D materials and van der Waals heterostructures / Novoselov, K. S., Mishchenko, A., Carvalho, A. // Science. –2016. – V.1. – P. 353.
12. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides / Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., Strano, M. S. // Nature Nanotechnology. – 2012. – V.7. – P. 699-712.
13. Physics of Semiconductor Devices / Colinge, J. P., Colinge, C. A. // Springer. – 2002. – V.1. – P. 436.
14. <https://byjus.com/physics/fet-transistor/> – Fet transistor, дата доступу: 20.04.2024.
15. [https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-view-of-a-2D-FET-a-back-gate-FET-and-b-front-dual-gate-FET\\_fig5\\_343976594](https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-view-of-a-2D-FET-a-back-gate-FET-and-b-front-dual-gate-FET_fig5_343976594) – Cross-section view of a 2D FET, дата доступу: 25.04.2024.
16. Fundamentals of Modern VLSI Devices / Taur, Y., Ning, T. H. // Cambridge University Press. – 2013. – V.1. – P. 680.
17. [https://www.researchgate.net/figure/a-Optical-microscope-image-of-a-radio-frequency-graphene-field-effect-transistor-RF\\_fig4\\_233928692](https://www.researchgate.net/figure/a-Optical-microscope-image-of-a-radio-frequency-graphene-field-effect-transistor-RF_fig4_233928692) – Performance characteristics of GFETs, дата доступу: 10.05.2024.
18. Fundamentals of Semiconductor Devices / Anderson R.L., Anderson B.L. // McGraw-Hill Education. – 2017. – V.2. – P. 832.
19. <https://silvaco.com/tcad/> – Silvaco TCAD, дата доступу: 15.05.2024.
20. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing / Lysenko I., Zykov D., Ishutkin S. // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V.1772. – P. 1-7.
21. Silvaco, ATLAS User's manual device simulation software // Silvaco International. – 2018. – V.1. – P. 1776.
22. Silvaco, DeckBuild User's Manual Device Simulation Software // Silvaco International. – 2018. – V.1. – P. 241.
23. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software // Silvaco International. – 2018. – V.1. – P. 444.



24. Research possibilities of Silvaco TCAD for physical simulation of gallium nitride power transistor / Demchenko O., Zыkov D., Kurbanova N. // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1772. – P. 1-6.
25. Beyond graphene: Progress in novel two-dimensional materials and van der Waals solids / Das, S., Robinson, J. A., Dubey, M., Terrones, H., Terrones, M., Novoselov, K. S. // Annual review of materials research. – 2015. – V. 45. – P. 1-27.
26. <https://www.mdpi.com/2072666X/15/3/406#:~:text=At%20the%20heart%20of%20its,nearly%20two%20orders%20of%20magnitude> – Comprehensive Study and Design of Graphene Transistor, дата доступа: 18.05.2024.
27. <https://mrsec.org/highlights/electrons-graphene-can-travel-100-times-faster-silicon> – Electrons in Graphene can Travel 100 Times Faster than in Silicon, дата доступа: 20.05.2024.
28. [https://www.researchgate.net/figure/Electron-mobility-in-graphene-on-various-substrates\\_fig3\\_260498116](https://www.researchgate.net/figure/Electron-mobility-in-graphene-on-various-substrates_fig3_260498116) – Electron mobility in graphene on various substrates, дата доступа: 20.05.2024.
29. Fabrication of single-and multilayer MoS<sub>2</sub> film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature / Li, H., Yin, Z., He, Q., Li, H., Huang, X. // Small. – 2012. – V.8. – P. 63-67.
30. [https://www.researchgate.net/figure/FET-based-structure-for-gas-sensor-with-a-CNT-channel-and-b-graphene-channel\\_fig2\\_263393155](https://www.researchgate.net/figure/FET-based-structure-for-gas-sensor-with-a-CNT-channel-and-b-graphene-channel_fig2_263393155) – graphene channel, дата доступа: 22.05.2024.
31. MoS<sub>2</sub> field-effect transistor for next-generation label-free biosensors / Sarkar, D., Liu, W., Xie, X., Anselmo, A. C., Mitragotri, S., Banerjee, K. // Nature. – 2014. – V.8. – P. 95.
32. High-Performance Flexible and Transparent Biosensors Using Graphene - Based Transistors / D. Akinwande, N. Petrone, J. Hone. // Nature Communications. – 2016. – V.5678. – P. 116.

33. Graphene-Based Field-Effect Transistor Biosensors for Point-of-Care Diagnostics / K. Novoselov, A. Geim, S. Morozov. // Nature Nanotechnology. – 2014. – V.169. – P.24.
34. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4811> – Non-Carbon 2D Materials-Based Field-Effect Transistor Biosensors, дата доступа: 25.05.2024.
35. Nanoelectronics and Information Technology / Waser, R. // Advanced Electronic Materials and Novel Devices. – 2012. – V.3. – P. 1040.

**ДОДАТОК А**

**СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Класичний фаховий коледж

Кваліфікаційна робота бакалавра

ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА  
ЗАСТОСУВАННЯ ДВОВИМІРНИХ ПОЛЬОВИХ  
ТРАНЗИСТОРІВ

Студента гр. ЕІ<sub>схз</sub>-016

Є.В.Федченка

Науковий керівник,  
к. ф.-м. н, доцент

І.П.Бурик

• Конотоп 2024 •



## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ХАРАКТЕРИСТИК ДВОВИМІРНИХ ПОЛЬОВИХ

### ТРАНЗИСТОРІВ

#### 1.1. Кристалічна структура та властивості 2D матеріалів

Двовимірні матеріали привернули увагу науковців завдяки своїм унікальним властивостям, які відкривають нові перспективи в різних галузях науки і техніки. Графен, дихалькогеніди перехідних металів, чорний фосфор та інші двовимірні матеріали мають значний потенціал для використання у сучасній електроніці. Ці матеріали мають шарувату структуру, де кожен шар складається з атомів металу, розташованих між двома шарами атомів халькогену.

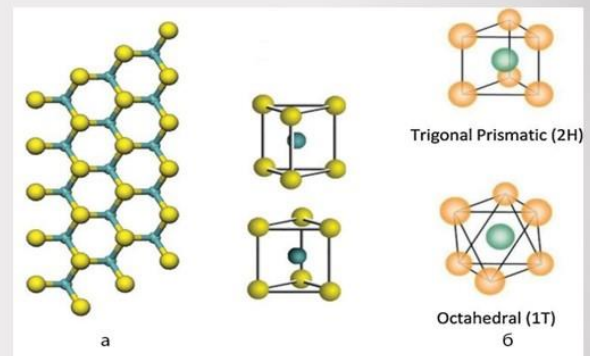


Рис.1.1. Кристалічні структури MoS<sub>2</sub>: а – вид зверху на одношарову гексагональну кристалічну структуру; б – тригональна призматична (2H) та октаедрична (1T) структури елементарних комірок

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ХАРАКТЕРИСТИК ДВОВИМІРНИХ ПОЛЬОВИХ

### ТРАНЗИСТОРІВ

#### 1.2. Порівняльні характеристики транзисторів

Таблиця 1.1

Параметр	Традиційні кремнієві транзистори	2D FET
Матеріал	Кремній	Двовимірні матеріали (графен, MoS <sub>2</sub> , WS <sub>2</sub> і т.п.)
Мобільність носіїв	Відносно висока	Вища мобільність в деяких 2D матеріалах
Ефекти масштабу	Обмежені розмірами з'єднань	Менше ефектів масштабу завдяки атомарній товщині
Канальний струм	Високий	Залежить від матеріалу, може бути дуже високим
Струм витоку	Може бути значним	Знижений завдяки кращій електростатичній керуваності
Керуваність каналом	Обмежена	Покращена завдяки атомарній товщині
Технологічна зрілість	Висока	Низька, нові матеріали все ще досліджуються
Складність виробництва	Добре відпрацьована технологія	Складніше у виробництві через новизну матеріалів
Температурна стабільність	Висока	Залежить від матеріалу, може бути менш стабільною
Застосування	Широкий спектр (комп'ютери, мобільні пристрої)	Потенційні застосування в електроніці наступного покоління
Енергоефективність	Відносно висока	Потенційно вища завдяки меншій товщині та зниженню струмів витоку
Ціна	Відносно низька (масове виробництво)	Вища (нова технологія, обмежене виробництво)

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.1. Методика моделювання в Silvaco TCAD

Завдяки своїй модульній структурі Silvaco TCAD дозволяє користувачам налаштувати процес моделювання відповідно до специфічних вимог та досліджуваних пристроїв.

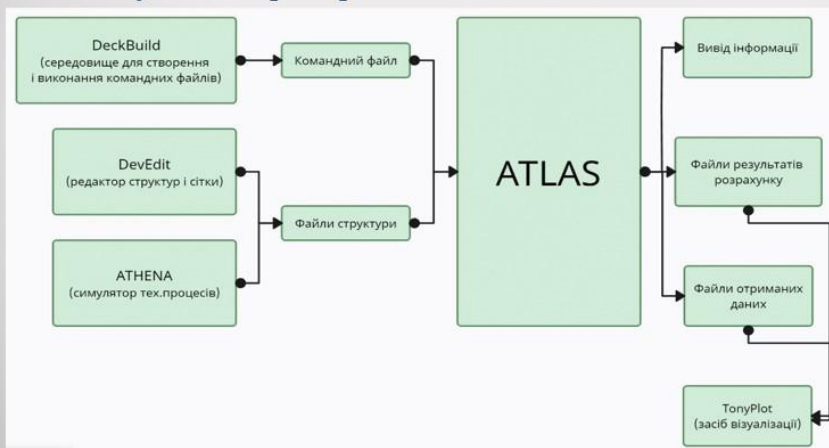


Рис.2.1. Блок-схема складових компонентів Silvaco TCAD



## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.2. Методика моделювання в Silvaco TCAD

Моделювання двовимірних польових транзисторів у Silvaco TCAD включає декілька ключових етапів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні точності та ефективності кінцевого результату.



Рис.2.2. Алгоритм проектування в Silvaco TCAD

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1. Структура та характеристики двовимірних транзисторів із каналом у вигляді молібден сульфіду

Балістичний транспорт може забезпечити високу швидкість носіїв заряду, оскільки вони не зазнають затримок через розсіювання. Це може призвести до підвищення продуктивності транзисторів. Таким чином, балістичний транспорт може дати кращий результат при моделюванні роботи двовимірних транзисторів у порівнянні з моделлю розсіювання носіїв.

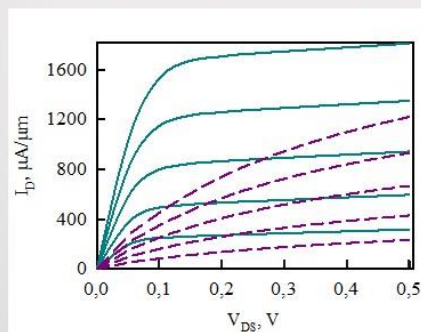


Рис.3.1. Вихідні ВАХ польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою NanoHUB у моделі з розсіюванням носіїв (штрихова лінія) та балістичним транспортом (суцільна лінія).

### РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.2. Структура та характеристики двовимірних транзисторів із каналом у вигляді молібден сульфіду

У даній роботі для прогнозування в Silvaco TCAD робочих характеристик польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$  було застосовано дифузійно-дрейфову транспортну модель із статистикою Фермі-Дірака. Врахування квантового потенціалу Бома дозволило подолати проблеми її апробації при проявленні ефектів короткого каналу. Як приклад на рис. 3.2 наведено структуру в масштабі мікронної шкали та передавальні вольт-амперні характеристики для польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою Silvaco TCAD

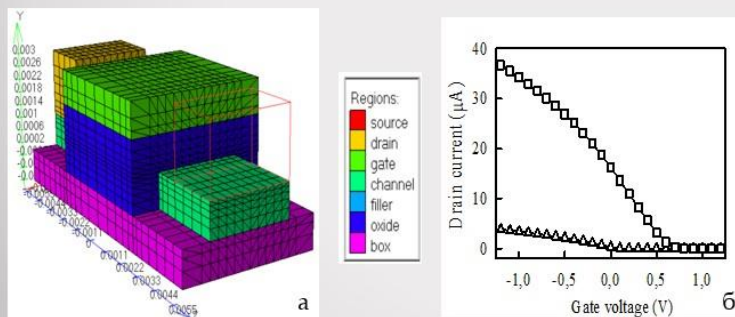


Рис.3.2. Геометрична модель (а) та передавальні ВАХ (б) для польового транзистора із каналом у вигляді  $\text{MoS}_2$ , отримані за допомогою Silvaco TCAD. Високий та низький рівні напруги на електродах витоку та стоку відповідно  $V_{dsH}=0,60$  В (квадрати) та  $V_{dsL}=0,03$  В (трикутники)

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### 3.3. Сенсорні пристрої на основі 2D FET

Одним з найпоширеніших напрямків застосування 2D FET є створення газових сенсорів. Завдяки великій поверхні взаємодії з навколишнім середовищем та високій рухливості носіїв заряду, двовимірні матеріали можуть виявляти навіть дуже низькі концентрації газів. Це робить їх надзвичайно перспективними для використання у системах моніторингу якості повітря, промислової безпеки, а також у медицині для діагностики захворювань за аналізом видиху пацієнта.

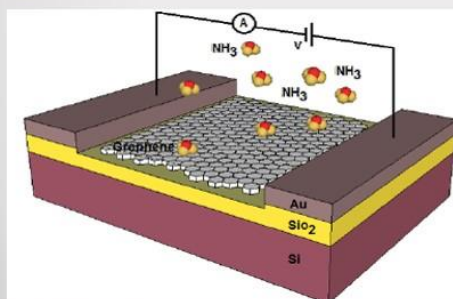


Рис.3.3. Структура газового сенсора з графеновим каналом

### РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.4. Сенсорні пристрої на основі 2D FET

Біосенсиори на основі 2D FET є ще одним перспективним напрямком. Висока чутливість двовимірних матеріалів до змін електричних властивостей дозволяє створювати біосенсиори, які можуть виявляти надзвичайно низькі концентрації біомаркерів. Це відкриває нові можливості для ранньої діагностики захворювань, моніторингу стану пацієнтів та проведення високоточних біомедичних досліджень

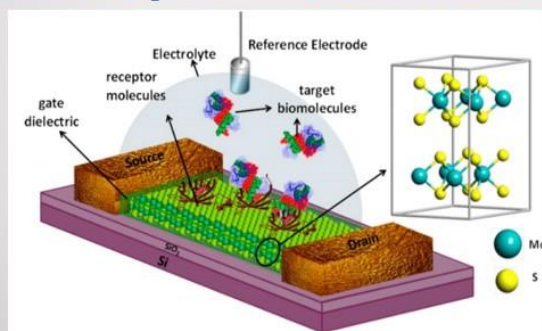


Рис.3.4. Структурна схема біосенсора з рідинним затвором на основі 2D FET на основі MoS<sub>2</sub>

## ВИСНОВКИ

1. Провівши приладово-технологічне моделювання двомірного польового транзистора із каналом  $\text{MoS}_2$  отримано наступні електричні параметри: порогова напруга 0,4-0,5 В (порогова напруга була визначена для зміщення стоку 0,03 В та 0,60 В, при цьому на затворі напруга змінювалася від 0 В до 1,20 В); допороговий розкид 110-120 мВ/декаду; струм для відкритого та закритого каналу відповідно становив  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  А та  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  А, їх відношення  $10^5$ - $10^7$  (коефіцієнт підсилення); зниження бар'єру, індуковане стоком 800-850 мВ/В. В рамках моделі Шоклі при напрузі зміщення 0,60 В рухливість носіїв становила близько  $80\text{см}^2/\text{Вс}$ . Отримані результати добре узгоджуються з відомими даними для польових транзисторів із каналом  $\text{MoS}_2$ .
2. Польові транзистори із каналом у вигляді 2D матеріалів демонструють набагато меншу величину допорогового розкиду, що важливо для масштабування транзисторів. Це важко досягти в кремнієвих структурах, навіть якщо використовуються передові конструкції FinFET, VGAA та інші.
3. Двовимірні транзистори також демонструють набагато менший субпороговий нахил, що важливо для постійного масштабування довжини затвора до менше 10 нм. Підтримання високої електронної провідності на рівні остаточного обмеження (< 1 нм) може дозволити використовувати транзистори з довжиною затвора менше 10 нм, зберігаючи при цьому відносно низький субпороговий нахил і струм витoku, що важко досягти за допомогою кремнієвої електроніки, навіть із передовими конструкціями FinFET. Таким чином, застосування атомарно тонких двовимірних матеріалів відкриває шлях для технологічних вузлів 5 нм.