

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ FET'S
ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ НАНОТРУБОК**

Студент гр. ЕІ-81_к

М.В. Донченко

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., доцент

І.П. Бурик

Конотоп 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ З З КАНАЛАМИ У ВИГЛЯДІ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК	5
1.1. Загальні характеристики вуглецевих нанотрубок.....	5
1.2. Застосування одностінних вуглецевих нанотрубок.....	7
1.3. Застосування дво- та багатостінних вуглецевих нанотрубок.....	11
1.4. Транспорт носіїв заряду з урахуванням квантових ефектів.....	14
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1. Методика чисельного моделювання в Silvaco TCAD	17
2.2. Методи отримання вуглецевих нанотрубок	21
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	19
3.1. Структури транзисторів із каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.....	23
3.2. Температурні залежності електричних параметрів.....	27
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33
ДОДАТОК А. ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДОПОВІДІ	37

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є транспорт носіїв заряду у польових транзисторах з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.

Мета роботи полягає у дослідженні впливу масштабування та температури на електричні параметри польових транзисторів з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено огляд характеристик транзисторних структур з каналами у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок. У другому розділі розглядається методика моделювання структур та електричних параметрів коаксіальних польових транзисторів з каналами у вигляді нанотрубок за допомогою програмного середовища Silvaco TCAD. У третьому розділі наведено результати дослідження структурних та температурних характеристик польових транзисторів з каналами у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок, отримані результати свідчать про більш високу їх термічну стійкість, ніж приладів з кремнієвими каналами.

Робота викладена на 37 сторінках, у тому числі включає 16 рисунків, 3 таблиці, список цитованої літератури із 38 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР, КОАКСІАЛЬНА СТРУКТУРА, ВУГЛЕЦЕВА НАНОТРУБКА, ТЕМПЕРАТУРНІ ЕФЕКТИ

ВСТУП

Мініатюризація завжди відіграла ключову роль в еволюції електроніки з безперервним зменшенням розмірів кремнієвих транзисторів в останні десятиліття, знижуючи вартість і приводячи до більш високої обчислювальної потужності при меншому споживанні енергії. Протягом десятиліть фізики, матеріалознавці та інженери працюють над розробкою все більш швидких транзисторів та з меншим споживанням енергії.

Але вже відома проблема виникає через зменшення масштабу звичайної технології КМОН (комплементарні метал-оксид-напівпровідник). Це досі невинне зменшення розміру одного транзистора зупиниться на 7 нм. Хоча 7-нм вузли технічно можливо виготовляти з кремнію, після такого розміру виникають деякі проблеми, коли електрони кремнію стають настільки фізично близькими один до одного, що відчувають ефект квантового тунелювання. Вже відома проблема межі масштабування звичайних КМОН повинна бути в найближчому майбутньому вирішена за допомогою технологій вуглецевих нанотрубок [1].

Оскільки транзистори стають все меншими набагато важче стає контролювати рух електронів через канал. Рішення цієї проблеми вирішило Intel, наприклад, розробивши перший 3D Tri-Gate 22 нм транзистор для масового виробництва в 2012 році [2]. Поряд з загальновідомими транзисторами FinFET's (Fin Field Effect Transistor) великий інтерес мають коаксіальні транзисторні структури з каналом вуглецевих нанотрубок, зокрема дослідження їх передавальних та перехідних характеристик, короткоканальних ефектів, температурних та концентраційних залежностей, тощо [1-10]. Залишається ймовірним, що технологія вуглецевих нанотрубок в майбутньому прийде на заміну кремнієвій технології, що дозволить швидко мініатюризувати електронні компоненти та виробляти нові мікросхеми.

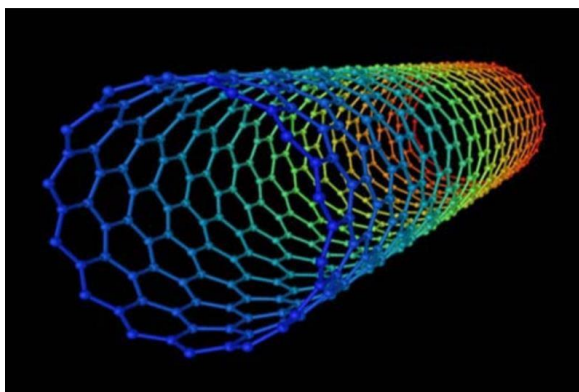
РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛАМИ У ВИГЛЯДІ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК

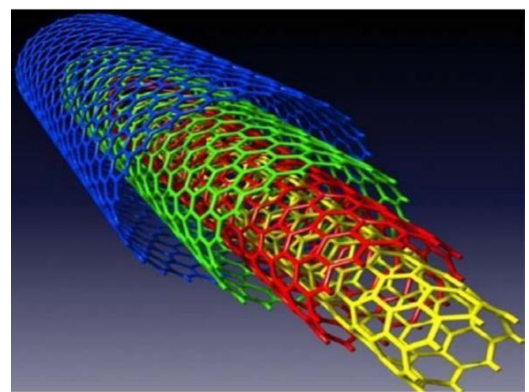
1.1. Загальні характеристики вуглецевих нанотрубок

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) є алотропом вуглецю, вони мають форму циліндричних молекул вуглецю та мають унікальні фізичні властивості, які роблять його привабливим для дослідника, як-от механічна міцність, висока електропровідність та інші властивості.

Структура ВНТ може бути сформована однією або кількома стінками вуглецевих нанотрубок. Одностінна нанотрубка (ОСВНТ) утворена шляхом намотування шару графіту, загорнутого в безшовну трубку товщиною 1 атом вуглецю, яка зазвичай має діаметр 1-2 нм і довжину кілька мікрометрів (рис.1.1а). Нанотрубки вважаються майже ідеальним одновимірним матеріалом, і тому очікується, що ОСВНТ мають усі унікальні властивості, передбачені для цих низьковимірних структур.



а



б

Рис.1.1. Приклади одностінної (а) та багатостінної (б) нанотрубок [6]

Транспорт оцінюється в 10^9 А/см² при кімнатній температурі при термічній стабільності 2800 °С у вакуумі та 750 °С в повітрі. З іншого боку, електричним властивостям багатостінних нанотрубок (БСВНТ) приділяють менше уваги

через їх складну структуру (рис.1.1б): кожна вуглецева оболонка може мати різний електронний характер і хіральність, а наявність взаємодій оболонка-оболонка змінює загальну поведінку.

Перші вуглецеві нанотрубки були синтезовані з порожнистих молекул вуглецю Сумію Іджіма в 1991 році. Пізніше, в 1993 році, дві групи виявили вуглець з однією стінкою і деякі методи їх виробництва з використанням каталізаторів з перехідних металів: Сумію Іджіма зі своєю групою в NEC і DS Bethune в ІВМ [6-8].

Як було відмічено вище, ВНТ – це листи графену, складені в певному напрямку. Напрямок, в якому скручуються графенові листи, визначається як хіральність нанотрубок. За індексами хіральності (n , m) визначається їх електропровідність. Наприклад, якщо $(n - m)$ ділиться на 3, то ВНТ буде провідником, а якщо $(n - m)$ не ділиться на 3 – напівпровідником. У ВНТ кількість позиційних хіральних атомів визначає їх типову хіральну структуру (n , m), «крісло» (n , n) або «зигзаг» (n , 0). Приклади типових структур нанотрубок відповідно до хіральності приведені рис.1.3. Поряд з цим напівпровідникові ВНТ з однакою хіральністю мають однакою щільність станів і подібні інші властивості.

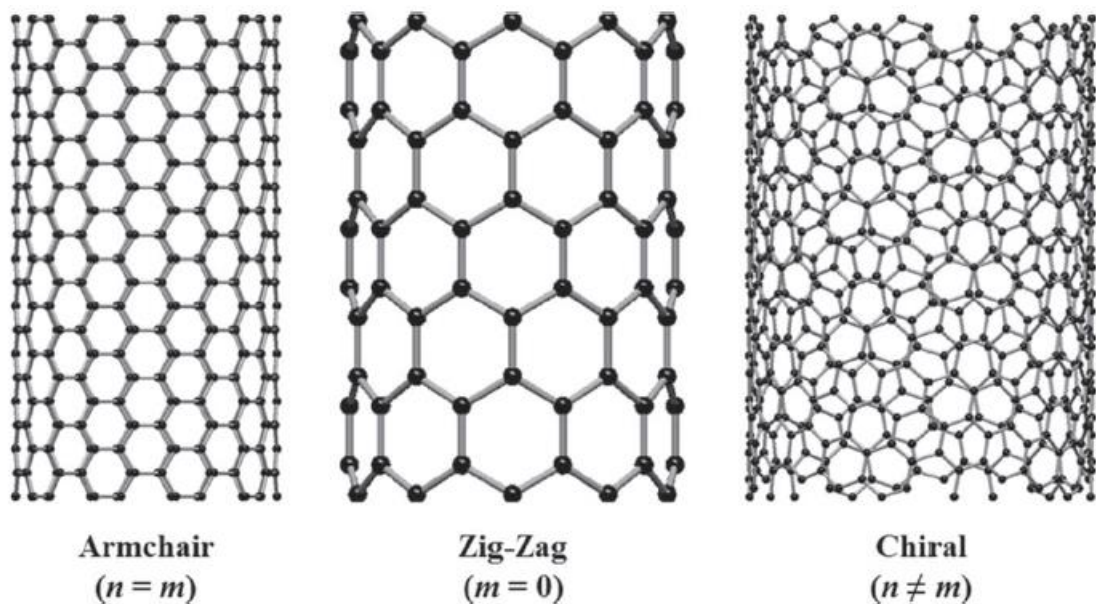


Рис.1.2. Типові структури вуглецевої нанотрубки відповідно до хіральності представлені різними значеннями n і m [8]

Ширина забороненої зони ВНТ в основному залежить від її діаметра. Це значно додатково впливає на електричні властивості транзистора. Як приклад ширина забороненої зони (E_g) вуглецевих нанотрубок може бути розрахована за співвідношенням [5]:

$$E_g = \frac{2a_0 E_{pi}}{D_{CNT}}, \quad (1.1)$$

де a_0 – відстань між атомами карбону, E_{pi} – енергія зв'язку атомів карбону, $D_{ВНТ}$ – діаметр вуглецевої нанотрубки.

Геометрія нанотрубок має значний вплив на електротранспорт носіїв заряду. Діаметр може варіюватися в широких межах, від одиниць до сотень нанометрів. ВНТ стає більш провідною у міру збільшення діаметра, але при цьому послаблюється керуваність зартвора. Крім того, це збільшує струм витоку, що збільшує розсіювання потужності, а також зменшує ширину забороненої зони та порогову напругу транзистора [5]. Це значно додатково впливає на електричні властивості польового транзистора. Крім цього, характеристики транспортування носіїв заряду в таких пристроях можуть проявлятися зміною умов їх роботи (зміна температури, механічний вплив, тощо).

1.2. Застосування одностінних вуглецевих нанотрубок

Транзистори з вуглецевими нанотрубками є перспективною технологією для отримання структур із довжиною каналу менше 7 нм і продовження виконання закону Мура. Польові транзистори (ПТ), особливо у формі КМОН, виявилися найбільш технологічно корисними структурами пристроїв в електроніці. За аналогією, транзистори з вуглецевими нанотрубками були розроблені з використанням цієї технології КМОН, і вони фактично названі ВНТПТ за подібністю до кремнієвого польового транзистора. ВНТПТ являють собою технологію для розширення та/або доповнення традиційного кремнієвого ПТ [6].

Польові транзистори з вуглецевих нанотрубок були продемонстровані в університеті Делфа групою Деккера та групою Авориса в ІВМ у 1998 році [5]. На рис. 1.3 приведено прототип ПТ з каналом ВНТ. Два електроди з благородних металів, виготовлені за допомогою літографії, були використані як джерело та сток, вуглецева нанотрубка використовувалася як канал, а сильно легована пластина як затвор. Транзистор був побудований на основі окисленої кремнієвої пластини і виготовлений шляхом вставки напівпровідника ОСВНТ між джерелом і стоком в ПТ, щоб створити «трек» для циркуляції електронів. Одностінні напівпровідникові трубки найкраще підходять для ВНТПТ, оскільки їх електронну систему не обходять внутрішні оболонки.

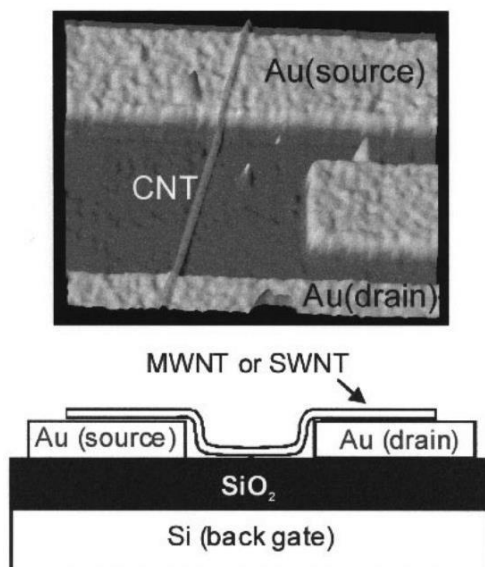


Рис. 1.3. Прототип транзистора з каналом у вигляді вуглецевої нанотрубки. Унизу: схематичний поперечний переріз ВНТПТ [6]

Струм між джерелом і стоком можна активувати або дезактивувати, прикладаючи невелику напругу до затвора, що спричиняє зміну провідності нанотрубки більш ніж у 10^6 разів, що можна порівняти з кремнієвим ПТ. В результаті ВНТПТ перемикаються без помилок і споживають менше енергії, ніж кремнієвий пристрій. Крім того, швидкість перемикання може досягати терагерц, що означає перемикання в 10^4 рази швидше, ніж поточні процесори.

На рис.1.4 приведено приклад будови та зовнішній вигляд типового коаксіального транзистора з каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки.

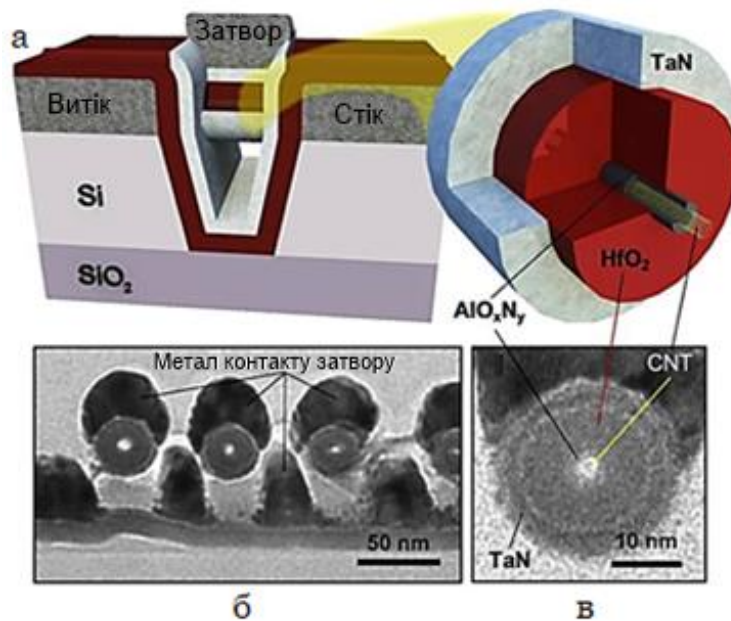


Рис.1.4. Структура та переріз каналу ВНТПТ (а), відповідні електронно-мікроскопічні зображення (б,в) [7]

У 2016 році дослідники університету Вісконсін-Медісон створили перші транзистори з каналами у вигляді щільно упакованих вуглецевих нанотрубок (рис.1.5), які за своїми характеристиками перевершили тогочасні кремнієві транзистори [6]. ВНТ наносяться на кремнієві пластини з 15 нм з SiO₂. Як діелектрик заднього затвора ПТ використовується SiO₂, а підкладка Si використовується як електрод затвора. Електроди джерела і стоку складаються з шарів паладію товщиною 30 нм. Ширина каналу становить 4 мкм, а довжина варіюється від 95 до 340 нм.

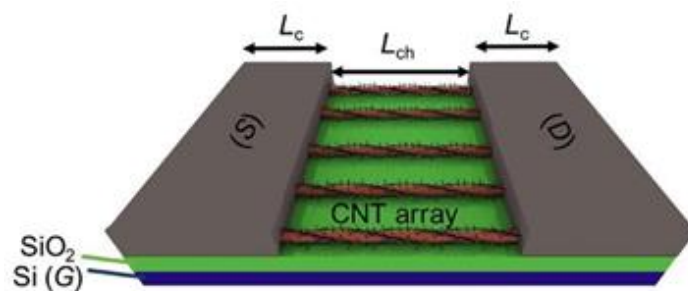


Рис.1.5. Схема масиву ВНТ на задньому затворі SiO₂/Si (G) з верхнім електродами джерела (S) і стоку (D) [6]

Характеристичну криву масивів ВНТ можна побачити на рис.1.6. Цей транзисторний підхід у форматі масиву, в якому квазібалістичний транспорт одночасно здійснюється через багато щільно упакованих ВНТ паралельно, помітно покращуючи абсолютний струм кремнієвих ПТ. Ця продуктивність досягається завдяки комбінованому відмінному вирівнюванню та відстанню між ВНТ, деяка обробка після осадження на ВНТ і висока чистота напівпровідникових ВНТ електронного типу.

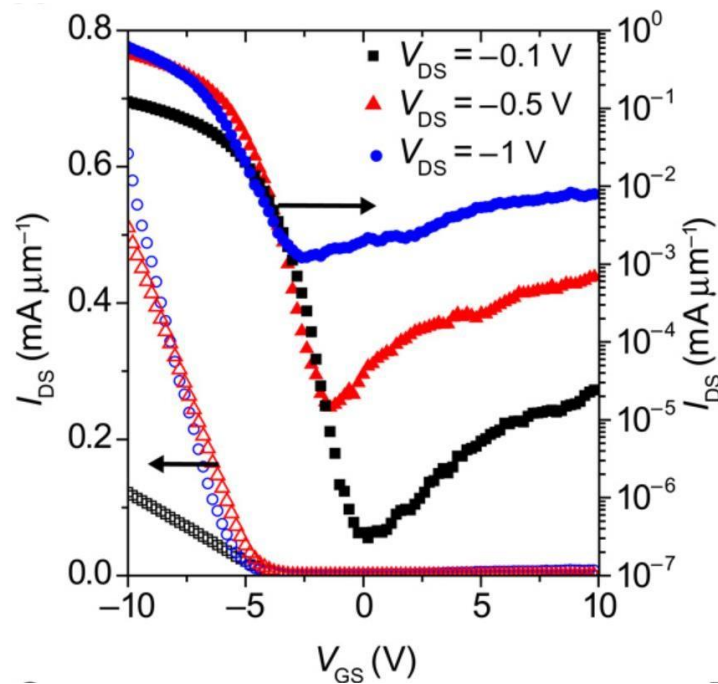


Рис.1.6. I_{DS} - V_{GS} залежності для ВНТПТ з $L_{ch} = 100$ нм, де відкриті та заповнені символи нанесені на лінійному та логарифмічному масштабах відповідно [6]

Енергоефективність, більша швидкодія, мінімізація ефектів короткого каналу, більша рухливість носіїв заряду обумовлюють актуальність дослідження коаксіальних транзисторів з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.

1.3. Застосування дво- та багатостінних вуглецевих нанотрубок

Двостінні вуглецеві нанотрубки (ДСВНТ) привертають велику увагу через їх унікальні структурні та електронні властивості в порівнянні з багатостінними (БСВНТ) і одностінними вуглецевими нанотрубками. ДСВНТ є найтоншими БСВНТ за термінами кількості шарів трубки, складених і може розглядатися як ідеальна система ВНТ для дослідження міжшарової взаємодії та її впливу на електронний транспорт і механічні властивості ВНТ. Дослідження ДСВНТ можуть дати важливу інформацію про механізм росту ОСВНТ і БСВНТ, оскільки ДСВНТ є найпростішими БСВНТ і подібні до ОСВНТ за структурою шару.

Характеристики ПТ ОСВНТ з діаметром близько 1 нм були детально вивчені і показали транспортну поведінку р-типу, тоді як деякі з БСВНТ або ОСВНТ більшого діаметра мають характеристики р- і n-типу (амбіполярні), що виникають у малих заборонених зонах. ДСВНТ надають важливу інформацію про походження транспорту носіїв як для ОСВНТ, так і для БСВНТ через їх характерну двошарову структуру. Намагаючись дослідити структурні, електронні та твердотільні властивості ДСВНТ, авторами [9] розроблено оригінальний синтетичний метод отримання ДСВНТ, так званий метод імпульсно-дугового розряду, який дає нам змогу підготувати високоякісні ДСВНТ із середнім зовнішнім діаметром 1,8 нм. Було досліджено транспортні властивості ДСВНТ, які використовуються як канали ПТ. ДСВНТ демонстрували металеву або напівпровідникову поведінку, а всі напівпровідникові ДСВНТ демонстрували амбіполярну поведінку. Ці транспортні властивості можна пояснити звуженням забороненої зони через більший зовнішній діаметр ДСВНТ. Порівняння між ДСВНТ і ОСВНТ показує, що ДСВНТ є кращими каналами ПТ, ніж ОСВНТ, і що канали ДСВНТ є важливим кандидатом для високоякісних пристроїв.

Електронно-мікроскопічні спостереження з високою роздільною здатністю (HRTEM) показують, що ДСВНТ мали внутрішній і зовнішній діаметри 0,8 –1,2 нм і 1,6–2,0 нм відповідно. На рис. 1.7а,б показано типову мікрофотографію

окремої ДСВНТ та схему синтезованої ДСВНТ відповідно [9].

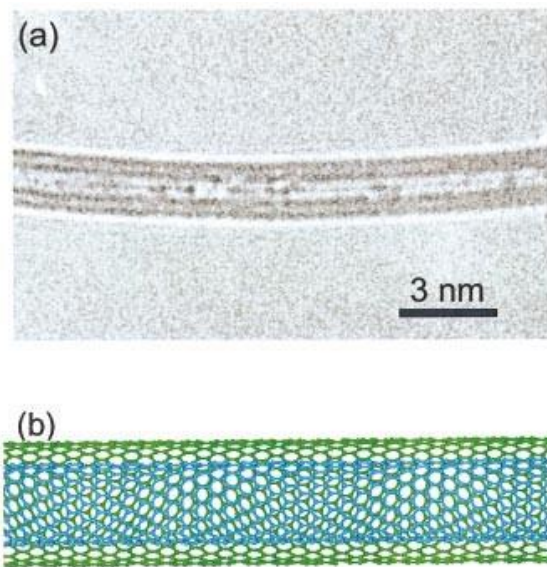


Рис. 1.7. ДСВНТ, створена методом високотемпературного імпульсного дугового розряду [9]: а – зображення HRTEM окремого ДСВНТ; б – схематичне зображення ДСВНТ

Раманівські спектри ДСВНТ при збудженні 632,8 нм показують два помітні піки 214 cm^{-1} і 136 cm^{-1} в режимі RBM, які відповідають внутрішньому і зовнішньому діаметру 1,15 нм та 1,83 нм відповідно. Для ізольованого ОСВНТ розрахована залежність RBM від діаметра була підігнана до $\omega_R \text{ cm}^{-1} = 248/d \text{ (нм)}$.

Сильно легована підкладка Si (525 мкм) була використана як задній затвор із Ti/Au електродом затвора (100/400 нм). Ізоляційний шар SiO₂ (100 нм) вирощували поверх підкладки шляхом термічного окислення. Електронно-променевою літографією і фотолітографією використовували для виготовлення електродів витоків та стоків (Ti/Au; 3/15 нм). Розрив витоків-стоків був 400 нм. ДСВНТ диспергували в розчинах N,N-диметилформаміду і капали на підкладку. Вимірювання транспорту та електропровідності ДСВНТ були виконані шляхом зміни V_{GS} від позитивного до негативного при $V_{DS}=1 \text{ мВ}$ і $T=23 \text{ К}$. Усі виміряні прилади показали металеву або напівпровідникову поведінку, і, зокрема, напівпровідникові пристрої демонстрували дію як p-, так і n-типу, так звані амбіполярні характеристики [9].

Поряд з цим у роботі [10] досліджено планарні та коаксіальні польові транзистори із каналом у вигляді вуглецевих нанотрубок. Розглянуто вплив легування витоків/стоків та хіральності на струм витоків, вольт-амперні

характеристики. Крім того, проведено аналіз впливу довжини нанотрубки, товщини затвора на вольт-амперні характеристики, а також вплив high-k матеріалів на ці характеристики, тощо. Показано, що зі зменшенням довжини нанотрубки струм витоку зростає. У роботі [10] отримано оптимальне значення ширини затвору 5 нм. Відмічено, що електричні параметри для таких транзисторів були значно кращі, ніж для аналогічних із довжинами затворів 2 нм або 3 нм

У роботі [11] відмічено, що польові транзистори з каналом у вигляді ВНТ мають значні струми витоку у вимкненому стані. Це призводить не тільки до збільшення споживаної потужності, а також до потенційно неправильної логічної функціональності. Авторами експериментально продемонстровано модель з асиметричними вентилями побудованих на основі вуглецевих нанотрубок. Остання дозволяє зменшити струм витоку у вимкненому стані більше ніж у 60 разів при тій самій напрузі зміщення.

Робота [12] присвячена дослідженню електропровідності з урахуванням квантового тунелювання у полімерних нанокомпозитах на основі одно- та двостінних ВНТ з різною хіральністю. Невизначеність геометричних параметрів та точок перетину останніх моделювалась методом Монте-Карло. Показано, що вплив тунельних ефектів був найбільш очевидним для коротких одно-та двостінних ВНТ. Для більш довгих одностінних ВНТ та мереж на їх основі тунельні ефекти відіграють незначну роль, якою можна знехтувати.

Авторами [13] спроектовано польовий транзистор з тунельним каналом у вигляді ВНТ з т.зв. електростатичним легуванням (ED-Tunnel ВНТПТ). Додаткові електроди навколо витоку і стоку заміщують відповідне легування домішками цих областей. Це дозволяє уникнути проблем пов'язаних з низьким рівнем Фермі, деактивацією домішок, тощо та дозволяє підвищити продуктивність.

Робота [14] присвячена дослідженню електропровідності при розгляді квантового тунельного опору полімерних нанокомпозитів на основі одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок різної хіральності. Невизначеності

геометричних параметрів і перетину останніх моделюються методами Монте-Карло. Результати показують, що ефект тунелювання найбільш виражений для коротко- та багатостінних ВНТ довжиною близько 5 мкм. Для довших одностінних ВНТ довжиною близько 15 мкм і мереж на їх основі ефект тунелювання незначний і його можна знехтувати. Крім того, у роботі [14] аналізуються матеріали, які використовуються для виготовлення транзисторних електродів з багатьох аспектів - від технології виготовлення, структури та електрофізичних властивостей до ефективного розподілу вихідних сигналів різних компонентів у затворі та найближчим часом.

1.4. Транспорт носіїв заряду з урахуванням квантових ефектів

Розглянемо елементи теорії покладеної в основу чисельного моделювання транспорту носіїв заряду з урахуванням квантових ефектів у каналах ПТ [15-18].

У рівнянні Пуассона електростатичний потенціал φ пов'язаний з просторовою густиною заряду ρ :

$$\operatorname{div}(\varepsilon \nabla \varphi) = -\rho, \quad (1.2)$$

де ε – діелектрична проникність.

Зв'язок між вектором напруженості електричного поля E та електричним потенціалом:

$$E = -\nabla \psi. \quad (1.3)$$

Швидкості зміни концентрації носіїв заряду визначають за допомогою рівнянь неперервності для електронів (n) та дірок (p):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} J_n + G_n - R_n, \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} J_p + G_p - R_p, \quad (1.5)$$

де q , J_n та J_p , G_n та G_p , R_n та R_p – заряд електрона, вектор густини сили струму, коефіцієнти генерації, коефіцієнти рекомбінації.

Визначення коефіцієнтів дифузії D знаходять згідно рівнянь Ейнштейна, які отримують із рівнянь статистики Больцмана та Фермі-Дірака (ФД). Області з високим легуванням та об'єкти малих розмірів моделюються згідно рівняння статистики ФД.

У рамках статистики Больцмана:

$$D = \frac{kT_L}{q} M, \quad (1.6)$$

де k , T_L – стала Больцмана, температура решітки

У рамках статистики ФД для електронів (подібні вирази використовуються для дірок):

$$D = \frac{\left(\frac{kT_L M_n}{q}\right) F_{1/2} \left\{ \frac{1}{kT_L} [e_{F_n} - e_c] \right\}}{F_{-1/2} \left\{ \frac{1}{kT_L} [e_{F_n} - e_c] \right\}} \quad (1.7)$$

$$e_{F_n} = -q\phi_n = -\frac{kT_L}{q} \ln\left(\frac{n}{n_{ie}}\right), \quad (1.8)$$

де F_α , ϵ_c , ϵ_{F_n} , ϕ_n та n_{ie} – інтеграл ФД порядку α , енергія зони провідності, квазірівень Фермі, квазіпотенціал Фермі та ефективна концентрація власних носіїв.

Поточні рівняння дрейф-дифузійної моделі (ДД) для електронів та дірок:

$$J_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kT \nabla (\ln n_{ie})), \quad (1.9)$$

$$J_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p p (kT \nabla (\ln n_{ie})), \quad (1.10)$$

де q – заряд електрона, D_n та D_p – коефіцієнт дифузії носіїв, n та p – концентрації носіїв, μ_n та μ_p – рухливість носіїв, ψ – хвильова функція, k – постійна Больцмана, T – температура Дебая, n_{ie} – ефективна внутрішня концентрація.

Квантові ефекти включені шляхом врахування у рівняннях транспортних моделей квантового потенціалу Бома (англ. Bohm Quantum Potential – BQP).

Тоді рівняння (1.9) та (1.10) матимуть вигляд [18]:

$$J_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla(\psi - Q) - \mu_n n (kT \nabla(\ln n_{ie})), \quad (1.11)$$

$$J_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla(\psi - Q) + \mu_p p (kT \nabla(\ln n_{ie})), \quad (1.12)$$

У рівняннях (1.11) та (1.12) додатковий член Q представляє квантовий потенціал Бома, який визначається як [18]:

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\gamma \nabla[M^{-1} \nabla(n^\alpha)]}{n^\beta}. \quad (1.13)$$

де \hbar – стала Планка, M – ефективна маса, n – концентрація носіїв, γ та α – параметри підгонки визначається умовою квантового обмеження та відповідно становили 1,4 та 0,3 [18].

Таким чином ДДМ із врахуванням ВQR дозволяє коректно врахувати квантові ефекти та змоделювати транспорт носіїв в каналах у каналах тривимірних структур польових транзисторів ПТ.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика чисельного моделювання в Silvaco TCAD

Системи автоматизованого проектування електронних структур становлять основу для розробки та дослідження елементів надвеликих інтегральних схем, тощо. Для проектування напівпровідникових приладів широко використовують програмні засоби Technology Computer-Aided Design (TCAD), які дозволяють змоделювати технологічний процес формування структури та її електрофізичні властивості. На рис. 2.1 приведено алгоритм проектування електронних приладів від компанії Silvaco. Алгоритм реалізується шляхом комплексного застосування моделей структури, вибором матеріалів з локальної бази даних або ручним заданням потрібних параметрів, задання профілів легування, тощо.

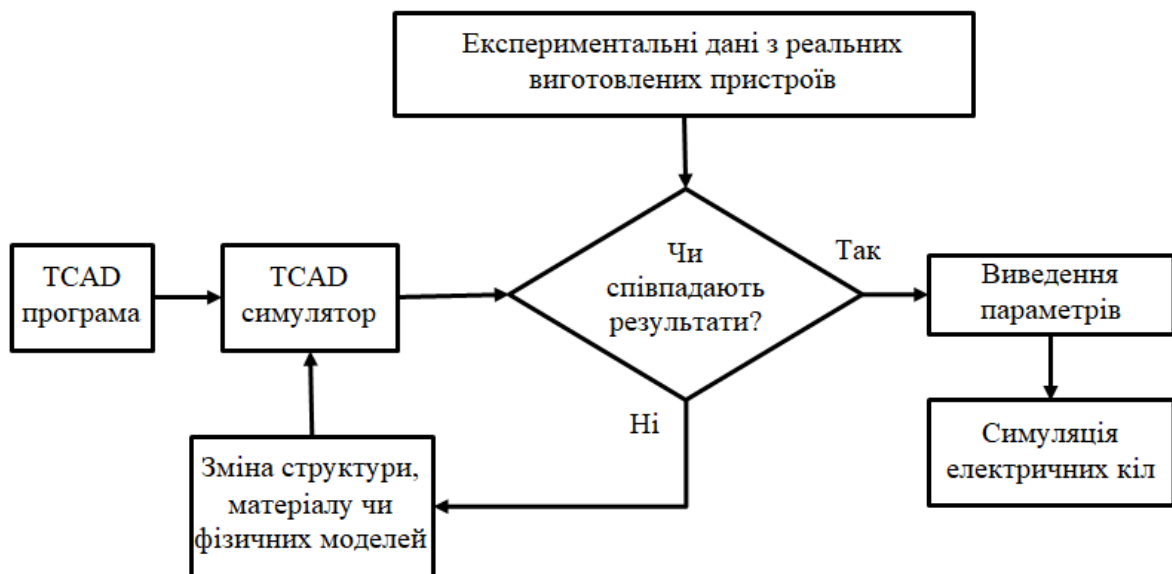


Рис. 2.1. Алгоритм проектування в TCAD. Адаптовано із роботи [24]

В даній роботі було використано TCAD Silvaco [18-25]. За вихідними даними було спроектовано структуру приладу (визначено базові області, функціональні матеріали, легування домішками, тощо). Далі проведено підбір транспортних моделей і отримано тестові вольт-амперні характеристики. Після

цього здійснено уточнення параметрів структури, характеристик матеріалів, коефіцієнтів для транспортних моделей та інше.

Геометрія напівпровідникових приладів циліндричної (коаксіальної) форми створювалася за допомогою відповідних операторів `mesh cylindrical three.d`, де параметром `cylindrical` задаються радіус, кут та Z -координати, а параметром `three.d` створюється тривимірна сітка. Транспорт заряду моделювався за допомогою операторів `models fermi bqr.n SRH ni.fermi bqr.ngamma=1.089 bqr.nalpha=0.5 evsatmod=1 fldmob print bqr.qdir=3 temp=300`. Останній оператор дозволяє варіювати величини температури. Параметр `fermi` враховує дрейф-дифузійний транспорт заряду в рамках статистики Фермі-Дірака, `srh` рекомбінаційні механізми Шоклі-Рід-Холла, `bqr.n` квантовий потенціал Бома для електронів [22-24].

Як відомо інструменти ATLAS від Silvaco TCAD включають в себе як дрейф-дифузійну транспортну модель, так і вдосконалені квантові моделі. Поряд з цим квантові ефекти включені в ATLAS шляхом зміни рівнянь транспортних моделей. Зокрема може розглядатися врахування Bohm quantum potential (BQP) [5,15].

Для проектування ВНППТ та інших також можуть бути використані on-line ресурси NanoHUB і т.п. В основу їх роботи покладено можливість моделювати нанорозмірні електронні структури. Це здійснюється шляхом розв'язання систем рівнянь Пуассона і Шредінгера, в рамках співвідношення Non-Equilibrium Green's Function. Для розв'язання рівняння Пуассона, що зв'язує заряди та потенціали всередині каналу приладу використовується тривимірна задача. У цьому випадку сітка будується навколо кожного одиничного елемента (атома, іона) структури. Двовимірна модель Шредінгера визначає можливість знаходження носія заряду в перерізах каналу, а сам транспорт враховується одновимірним рівнянням [26,27].

Таким чином в рамках співвідношення Ландауера-Буттікера квазібалістичний транспорт носії заряду для одновимірних каналів (одно- та багатостінні вуглецеві нанотрубки) польових транзисторів може бути

визначений згідно виразу [18]:

$$I_{DS}(V_{DS}, V_{GS}) = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} \{T(E, V_{DS}, V_{GS}) [f_S(E - E_{FS})] - [E - E_{FD}]\} dE, \quad (2.1)$$

де E_{FS} та E_{FD} – рівні Фермі відповідно витoku та стоку, $f_S(E, E_{FS})$ and $f_S(E, E_{FD})$ – функції Фермі-Дірака відповідно витoku та стоку, $T(E, V_{DS}, V_{GS})$ – транспортний коефіцієнт.

На рис. 2.2 зображено блок-схему компонентів САПР Silvaco. Основним типом файлів є командні файли створені в DeckBuild. В них записується послідовність команд на виконання тією чи іншою програмою з набору САПР.

Моделювання можна проводити для дво- та тривимірних структур. Останні створюють у програмі DevEdit, командами ATLAS, або в симуляторах технологічних процесів ATHENA та VICTORY.

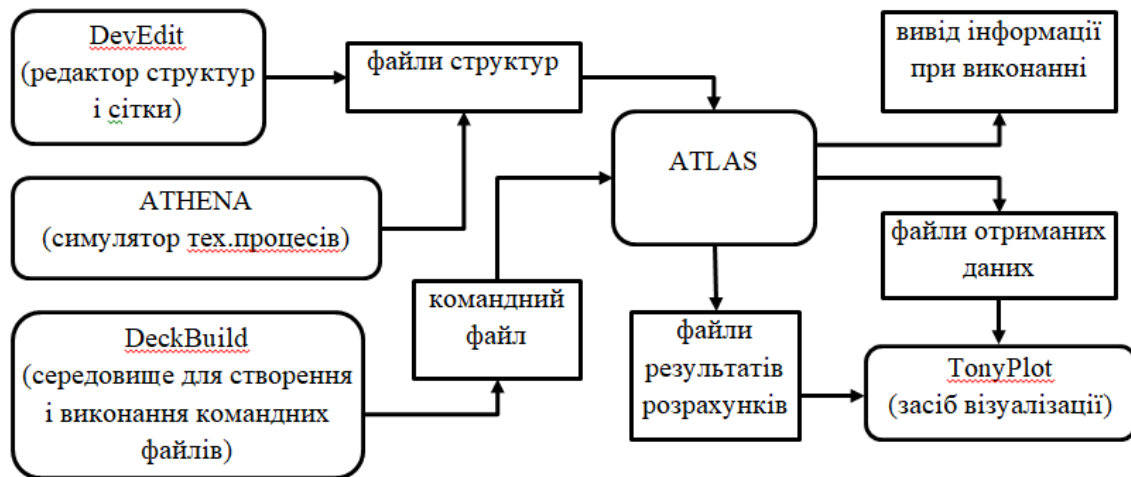


Рис. 2.2. Блок-схема засобів Silvaco TCAD [24]

На рис.2.3 зображено інтерфейси програмних компонентів САПР Silvaco. Загальна циліндрична геометрія створювалася за допомогою операторів, якими задаються радіус, кут та Z-координати, а також створюється 3D-сітка. Особливості транспорту заряду визначалися операторами, які дозволяють враховувати дифузійно-дрейфовий транспорт заряду в рамках статистики Фермі-Дірака, особливості рухливості

інверсійного шару, рекомбінаційні механізми Шоклі-Рід-Холла, квантовий потенціал Бома, тощо.

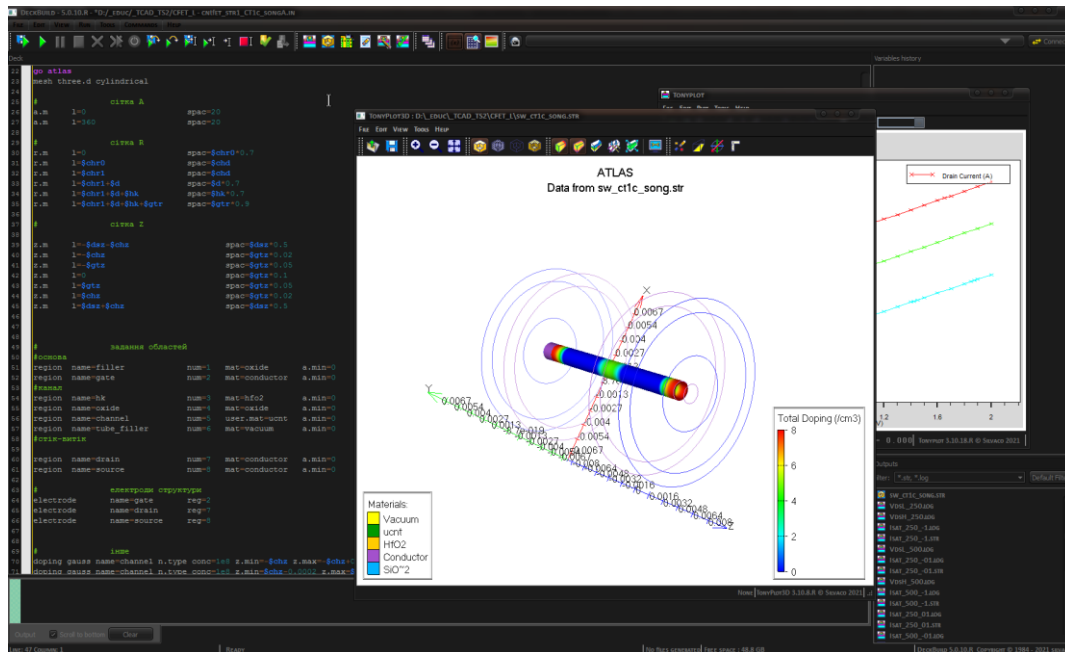


Рис. 2.3. Інтерфейс Silvaco TCAD: Deckbuild який запускає ATLAS, Tonyplot та Tonyplot3D

Основними метричним показники польових транзисторів вважаються порогова напруга; допороговий розкид (англ. Subthreshold Swing) SS ; сила струму відкритої та закритої структури (який ще називають струмом втрат або виток), зниження бар'єру, індуковане стоком (Drain-Induced Barrier Lowering) та інші.

2.2. Методи отримання вуглецевих нанотрубок

Розглянемо чотири найбільш відомих методи синтезу ВНТ's.

Перший – це так званий метод «електричного дугового розряду», який дозволяє виготовляти макроскопічні кількості нанотрубок. Він складається з підключення двох графітових стрижнів до джерела живлення, розділених між собою. Кілька міліметрів, а потім через бруски пропускається струм. Утворюючи іскру інтенсивністю близько сотень ампер, вуглець випаровується в гарячу

плазму. Частина цієї плазми конденсується у вигляді одно- і багатостінних вуглецевих нанотрубок. Цей метод був розроблений і опублікований в 1992 році Томасом Еббесером і Пуллікелем М. Аджаян, з лабораторії фундаментальних досліджень NEC [6-8].

Другий метод називається «Хімічне осадження з пари» (CVD) [8], який ввів Морінубо Ендо з Університету Шіншу в Нагано (Японія). У цьому способі субстрат поміщають в духовку і розігрівають до 600 °С. Потім повільно додаються метан та інші гази, вивільняючи атоми вуглецю, які можуть рекомбінувати у вигляді нанотрубок. Це дозволяє контролювати синтез, тобто кількість стінок, довжину та мікроскопічну структуру одно-, дво- та багато стінних ВНТ із чистотою до 98%. Цей метод вимагає відповідної підкладки, часто просоченої каталізатором, на якому відбувається ріст ВНТ. Найбільш поширеними субстратами, як правило, є Si, SiO₂ (кварц), Al₂O₃ або MgO. На додаток до цього, домішки, що беруть участь у процесі, зазвичай є: металами та неорганічними оксидами, що надходять від каталізатора, та аморфним вуглецем.

Третій метод відомий як «лазерна абляція» [6]. У цій техніці є суміш вуглецю і перехідних металів випаровується лазером, що проникає на металевографітовий композитний брусок. Інтенсивні імпульси лазерного променя фокусуються на пляму металографітового бруска діаметром 6-7 мм. У реакторі температура підвищується і оточує присутність інертного газу. Сажа, що утворюється в результаті лазерного випаровування, витягується газом Ar, що протікає, з високотемпературної зони і осідає на водоохолоджуваний мідний колектор. Отримані нанотрубки є одностінними з діапазоном діаметрів, які можна регулювати, змінюючи температуру реакції. Це метод з хорошою продуктивністю, але він дуже дорогий, оскільки вимагає високопотужних лазерів.

Четвертий і останній представлений метод відомий як «плазмовий факел» і розроблений спеціально для синтезу одностінкових вуглецевих нанотрубок [8]. Його запатентував Олів'є Сміляніч у 2009 році [6]. Цей метод заснований на розпиленні газової суміші мікрохвильовою плазмотроном атмосферного тиску.

Мікрохвилі генеруються магнетроном від побутової мікрохвильової печі, яка живиться постійним струмом. Мікрохвильове випромінювання поширюється всередині мідного хвилеводу, який на одному кінці замикається металевою пластиною. Трубка з нітриду бору або кварца служить «плазмовою трубкою» і проходить хвилевод у положенні на чверть довжини хвилі вище по течії від короткого замикання. Плазмове полум'я підтримується мікрохвильовим випромінюванням і утримується всередині плазмової трубки. Він утримується від прикріплення до стін закрученим струменем аргону. Вуглецевий газ етилен і каталізатор у вигляді фероцену вводяться осьовим потоком. Пари фероцену, отримані сублімацією з контрольованою температурою, захоплюються інертним газом (аргоном) [6].

Ці вищезгадані методи мають переваги та обмеження: У методі електричного дугового розряду високі температури та металеві каталізатори, додані до брусків, можуть створювати одно- і багатостінні нанотрубки, але з невеликою кількістю структурних дефектів. Крім того, нанотрубки мають тенденцію бути короткими (50 мікрон або менше) і осаджуватися в випадкових формах і розмірах, що не бажано в наноелектроніці. Метод хімічного осадження з парової фази (CVD) є найпростішим у виготовленні довгих нанотрубок, корисних для нановолокон, що використовуються в композитних матеріалах. Обмеженням для використання в електроніці є те, що виготовлені нанотрубки зазвичай мають багатостінні стінки і часто мають дефекти. Методом лазерної абляції отримують одностінні нанотрубки з діапазоном діаметрів, які можна контролювати, змінюючи температуру реакції, але для цього потрібні дуже дорогі та точні лазерні пристрої. У порівнянні з раніше представленим

Метод плазмового факела є безперервним і легко масштабується, і тому підходить для великомасштабного комерційного виробництва ОСВНТ. Це, мабуть, вирішує проблеми вартості та доступності достатньо великих кількостей ОСВНТ, які були основними проблемами раніше представлених методик: лазерної абляції та дугового розряду.

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Структури транзисторів із каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок

Розглянемо результати чисельного моделювання для коаксіальних структур ПТ із каналом у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок.

Затвор був відділений від каналу ізоляційними шарами двооксиду гафнію та двооксиду кремнію, паладій був використаний як матеріал усіх електродів (рис. 3.1а), канал мав вигляд одностінної вуглецевої нанотрубки (рис. 3.1б), у приконтактні області витоку та стоку введено донорну домішку з концентрацією 10^{20} на см^{-3} .

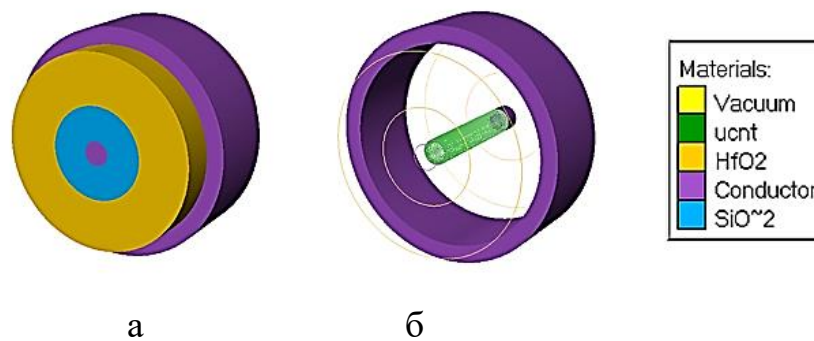


Рис. 3.1. Геометрія ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки (а) та окреме відображення його каналу та затвору (б). Затвор відділений від каналу ізоляційними шарами HfO_2 та SiO_2 , Pd використаний як матеріал електродів витоку та стоку, які розташовані на торцях

Аналогічно структури з одностінною нанотрубкою в транзисторній структурі з двостінною нанотрубкою затвор був відділений від каналу ізоляційними шарами HfO_2 та SiO_2 , Pd був використаний як матеріал електродів витоку та стоку, які розташовані на торцях (рис. 3.2а). Канал мав вигляд двостінної вуглецевої нанотрубки (рис. 3.2б).

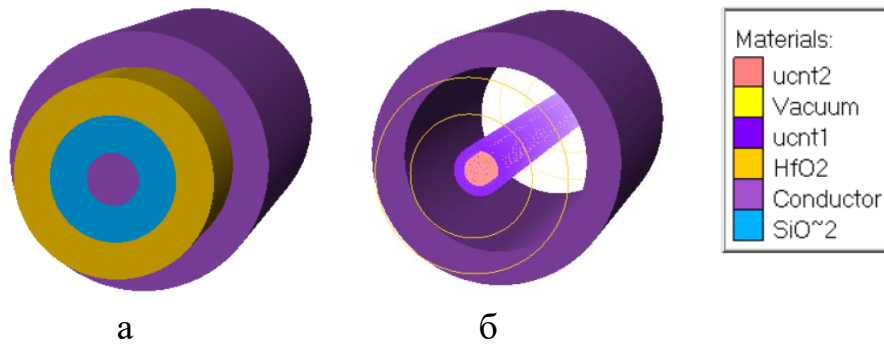


Рис. 3.2. Геометрія ПТ із каналом у вигляді двостінної вуглецевої нанотрубки (а) та окреме відображення його каналу та затвору (б). Затвор відділений від каналу ізоляційними шарами HfO_2 та SiO_2 , Pd використаний як матеріал електродів витоку та стоку, які розташовані на торцях

Геометричні розміри основних елементів транзисторної структури із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки приведені на рис. 3.3. Як канал транзистора була обрана вуглецева нанотрубка типової хіральної структури із діаметром 1,41 нм. Затвор мав довжину 5 нм. Величина ефективної роботи виходу для електрода затвору Pd становила 5,22 еВ [18,27,28]. Як підзатвориний діелектрик було взято HfO_2 товщиною 3 нм та з діелектричною проникненістю 25, бар'єрний шар SiO_2 мав товщину 2 нм та діелектричну проникненість 3,9.

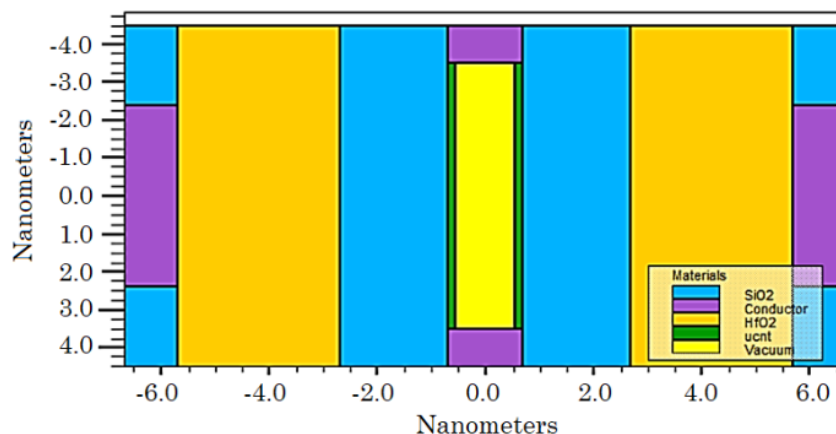


Рис. 3.3. Переріз структури ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки

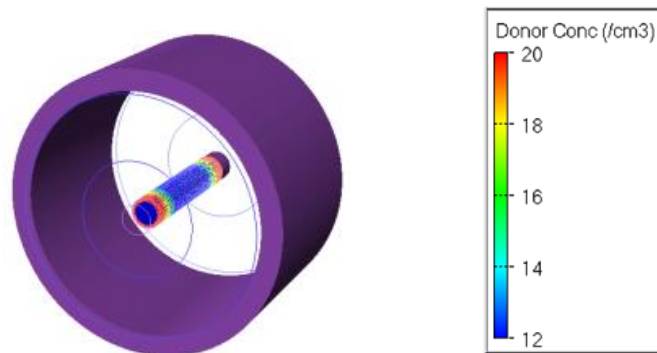
У таблиці 3.1 наведено вхідні параметри [5,18], які використовуються для створення структури ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки.

Таблиця 3.1

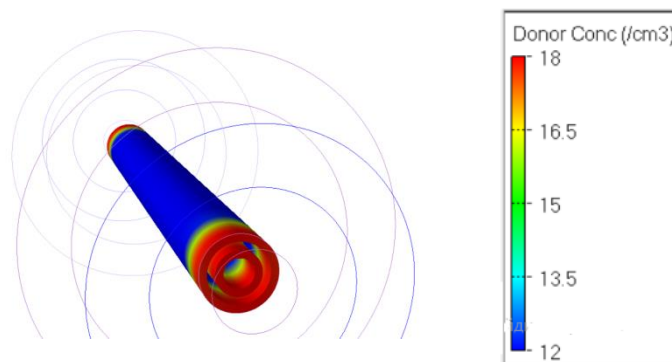
Вхідні параметри моделювання ПТ із каналом у вигляді вуглецевої нанотрубки

№	Параметр структури	Позначення	Величина
	1	2	3
1.	Хіральність ВНТ	$Ch(n,m)$	(6,2)
2.	Діаметр ВНТ	$D_{ВНТ}$	1,41 нм
3.	Довжина каналу	L	7 нм
4.	Товщина зовнішнього оксиду (HfO_2)	T_{oxi}	3 нм
5.	Діелектрична стала зовнішнього оксиду	K_{oxi}	25
6.	Легування зон стоку-витоку	N_{SD}	10^{20} см^{-3}
7.	Діелектрична стала порожнини ВНТ	$K_{ВНТ}$	1
8.	Спорідненість електронів	E_{ea}	3,2 еВ
9.	Робота виходу електрона металу затвору	Φ_m	5,22 еВ
10.	Діелектрична проникність ВНТ	ϵ	$9,7 \text{ Фм}^{-1}$
11.	Рухливість електронів	μ_n	$8 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{Вс}$
12.	Рухливість дірок	μ_p	$8 \times 10^4 \text{ см}^2/\text{Вс}$
13.	Ширина забороненої зони	E_g	0,61 еВ
14.	Густина станів у провідній зоні	$DOS(N_C)$	$8,88 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$
15.	Густина станів у валентній зоні	$DOS(N_V)$	$7,36 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$
16.	Товщина внутрішнього оксиду (SiO_2)	T_{oxi}	2 нм
17.	Діелектрична стала внутрішнього оксиду	K_{oxi}	3,9

Концентраційний розподіл домішки в індукованому каналі транзистора *n*-типу провідності було взято із даних робіт [27,28]. У приконтактні області витоку та стоку вводять донорну домішку з концентрацією 10^{20} см^{-3} . Конфігурація профілів легування каналу, яку використано при даному проєктуванні, наведено на рис.3.4.



а



б

Рис. 3.4. Тривимірні структури польового транзистора із каналом у вигляді вуглецевої нанотрубки із відображенням концентраційного розподілу домішки в каналі ОСВНТ (а) та ДСВНТ (б)

Слід відмітити, що ВНТПТ's коаксіальної геометрії вважаються більш продуктивними, ніж планарної [27,28]. В останніх як затвор може бути використаний як горизонтальний металевий електрод так і додатково легована

кремнієва підкладка під ізоляційним шаром.

Аналіз електричних параметрів для спроектованих нами транзисторних структур отриманих на основі вольт-амперних характеристик при різних зовнішніх температурах наведено в даному розділі.

3.2. Температурні залежності електричних параметрів

На рис. 3.5 наведено якісну передавальну вольт-амперну характеристику (ВАХ) та відповідну логарифмічну характеристику для визначення робочих параметрів транзистрів.

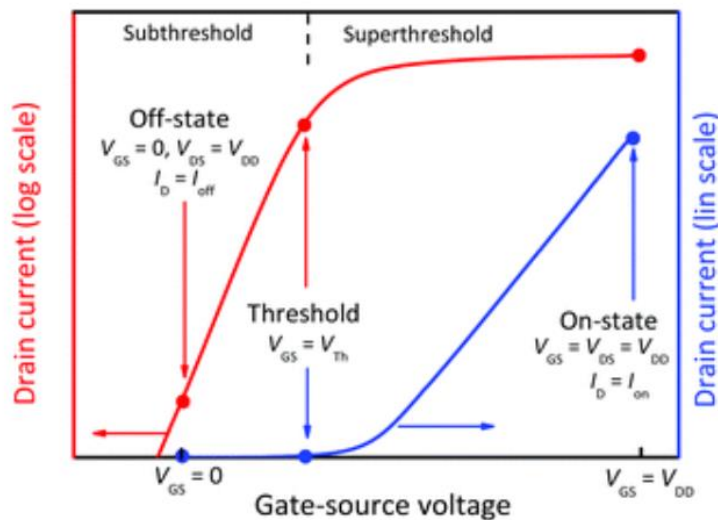


Рис.3.5. Якісна ВАХ ПТ

На рис.3.6а,б наведено ВАХ для досліджуваної геометрії транзисторів при фіксованих величині напруги на затворі від -1,0 В до 1, 0 В. Враховуючи прогнозовану термостійкість інтервал температур збільшено від 250 до 500 К. Типові передавальні ВАХ для фіксованих значень напруги на стоці 0,05 В та 0,10 В у вказаному інтервалі температур приведені рис. 3.7.

При підвищенні температури спостерігається зменшення величин порогової напруг та струму відкритої структури, проте зафіксовано експоненціальне збільшення величини струму закритої структури. Подібний характер залежностей вважається типовим для структур із затвором, що оточує канал, який є вуглецевою нанотрубкою.

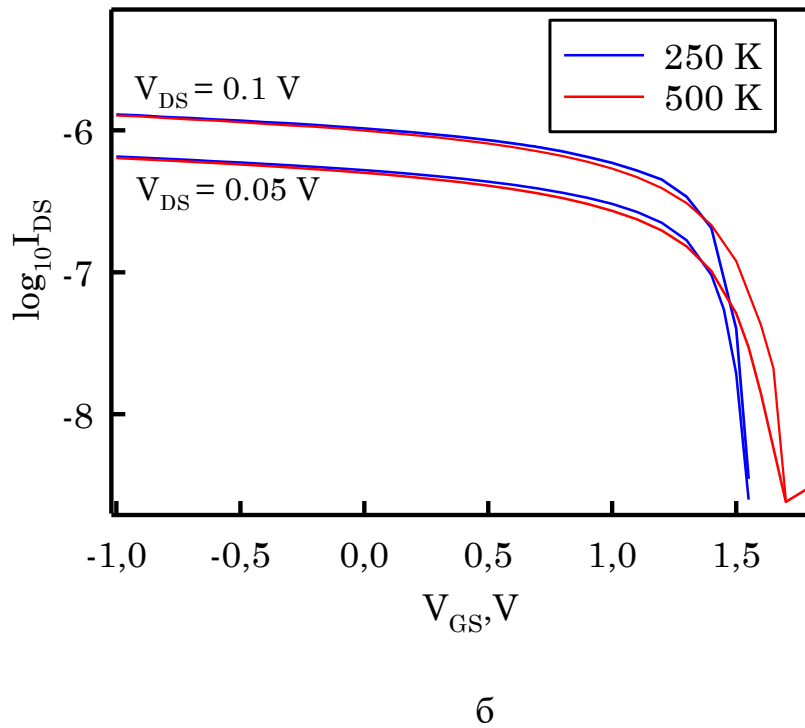
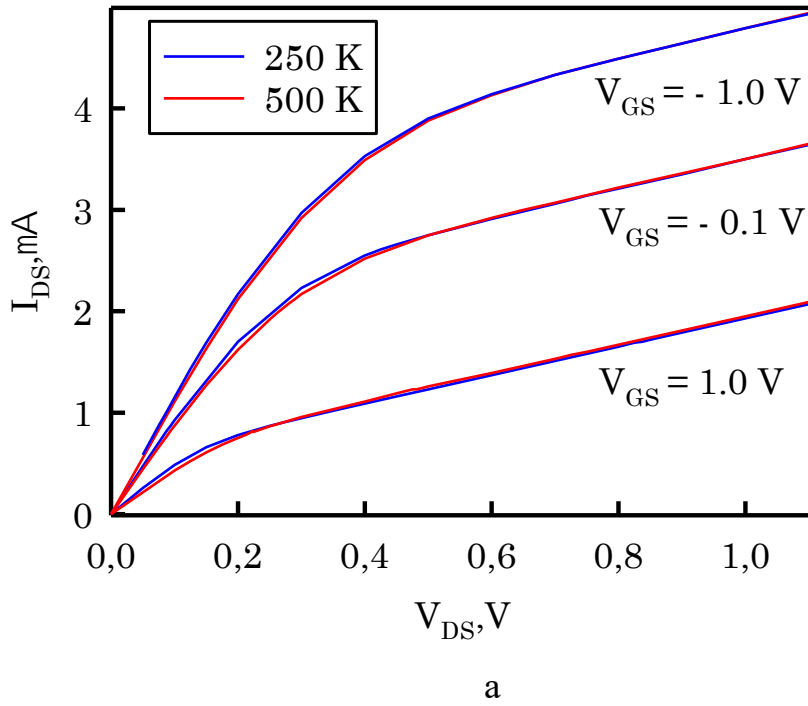


Рис. 3.6. I_{DS} - V_{DS} (а) та $\log_{10} I_{DS}$ - V_{GS} (б) характеристики для структури ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки при зміні температури від 250 К до 500 К

Результати моделювання коаксіальних структур польових транзисторів із каналом у вигляді ОСВНТ та ДСВНТ приведені в даній частині роботи. Вхідні дані для моделювання ВНТПТ взяті із роботи [5,15] та бібліотек Silvaco TCAD.

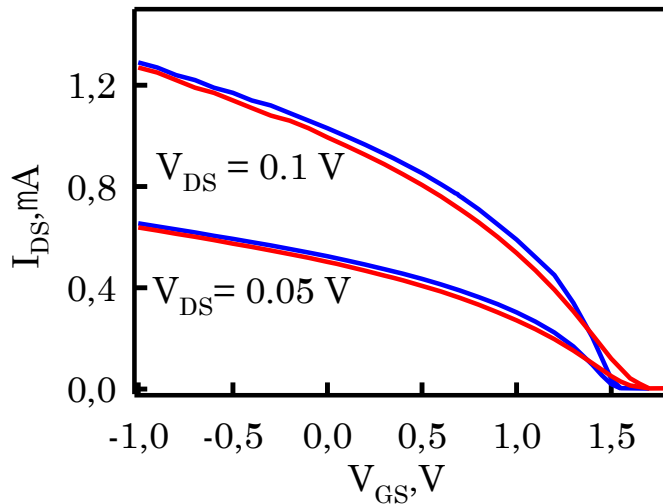


Рис. 3.7. $I_{DS}-V_{GS}$ для структури ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки при зміні температури від 250 К до 500 К

Виходячи із ВАХ транзисторних структур, отриманих за допомогою симулятора ATLAS, було визначено наступні робочі характеристики: струм вмикання I_{on} , струм витoku I_{off} та коефіцієнт I_{on}/I_{off} , порогову напругу V_t , підпороговий розкид SS . Температурні залежності електричних параметрів структури польового транзистора із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки при зміні температури від 250 К до 500 К приведені у таблиці 3.2.

З підвищенням температури значення порогової напруги і струму перемикання зменшуються, але значення струму витoku зростає в геометричній прогресії. Подібний характер кореляцій вважається типовою ознакою структур ВНТПТ [28,29] Слід зазначити, що ВНТПТ має деякі особливості визначення досліджуваних електричних параметрів. Наприклад, порогова напруга може бути різним значенням, залежно від значення вихідного матеріалу затвора (типу провідності каналу) бар'єру Шоттки в точці контакту напівпровідникової нанотрубки металевого електрода, фіксованого заряду. Крім того, відповідні значення напруг зміщення V_{GS} і V_{DS} залишаються вирішальними для електричних параметрів і залежних від температури властивостей вихідних характеристик $I_{DS}-V_{DS}$ і передачі $I_{DS}-V_{GS}$.

Таблиця 3.2

**Температурні залежності електричних параметрів ПТ при низьких
напругах зміщення та $V_{DD} = -1.0 \text{ V}$**

Параметри	$V_{DS} = 0.05 \text{ B}$		$V_{DS} = 0.10 \text{ B}$	
	250 K	500 K	250 K	500 K
$V_t, \text{ B}$	0,26	0,28	0,25	0,27
$SS, \text{ мВ/декаду}$	108,24	194,76	101,18	182,45
$I_{on}, \text{ мкА}$	0,65	0,64	1,29	1,27
$I_{off} \cdot 10^3, \text{ мкА}$	2,85	3,08	3,17	3,25
$(I_{on}/I_{off}) \times 10^{-4}$	2,28	2,08	6,23	5,64

Згідно до отриманих даних, значення температурного коефіцієнта порогової напруги (β_{V_t}), допорогового розкиду (β_{SS}) відповідно визначали за наступним чином [18,38]:

$$\beta_{V_t} = \frac{V_t(T) - V_t(250)}{V_t(250)(T - 250)}$$

та

$$\beta_{SS} = \frac{SS(T) - SS(250)}{SS(250)(SS - 250)},$$

Температурні коефіцієнти для струму вмикання ($\beta_{I_{on}}$) та струму витоку ($\beta_{I_{off}}$) за відповідними співвідношеннями:

$$\beta_{I_{on}} = \frac{I_{on}(T) - I_{on}(250)}{I_{on}(250)(T - 250)}$$

та

$$\beta_{I_{off}} = \frac{I_{off}(T) - I_{off}(250)}{I_{off}(250)(T - 250)}$$

В інтервалі температур від 250 К до 500 К при $V_{DD} = -1.0$ В та $V_{DS} = 0.1$ В отримано $\beta_{V_t} = 3,2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{SS} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{I_{on}} = -6,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ та $\beta_{I_{off}} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Слід зазначити, що електричні властивості отримані за допомогою рівнянь дифузії для опису квазібалістичного транспорту носіїв заряду в нанотранзисторах з тривимірними каналами та контактами [25, 26]. Водночас отримані компактні дані моделювання ВНТПТ свідчать про високу термостабільність його електричних параметрів та можливість широкого застосування, незважаючи на проблеми великого струму витоку та низької відтворюваності параметрів при виготовленні таких пристроїв. Результати показують, що продуктивність ВНТПТ покращена в порівнянні з ПТ з ребристими каналами або каналами на основі нанодроту [19-21, 30-37].

ВИСНОВКИ

1. Транспортні властивості досліджуваних структур коаксіальних ПТ з каналами у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок вивчалися за допомогою дрейф-дифузійної моделі із врахуванням квантових ефектів (квантового потенціалу Бома) для тривимірних моделей у програмному середовищі Silvaco TCAD; продемонстровано відмінні характеристики, зокрема було отримано величини порогової напруги (V_t), струму витоку I_{off} , коефіцієнта I_{on}/I_{off} , допорогового розкиду (SS), які добре узгоджуються з відомими результатами.

2. При дослідженні температурних ефектів в інтервалі робочих температур від 250 К до 500 К отримано типовий характер залежностей, зокрема із зростанням температури порогова напруга V_t зменшуються, допороговий розкид SS збільшуються, це обумовлено зростанням струму витоку I_{off} ; поряд з цим показано стабільність струму відкритої структури, фіксується лише незначне його спадання на 1,6 %, при напрузі джерела живленн $V_{DD} = -1,0$ В.

3. Також термостійкість електричних параметрів ПТ із каналом у вигляді одностінної вуглецевої була оцінена за допомогою температурних коефіцієнтів $\beta_{V_t} = 3,2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{SS} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{I_{on}} = -6,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ та $\beta_{I_{off}} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; проведені дослідження методом чисельного моделювання підтверджують висновок про більш високу термічну стійкість електричних параметрів характеристик польових транзисторів з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок, ніж для аналогічних приладів з кремнієвими каналами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hu C. Modern semiconductor devices for integrated circuits / C. Hu. – Upper Saddle River, N.J. ; London : Pearson Education, 2010. – 351 p.
2. Soft error susceptibilities of 22 nm tri-gate devices / N. Seifert, B. Gill, S. Jahinuzzaman et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2012. – V.59, No 6. – P. 2666-2673.
3. Development of anti-reflecting surfaces based on Si micropyramids and wet-chemically etched Si nanowire arrays / A.A. Druzhinin, V.Y. Yerokhov, S.I. Nichkalo et al. // Functional Materials. — 2018. — Т. 25, № 4. — С. 675-680.
4. Unified compact model for Gate All Around FETs- nanosheets, nanowires, multi bridge channel MOSFETs / P. Kushwaha, J. Duarte, Y.-K. Lin et al. // Informatics, Electronics and Microsystems: TechConnect Briefs 2018.- Kanpur: department of EE, Indian Institute of Technology Kanpur. – 2018. – P. 249-252.
5. DFT based estimation of CNT parameters and simulation-study of GAA CNTFET for nano scale applications / B. Singh, P. B, D. Kumar // Mater. Res. Express. – 2020. – V.7. – P. 015916-1 – 015916-8.
6. <https://www.researchgate.net/publication/325172291> - Field-Effect Transistors based on carbon nanotubes (CNTFETs), дата доступу: 10.05.2022р.
7. <https://phys.org/news/2013-05-cnt-wrap-gate-transistors-transistorscaling.html> - CNT wrap-gate transistors could extend transistor performance scaling, дата доступу: 14.05.2022р.
8. Проценко І. Ю. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці : підручник / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – 151 с.
9. Double-wall carbon nanotube field-effect transistors: Ambipolar transport characteristics / Shimada et al. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84, No 13. – P. 2412-2414.

10. Investigation of carbon nanotube FET with coaxial geometry/ P. Vimala, L. Krishna L., K. Maheshwari et al. //J. Nano- Electron. Phys. – 2020. – V. 12, No 5. – P. 05027-1 – P. 05027-5.
11. Asymmetric gating for reducing leakage current in carbon nanotube field-effect transistors / T. Srimani, G. Hills, X. Zhao et al. // Appl. Phys. Lett. – 2019. – V. 115. – P. 063107-1 – 063107-5.
12. Design and analysis of electrostatic doped tunnel CNTFET for various process parameters variation / S.Bala, M. Khosla // Superlattice. Microst. – 2018. – V. 124. – P. 160-167.
13. The effect of carbon nanotube chirality on the electrical conductivity of polymer nanocomposites considering tunneling resistance / J.Doh, S.-I.Park, Q.Yang et al. // Nanotechnology. – 2019. – V. 30. – P. 465701-1 – 465701-16.
14. Temperature dependence of electrical characteristics of carbon nanotube field-effect transistors: A Quantum Simulation Study / A. Naderi, S. M. Noorbakhsh, H. Elahipanah // J. Nanomaterials. – 2012. – V. 2012. – 7 p.
15. Effective Bohm Quantum Potential for device simulators based on drift-diffusion and energy transport / G. Iannaccone, G. Curatola, G. Fiori // Proceedings of the International Conference on the Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) 2004. – Vienna: Springer, 2004. – P.275-278.
16. Datta S. Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport – Part B: Quantum Transport / S. Datta – Singapore: World Scientific, 2018 – 260 p.
17. Lundstrom M. Fundamentals of Nanotransistors / M. Lundstrom – Singapore: World Scientific, 2018. – 342 p.
18. Electrical and Temperature Characteristics of Transistors with a Channel in the Form of a Carbon Nanotube/ I.P. Buryk, I.M. Martynenko, L.V.Odnodvoretz et al.// J. Nano- Electron. Phys. – 2022. – V.14, No 1. – P. 01024-1 – 01024-5.
19. Buryk I.P. Numerical simulation of FinFET transistors parameters/ I.P Buryk, A.O. Golovnia, M.M. Ivashchenko et al. // J. Nano- Electron. Phys. – V.12, №3. – 2020. – pp. 03005-1 – 03005-4.

20. Numerical simulation of field-effect transistor GAA SiNWFET parameters based on nanowires / I.P. Buryk, M.M. Ivashchenko, A.O. Holovnia et al. // *J. Nano-Electron. Phys.* – 2020. – V. 12, No 6. – P. 06012-1 – P. 06012-4.
21. Numerical simulation of field-effect transistor with a channel in the form of a nanowire / I.P. Buryk, A.O. Holovnia, I.M. Martynenko, O.P. Tkach // *J. Nano-Electron. Phys.* – 2021. – V.13, No 4. – P. 04030-1 – 04030-5.
22. Приладаво-технологічне моделювання Silvaco TCAD при викладанні навчальних дисциплін інженерно-технічного циклу / І.П. Бурик, А.О. Головня, М.М. Іващенко // *Матеріали X Науково-методичної конференції, м.Суми, 14-15 травня 2020 р.* – Суми: СумДУ, 2020. – С. 39-41.
23. *DeckBuild User's Manual Device Simulation Software* / Silvaco. – Santa Clara: Silvaco International, 2018. – 241 p.
24. *ATLAS user's manual device simulation software* / Silvaco. – Santa Clara: Silvaco International, 2018 – 1776 p.
25. *ATHENA User's Manual Device Simulation Software* / Silvaco. – Santa Clara: Silvaco International, 2018 – 444 p.
26. Datta S. *Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport – Part B: Quantum Transport* / S. Datta – Singapore: World Scientific, 2018 – 260 p.
27. Lundstrom M. *Fundamentals of Nanotransistors* / M. Lundstrom – Singapore: World Scientific, 2018. – 342 p.
28. Can carbon nanotube transistors be scaled down to the sub-5 nm gate length? / L. Xu, J. Yang, C. Qiu et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2021. – V. 13. – P. 31957 – 31967.
29. Origins and characteristics of the threshold voltage variability of quasiballistic single-walled carbon nanotube field-effect transistors // Q. Cao, S. Han, A. V. Penumatcha, et al./ *ACS Nano.* – 2015. – V. 9, № 2. – P. 1936 – 1945.
30. Investigation of Nanostructure Phase Composition and Field Emission Properties in the Ge/Si (100) System / S.A. Nepijko, A.A. Sapozhnik, A.G. Naumovets et al. // *J. Nano- Electron. Phys.* – 2016. – V.8, No 4(2). – P. 04067-1 –04067-4.

31. Effects of work-function variation on performance of junctionless and inversion-mode dual-metal gate nanowire transistors / L. Dai, W. Li, M. Lin // JSTS. – 2020. – V. 20, № 4. – P. 349-356.
32. Impact of work-function variation on analog figures-of-merits for high-k/metal-gate junctionless FinFET and gate-all-around nanowire MOSFET / W.-F. Li, L. Dai // Microelectron. J. – 2019. – V. 84. – P. 54-58.
33. Wu Y.C. 3D TCAD simulation for CMOS nanoelectronic devices / Y.C. Wu, Y.R. Jhan. – Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. – 337 p.
34. Comparison of various factors affected TID tolerance in FinFET and Nanowire FET / Won H., Ham I., Jeong Y. et al. // Appl. Sci. – 2019. – V. 9. – P.3163-3172.
35. Vertical nanowire and nanosheet FETs: device features, novel schemes for improved process control and enhanced mobility, potential for faster & more energy efficient circuits / A. Veloso, G. Eneman, T. Huynh-Bao et al. // 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 7-11 Dec. 2019. – San Francisco: IEEE, 2019. – P. 11.1.1 – 11.1.4.
36. Dual metal gate FinFET integration by Ta/Mo diffusion technology for Vt reduction and multi-Vt CMOS application / Matsukawa T., Endo K., Liu Y. // Sol. State Electron. – 2009. – V. 53. – P. 701-705.
37. Metal gate work function modulation mechanisms for 20-14 nm CMOS low thermal budget integration / B. Saidi // Materials Science. Universite Toulouse III – Paul Sabatier, 2014. – 158 p.
38. Structure and electrophysical properties of double-component film alloys based on molybdenum and iron or nickel / I.P. Buryk, T.M. Hrychanovs'ka, D.V. Poduremne et al. // J. Nano- Electron. Phys. – 2018. – V. 10, No 5. – P. 05026-05026-4.

ДОДАТОК А**ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДОПОВІДІ**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
FET'S ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ НАНОТРУБОК**

Студент гр. EI-81

М.В. Донченко

Науковий керівник,
к. ф.-м. н, доцент

І.П. Бурик

Конотоп 2022

ВСТУП

2

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є транспорт носіїв заряду у польових транзисторах з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.

Мета роботи полягає у дослідженні впливу масштабування та температури на електричні параметри польових транзисторів з каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено огляд характеристик транзисторних структур з каналами у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок. У другому розділі розглядається методика моделювання структур та електричних параметрів коаксіальних польових транзисторів з каналами у вигляді нанотрубок за допомогою програмного середовища Silvaco TCAD. У третьому розділі наведено результати дослідження структурних та температурних характеристик польових транзисторів з каналами у вигляді одно- та двостінних вуглецевих нанотрубок, отримані результати свідчать про більш високу їх термічну стійкість, ніж приладів з кремнієвими каналами.

РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ
З КАНАЛАМИ У ВИГЛЯДІ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК

3

1.1. Загальні характеристики вуглецевих нанотрубок

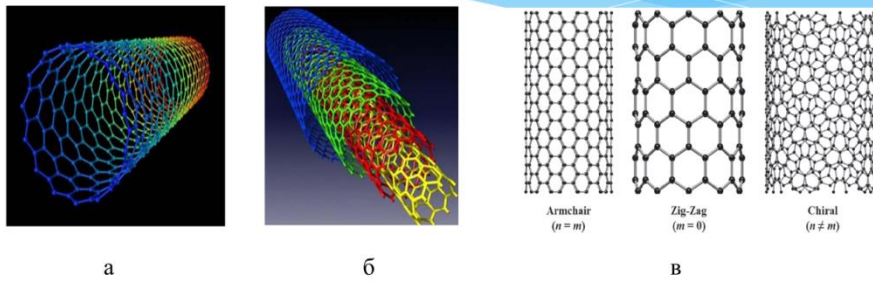


Рис.1.1. Будова одностінної (а) та багатостінної (б) нанотрубок, різні структури одностінної нанотрубки (в)

1.2. Застосування одностінних вуглецевих нанотрубок

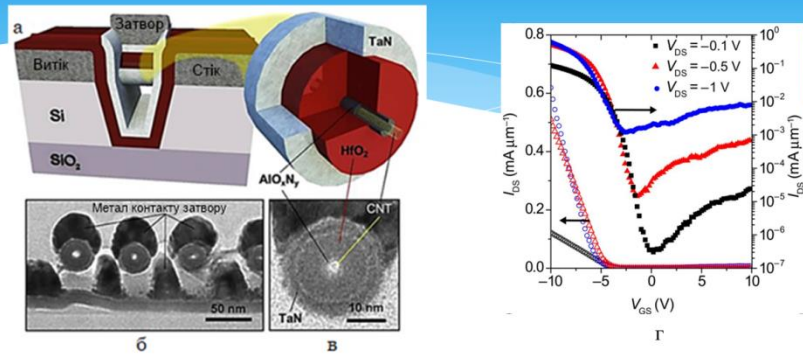


Рис.1.2. Структура польового транзистора та переріз його каналу у вигляді вуглецевої нанотрубки (а), відповідні електронно-мікроскопічні зображення (б,в), передавальні характеристики (г)

2.1. Методика чисельного моделювання в Silvano TCAD



Рис. 2.1. Блок-схема засобів Silvano TCAD

2.2. Вхідні параметри для моделювання

Таблиця 2.1

Вхідні параметри моделювання ПТ із каналом у вигляді одностійної вуглецевої нанотрубки

№	Параметр структури	Позначення	Величина
	1	2	3
1.	Характеристика ВНТ	$Ch(n,m)$	(6,2)
2.	Діаметр ВНТ	D_{CNT}	1,41 нм
3.	Довжина каналу	L	7 нм
4.	Товщина зовнішнього оксиду (HfO_2)	T_{ext}	3 нм
5.	Діелектрична стала зовнішнього оксиду	K_{ext}	25
6.	Легування зон стоку-витоку	N_{ID}	10^{20} cm^{-3}
7.	Діелектрична стала порожнини ВНТ	K_{CNT}	1
8.	Спорідненість електронів	E_{int}	3,2 eV
9.	Робота виходу електрона металу затвору	Φ_m	5,22 eV
10.	Діелектрична проникність ВНТ	ϵ	$9,7 \text{ Фгм}^{-1}$
11.	Рухливість електронів	μ_n	$8 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
12.	Рухливість дірок	μ_p	$8 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
13.	Ширина забороненої зони	E_g	0,61 eV
14.	Густина станів у провідній зоні	$DOS(N_C)$	$8,88 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$
15.	Густина станів у валентній зоні	$DOS(N_V)$	$7,36 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$
16.	Товщина внутрішнього оксиду (SiO_2)	T_{int}	2 нм
17.	Діелектрична стала внутрішнього оксиду	K_{int}	3,9

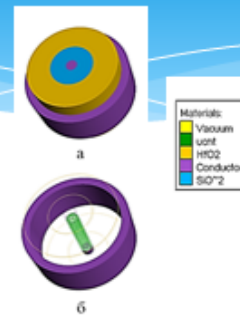


Рис.2.2. Геометрія польового транзистора із каналом у вигляді одностійної вуглецевої нанотрубки (а) та окреме відображення його каналу та затвору (б)

3.1. Структури транзисторів із каналами у вигляді вуглецевих нанотрубок

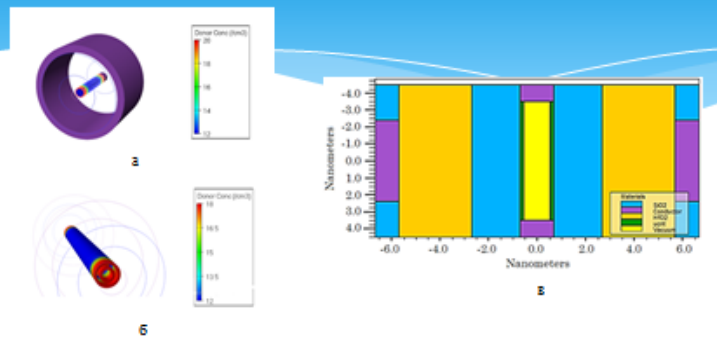
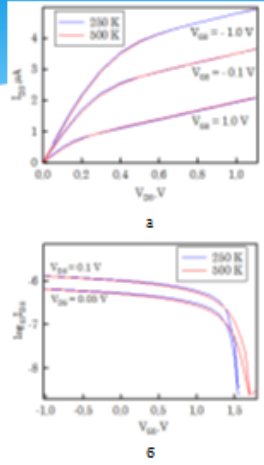


Рис.3.1. Тривимірні структури польового транзистора із каналом у вигляді одностінної (а) та двостінної (б) вуглецевих нанотрубок із відображенням концентраційного розподілу домішки, переріз польового транзистора із каналом у вигляді одностінної вуглецевої нанотрубки (в)

3.2. Температурні залежності електричних параметрів

8



Таблиця 3.1
Електричні параметри польового транзистора із каналом у вигляді одностійної вуглецевої нанотрубки

Параметри	$V_{DS} = 0.05 \text{ В}$		$V_{DS} = 0.10 \text{ В}$	
	250 К	500 К	250 К	500 К
V_T , В	0,28	0,28	0,25	0,27
SS , мВ/декаду	108,24	194,76	101,18	182,45
I_{on} , нА	0,65	0,64	1,29	1,27
$I_{off} \cdot 10^3$, нА	2,85	3,08	3,17	3,25
$(I_{on}/I_{off}) \cdot 10^{-4}$	2,28	2,08	6,23	5,64

Рис.3.2. Вихідні (а) та передавальні (б) характеристики для структури ПТ із каналом у вигляді одностійної вуглецевої нанотрубки при зміні температури від 250 К до 500 К

ВИСНОВКИ

9

1. Транспортні властивості досліджуваних структур коаксіальних ПТ з каналами у вигляді одно- та двостінних вулицевих нанотрубок вивчалися за допомогою дрейф-дифузійної моделі із врахуванням квантових ефектів (квантового потенціалу Бома) для тривимірних моделей у програмному середовищі Silvaco TCAD; продемонстровано відмінні характеристики, зокрема було отримано величини порогової напруги (V_t), струму витоку I_{off} , коефіцієнта I_{on}/I_{off} , допорогового розкиду (SS), які добре узгоджуються з відомими результатами.
2. При дослідженні температурних ефектів в інтервалі робочих температур від 250 К до 500 К отримано типовий характер залежностей, зокрема із зростанням температури порогова напруга V_t зменшуються, допороговий розкид SS збільшуються, це обумовлено зростанням струму витоку I_{off} ; поряд з цим показано стабільність струму відкритої структури, фіксується лише незначне його спадання на 1,6 %, при напрузі джерела живлення $V_{DD} = -1,0$ В.
3. Також термостійкість електричних параметрів ПТ із каналом у вигляді одностінної вулицевої була оцінена за допомогою температурних коефіцієнтів $\beta_{V_t} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{SS} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $\beta_{I_{on}} = -6,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ та $\beta_{I_{off}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; проведені дослідження методом чисельного моделювання підтверджують висновок про більш високу термічну стійкість електричних параметрів характеристик польових транзисторів з каналами у вигляді вулицевих нанотрубок, ніж для аналогічних приладів з кремнієвими каналами.