

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

Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії

"На правах рукопису"

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

УДК __621.3.082_____

_____ В.І. Тимофєєв
“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 153 мікро- та наносистемна техніка
на тему: «Моделювання польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки»

Виконав: студент 2 курсу, групи ДМ-21мп _____

Новіцька Анастасія Василівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., проф. Тимофєєв В.І.

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

(підпис)

Рецензент ст. викл., канд. техн. наук. каф. МЕ Лупина Б.І

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

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає заповичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

Кафедра електронної інженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 153 мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В.І. Тимофеев

“___” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Новіцькій Анастасії Василівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Моделювання польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки»

Науковий керівник

Тимофеев Володимир Іванович проф., д.т.н., проф.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “09” листопада 2023 року №5218-с

2. Строк подання студентом дисертації 5 січня 2024 року.

3. Об'єкт дослідження: Польовий транзистор з каналом на основі вуглецевої нанотрубки _____

4. Предметом дослідження є математичні моделі польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки, придатні для розрахунків вихідних статичних характеристик транзистора.

Робота передбачає проведення порівняльного аналізу аналітичних математичних моделей польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки.

5. Перелік питань, які потрібно розробити

Польовий транзистор з каналом на основі вуглецевої нанотрубки - класифікація, синтез та структура. Характеристики і параметри транзисторів. Аналіз існуючих математичних моделей транзисторів на основі польового транзистора на нанотрубках. Розроблення алгоритмів і програм для розрахунку характеристик транзистора на основі аналітичних фізичних і апроксимаційних математичних моделей. Розрахунок вихідних характеристик та аналіз результатів моделювання, порівняльний аналіз аналітичних математичних моделей.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Підготовка презентації до захисту з узагальненням результатів роботи.

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	09.11.23	
2	Аналіз літератури за напрямком магістерської дисертації	09 – 14.11.23	
3	Принципи роботи польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки. Класифікація, синтез та структура. Розділ дисертації	14 – 18.11.23	
4	Характеристики і параметри польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки. Розділ дисертації	18 – 26.11.23	
5	Аналіз існуючих математичних моделей транзисторів на основі польового транзистора на нанотрубках. Розділ дисертації	26 – 30.11.23	
6	Розроблення алгоритмів і програм для розрахунку характеристик транзистора на основі аналітичних фізичних і апроксимаційних математичних моделей. Розділ дисертації	01.11 – 08.12.23	
7	Розрахунок вихідних характеристик та аналіз результатів моделювання, порівняльний аналіз аналітичних математичних моделей. Розділ дисертації	09.12 – 15.12.23	
8	Оформлення дисертації	16.12 – 05.01.24	

Студент

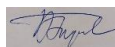


(підпис)

Новіцька А.В.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник роботи



(підпис)

Тимофєєв В.І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72с., 4р., 1 табл., 34 рис., 31 джерел.

ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НАНОТРАНЗИСТОРА, ПОЛЬОВІ НАНОТРАНЗИСТОРИ, ПАРАМЕТРИ НАНОТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ.

Тема роботи: Моделювання польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки.

Об'єкт дослідження: польовий транзистор на основі вуглецевої нанотрубки.

Предмет дослідження: математичні моделі польового транзистора на основі вуглецевої нанотрубки .

Мета роботи: моделювання польового транзистора на основі вуглецевої нанотрубки та аналіз його параметрів та характеристик.

Перший розділ містить огляд параметрів вуглецевих нанотрубок, будову вуглецевої нанотрубки та структуру, методи виготовлення нанотрубок та їх застосування.

Другий розділ містить відомості про параметри польових нанотранзисторів, аналіз структури та топології польового транзистора на основі вуглецевої нанотрубки, конструкцій та технології виготовлення транзисторів з каналом на основі вуглецевої нанотрубки.

У третьому розділі представлено аналіз математичних моделей транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки. Наведено рівняння щодо трьох математичних моделей: чисельної, аналітичної фізико-топологічної та аналітичної апроксимаційної моделі.

У четвертому розділі наведені результати моделювання та аналізу отриманих результатів моделювання характеристик транзисторів з каналом на основі вуглецевої нанотрубки, проаналізовано вплив фізико-топологічних параметрів структури нанотранзистора на вихідні характеристики.

ABSTRACT

Explanatory note: 72p., 4c., 1 tables, 34 figures, 31 references.

CARBON NANOTUBES, MATHEMATICAL MODELS OF A NANOTRANSISTOR, FIELD-EFFECT TRANSISTORS, PARAMETERS OF A NANOTRANSISTOR BASED ON A CARBON NANOTUBE.

Work topic: Modeling of a field-effect transistor with a channel based on a carbon nanotube.

The object of research: a field-effect transistor based on a carbon nanotube.

The subject of the study: models of field-effect transistors based on carbon nanotubes.

The purpose of the work: simulation of a field-effect transistor based on a carbon nanotube and analysis of its parameters.

The first chapter contains an overview of the nanotube, the structure of the carbon nanotube and its topology, the methods of making the nanotube and its application.

The second chapter contains information about the field-effect transistor, parameters of the field-effect transistor, the structure of the field-effect transistor based on carbon nanotubes, the designs and technology of transistors with a channel based on carbon nanotubes are proposed.

The third chapter presents the analysis of mathematical models of a transistor with a channel based on a carbon nanotube. Three models are given: numerical, analytical and approximation model.

In the fourth chapter, the simulation results and analysis of the obtained simulation results of the characteristics of transistors with a channel based on carbon nanotubes are presented, and the parameters of the models are analyzed.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	12
ВСТУП.....	15
1 НАНОТРУБКА, БУДОВА ТА СТРУКТУРА НАНОТРУБКИ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ	16
1.1. Історія відкриття.....	17
1.2. Будова та структура нанотрубки	18
1.3. Методи виготовлення вуглецевих нанотрубок.....	22
1.3.1. Метод дугового розряду	23
1.3.2. Лазерна абляція	24
1.3.3. Окис вуглецю високого тиску (HiPCO)	25
1.3.4. Хімічне осадження з пари.....	27
1.3.5. Синтез полум'ям	28
1.4. Функціоналізовані нанотрубки.....	28
1.5. Застосування вуглецевих нанотрубок	29
1.6. Висновки до першого розділу	31
2 СТРУКТУРИ, КОНСТРУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ.....	32
2.1. Історія виникнення польових транзисторів з вуглецевими нанотрубками ...	32
2.2. CNTFET з бар'єром Шотткі.....	33
2.3. Виготовлення польових транзисторів з вуглецевих нанотрубок.....	34
2.4. Геометричні розміри транзистора з вуглецевих нанотрубок: ширина та довжина	36

2.5. Фізика пристрою з балістичним дрейфом електронів.....	37
2.6. Висновки до другого розділу.....	39
3 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ	40
3.1. Чисельна математична модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	40
3.2. Аналітична фізико-топологічна модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	46
3.3. Апроксимаційна математична модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	47
3.4. Висновки до третього розділу	49
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ	50
4.1. Аналіз результатів розрахунків для аналітичної фізико-топологічної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	50
4.2. Вплив параметрів структури транзистора на основі вуглецевої нанотрубки в аналітичній	54
4.2.1. Вплив параметра структури L (довжини каналу) транзистора	54
4.2.2. Вплив параметра структури t_{ins} (товщини ізолюючого шару) транзистора	56
4.2.3. Вплив параметра структури C_q (квантової ємності) транзистора.....	58
4.2.4. Вплив параметра структури v_{sat} (швидкість насичення) транзистора	59
4.2.5. Вплив параметра структури V_c (критична напруга) транзистора	61
4.3. Апроксимаційна модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	62
4.4. Порівняння аналітичної фізико-топологічної та апроксимаційної моделей транзистора на основі вуглецевої нанотрубки	64

4.5. Висновки до четвертого розділу	66
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

a – постійна ґратки

C_d - ємність стоку

C_E - електростатична ємність

C_G - ємність затвора

CNT – вуглецева нанотрубка

CNT-FET – carbon nanotube field-effect transistor, транзистор на основі вуглецевих нанотрубок

C_Q - квантова ємність

C_S - ємність витoku

C_{sub} - ємність підкладки

CVD – метод хімічного осадження з парової фази

$D(E)$ - одновимірна щільність функції стану

E_F - енергія Фермі

G_{ON} - максимальна провідність вуглецевої нанотрубки

h - стала Планка

HiPCO – метод окису вуглецю високого тиску

I_{ds} - струм нанотранзистора на основі формалізму Ландауера-Буттікера

I^+, I^- - додатний та від'ємний струми

k_B - стала Больцмана

M - кількість підзон

m, n – числа, які характеризують хіральність нанотрубки

MOSFET – metal-oxide-semiconductor field effect transistor, метал-оксид-напівпровідник-польовий транзистор

MWNT – багатостінні вуглецеві нанотрубки

N_0 - густина електронів у стані рівноваги

N_s, N_d - густина станів із позитивною і негативною швидкістю відповідно

ΔQ - зміна заряду

Q_t і C_Σ - загальний заряд і ємність на усіх електродах

R_{ON} - загальний опір

SWNT – одностінна вуглецева нанотрубка

T - температура

t_{CNFET} - діаметр нанотрубки

t_{ins} - товщина ізолюючого шару

V_d - напруга стоку

v_F - швидкість Фермі

V_G - напруга затвора

v_{id} - швидкість дрейфу

V_s - напруга джерела

V_{sc} - поверхневий потенціал каналу

V_{sub} - напруга підкладки

v_{th} - загальна теплова швидкість

$\Gamma(x)$ - гамма-функція

ϵ_0 - діелектрична проникність

Φ_B - поверхневий потенціал каналу

ВСТУП

З моменту ідентифікації вуглецевих нанотрубок у 1991 році було проведено значні дослідження для вивчення їхніх електронних характеристик. Очікується, що вуглецеві нанотрубки стануть матеріалом майбутнього, витісняючи кремній у технології польових транзисторів.

Було встановлено, що транзистори з вуглецевих нанотрубок (CNT- ВНТ) пропонують переконливу альтернативу своїм кремнієвим аналогам, головним чином завдяки їхнім електростатичним властивостям. Вони включають балістичний або майже балістичний транспорт електронів і надзвичайно низькі порогові напруги провідності, що робить ВНТ придатними для високошвидкісних і низькоенергетичних застосувань.

Незважаючи на поглиблене вивчення фізичних властивостей ВНТ і розширене розуміння теорії ВНТ, сучасні фізичні моделі та моделі на рівні схеми переважно зосереджені на балістичному або майже балістичному транспорті. Існує зростаючий попит на обчислювально ефективні моделі CNT, придатні для інтеграції у системи схемотехнічного проектування, особливо враховуючи недавню успішну реалізацію логічних схем, побудованих з CNT.

В останніх розробках були запропоновані революційні вдосконалення щодо більш адекватного моделювання транзисторів на основі CNT. Ці вдосконалення охоплюють не лише балістичний транспорт, але й різні небалістичні ефекти.

1 НАНОТРУБКА, БУДОВА ТА СТРУКТУРА НАНОТРУБКИ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

Перш за все, вуглецева нанотрубка це матеріал трубкаподібної форми, який виготовлюють з вуглецю. Діаметр даного матеріалу вимірюється у нанометровій шкалі. Графен є двовимірним одношаровим графітом у переліку вуглецевих наноматеріалів, який є міцнішим матеріалом ніж алмаз, оскільки містить сильнішу гібридизацію ніж алмаз. [1]

Вуглець є найбільш універсальним елементом у періодичній таблиці завдяки типу, міцності та кількості зв'язків, які він може утворювати з багатьма різними елементами. [2] Вуглець з атомним номером 6 відіграє життєво важливу роль у нанотехнологіях. [1] Вуглецева нанотрубка [3], яка складається з вуглецю [1], частіше за виглядом може нагадувати згорнутий дріт у форму труби [3], яка має дуже малий діаметр. Отже, нанотрубки можна назвати протяжними структурами із гексагональних шарів з атомами вуглецю у вузлах ґратки. [4]

Вуглецеві нанотрубки мають унікальні фізичні та хімічні властивості, які вчені прагнуть детальніше збагнути за допомогою лабораторних досліджень. Саме одна фізичних властивостей вуглецевої нанотрубки полягає у тому, що її можна створити товщиною лише в один атомний шар, що є приблизно одною п'ятдесяти тисячною товщини волосини людини. [3]

Останнім часом вуглецеві нанотрубки є найбільш перспективним напрямком досліджень. [1] Наразі вчені прагнуть виготовляти вуглецеві нанотрубки з високим ступенем чистоти, щоб фізичні структури були однаковими. Адже стає легшим передбачити поведінку даного матеріалу, за схожих фізичних та хімічних властивостях. [3]

1.1. Історія відкриття

Перша згадка про дослідження прямих порожнистих вуглецевих трубок у вигляді графенових шарів вуглецю з'явилась у 1960 році і належить Роджеру Бекону. За випадкових подій у 1985 році було відкрито фулерени, тобто молекули, які цілком утворені з вуглецю, та за формою є трубками, еліпсоїдами чи порожнистими кулями. Саме фулерени, які мають форму трубки, вважають нанотрубками. [5]

Уперше інформацію про вуглецеві нанотрубки було оприлюднено Лідзімою у 1991 році. [6] Згадувалось про спостереження трубчастої форми у вигляді коаксіальних трубок графітових листів, від 2 до 50 оболонок. [5]

Через два роки вдалося спостерігати ту саму трубчасту структуру, але лише з одним атомним шаром графену, який став відомий як одностінна вуглецева нанотрубка (SWNT). SWNT стали найбільш ймовірними кандидатами на мініатюризацію електроніки за межі сучасних технологій. Вони демонструють феноменальні електричні та механічні властивості. [7]

У 1996 році відбувся значущий прорив, коли Річард Смоллі та його колеги з Університету Райса успішно синтезували пучки рівномірно вирівняних одношарових вуглецевих нанотрубок із невеликим розподілом діаметрів. Це відкриття відкрило можливості для проведення раніше неможливих чутливих експериментів з одновимірною квантовою фізикою. [7]

У 1998 році було розроблено інтерференційний квантовий транзистор, форма якого виражена у вигляді круга у двовимірному просторі. Такі пристрої також відомі як точкові квантові пристрої. [8]

1.2. Будова та структура нанотрубки

Ідеальна нанотрубка - це циліндр, утворений з плоскої гексагональної сітки графіту, який згортається без швів. Взаємне положення гексагональної сітки і осі нанотрубки визначає важливий параметр - хіральність, яку представлено числами (m,n) . Ці числа вказують на місце на початку координат, де шестикутник сітки повинен збігтися з шестикутником, утвореним під час згортання. [9]

Хіральні вуглецеві нанотрубки мають властивість обертової симетрії навколо своєї вісі, тоді як у нехіральних нанотрубках сторони шестикутників орієнтовані паралельно або перпендикулярно до осі циліндра, і вони не зазнають викривлення структури гексагональної сітки. [9]

Циліндричні вуглецеві нанотрубки можуть бути отримані у широкому розмаїтті форм: одношарові вуглецеві нанотрубки (SWCNT) або багат шарові вуглецеві нанотрубки (MWCNT). [10]

SWNT (одношарові вуглецеві нанотрубки) мають діаметр близько 1 нм і можуть мати довжину, що змінюється у мільйони разів (рис.1.1). Вони приймають три форми - пряму ([ахіральну](#)), зигзагоподібну та «крісло» (armchair), відповідно до згортання листа графену. Кожна форма впливає на електричні властивості нанотрубки. [11] Технологічний вихід SWNT суттєво залежить від температури і збільшується зі зростанням температури. [1]

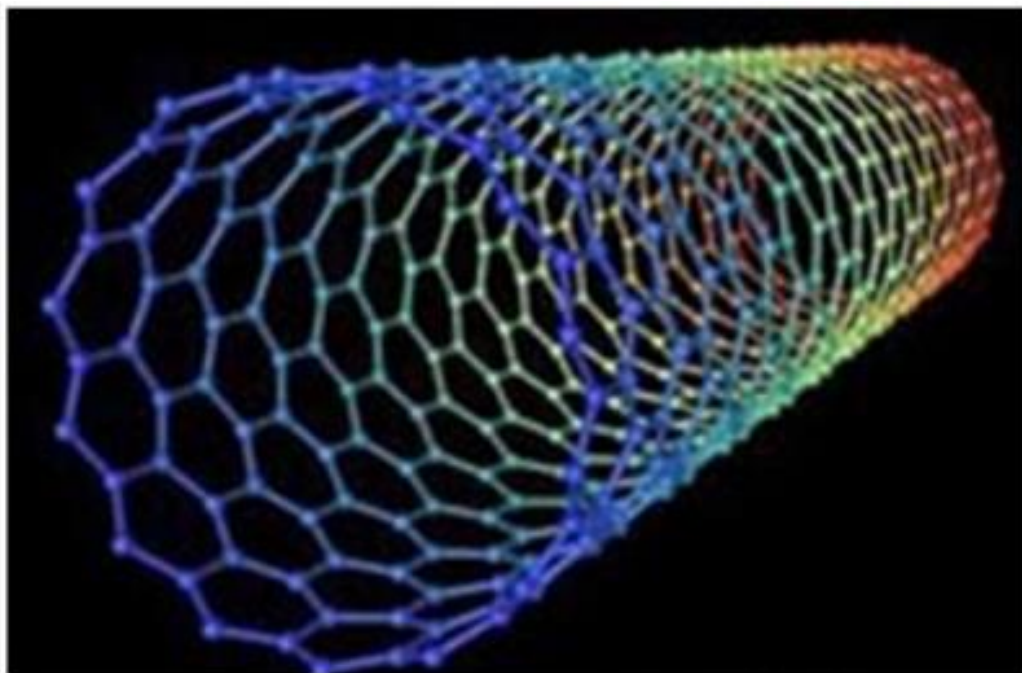


Рисунок 1.1 - Структура одностінної нанотрубки (SWNT) [11]

За вектором хіральності CNT і, відповідно числами (n,m) , поділяють на такі основні категорії (рис.1.2):

Типу «крісло» (armchair) CNTs: Нанотрубка з обгортуючим вектором, який розташований точно між двома базовими векторами ($n = m$). [12]

Зигзагоподібні (zigzag) CNTs: Нанотрубка з обгортуючим вектором, що лежить вздовж одного з двох базових векторів, коли $m=0$ або $n=0$. [12]

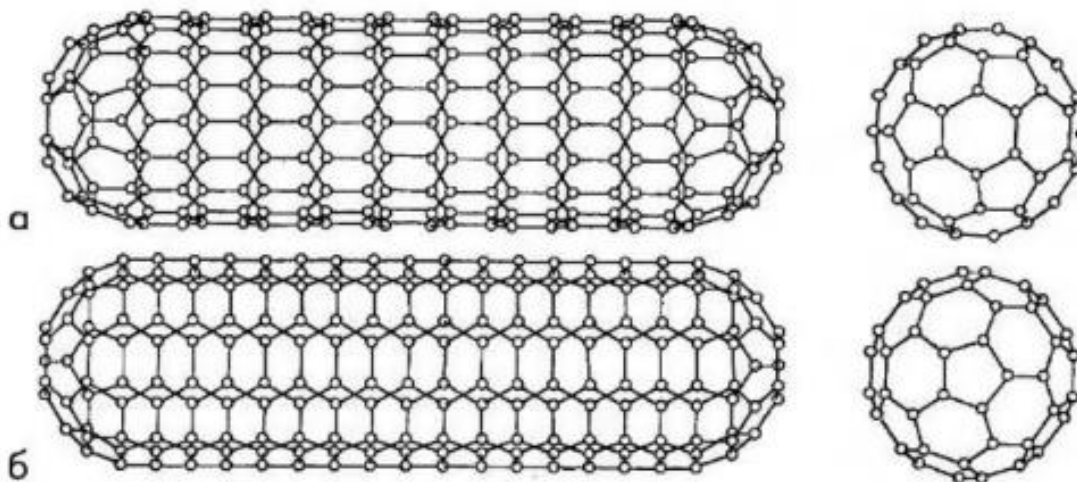


Рисунок 1.2 - Ідеалізовані моделі одношарових нанотрубок: а – типу «крісло» і б – зигзагоподібні [9]

MWNT (багатошарові вуглецеві нанотрубки) мають діаметр 10-20 нм і довжину трубки до кількох мікрметрів. Відкриття багатошарових нанотрубок було спричинене пошуками інших вуглецевих сполук з криволінійними графеновими структурами. Багатошарові вуглецеві нанотрубки мають концентричні циліндри (рис.1.3) з розгорнутими листами графену та закриті напівфулеренами. Зі збільшенням розміру ці структури проявляють властивості між фулеренами та графітом. [11] Теплоємність MWCNTs від 10 до 300 К. [1]

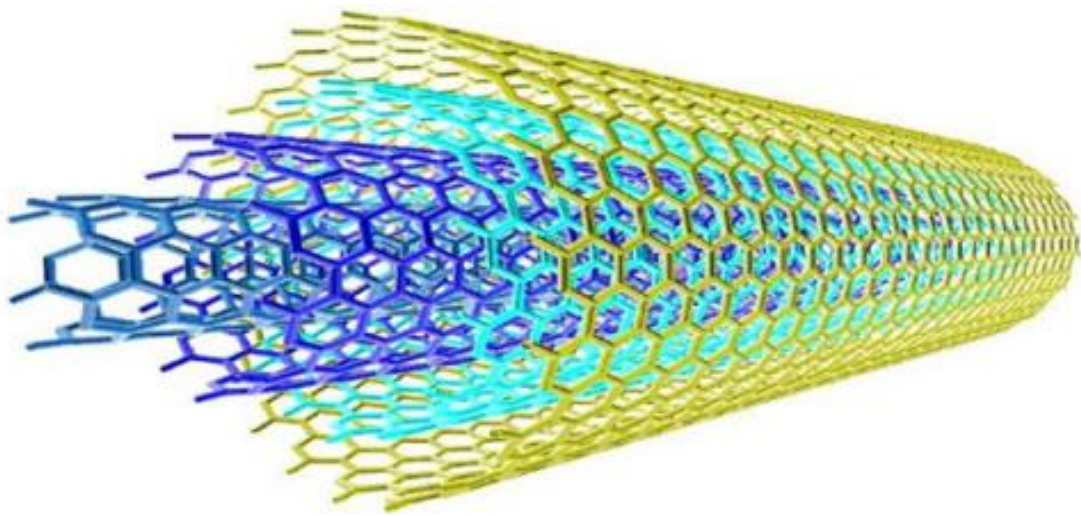


Рисунок 1.3 - Структура багатошарової вуглецевої нанотрубки [11]

Розрахунки електронної зонної структури підтверджують, що електропровідність системи залежить від індексів (n, m) . [9]

Індекси хіральності (рис.1.4) одношарових вуглецевих нанотрубок безперечно визначають її діаметр:

$$d = \frac{|c_h|}{\pi} = \frac{a}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2} \quad [9]$$

де $a = 3 \times dc-c$ - постійна ґратки, $dc-c = 0,142$ нм. Зв'язок між індексами і кутом хіральності визначається співвідношенням [9]:

$$\theta = \arctan\left(-\sqrt{3} \frac{m}{2n+m}\right) [9]$$

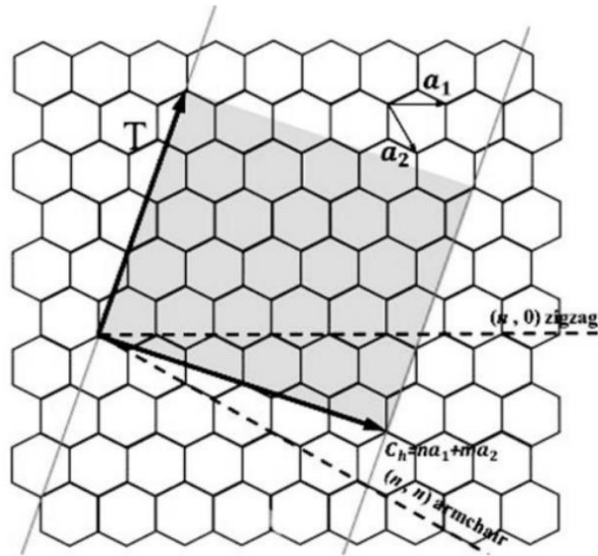


Рисунок 1.4 - Схематичне представлення графічної площини [13]

На рис. 1.5 наведено схематичне зображення різних типів вуглецевих нанотрубок (CNT). Три класи демонструють значно відмінні електричні властивості, які можуть варіюватися від напівпровідникових до металевих. [12]

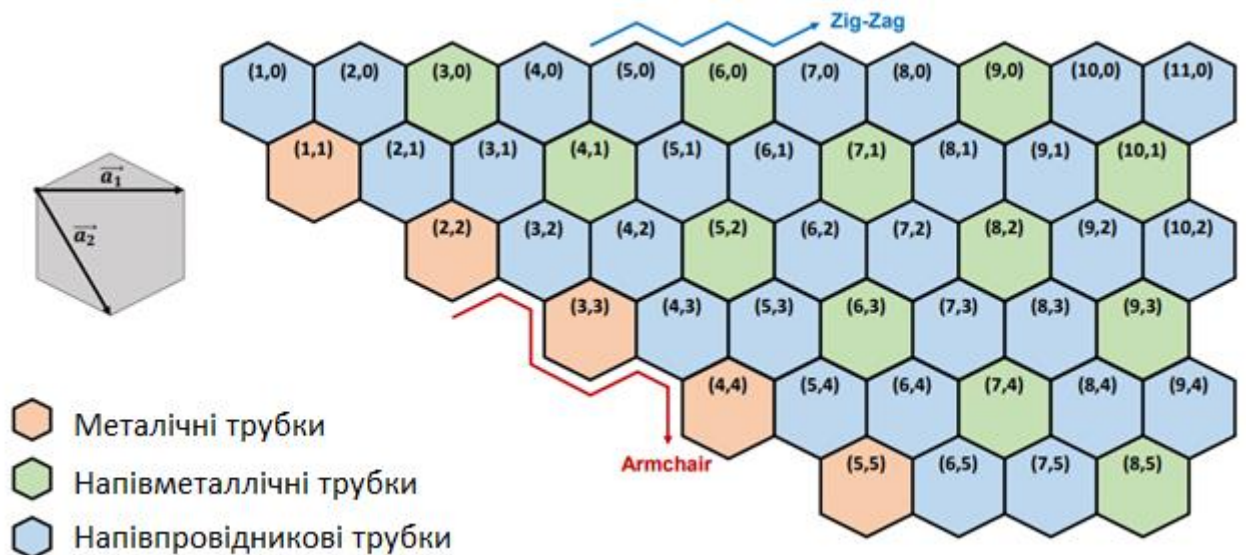


Рисунок 1.5 - Схематичне зображення шару графену та класифікація різних видів нанотрубок залежно від їх вектора хіральності [12]

1.3. Методи виготовлення вуглецевих нанотрубок

Існує різноманітність методів формування вуглецевих нанотрубок. В усіх цих методах вуглець зазвичай перетворюється у газоподібну фазу, а потім конденсується. Для отримання вуглецевих нанотрубок може використовуватися як твердий графіт, так і газоподібна сполука, така як вуглеводень. [14] Вуглецеві нанотрубки можна виробляти у двох основних формах: одношарові вуглецеві нанотрубки (SWNT) і багатошарові вуглецеві нанотрубки (MWNT). [13] Для вирощування одношарових вуглецевих нанотрубок зазвичай використовується металевий каталізатор, наприклад, залізо або нікель. Багатошарові вуглецеві нанотрубки можна отримати і без використання каталізатора. [14]

Виробництво вуглецевих нанотрубок може відбуватися за допомогою різних методів, таких як метод дугового розряду, лазерне розпилення, оксид вуглецю високого тиску (HiPCO) та хімічне осадження з парової фази (CVD). Серед цих методів, найбільшу продуктивність для створення польових транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок проявив метод CVD. [5]

1.3.1. Метод дугового розряду

Вуглецеві нанотрубки вперше були вироблені і визнані саме за допомогою методу дугового розряду. [15] У 1990 році Крачмер і Хаффман винайшли метод дугового розряду, що призвів до створення нової форми твердого тіла. Вона складається з молекул C₆₀, які упаковані дещо неупорядковано у формі футбольного м'яча. Цей метод дозволяє отримувати нанотрубки найвищої якості. [11]

Електричний дуговий розряд - це явище електричного розряду газу, що породжує плазмовий розряд, схожий на іскру, і який представляє собою потік струму через непровідне середовище, таке як повітря чи ізолятор. У звичайному процесі виробництва вуглецевого дугового розряду плазмовий розряд створюється у невеликому проміжку між двома графітовими електродами. Цим методом (рис.1.6) вуглецеві нанотрубки виробляються в ядрі, що утворюється на катоді. [5] Головним недоліком цього методу синтезу є випадкове розташування вуглецевих нанотрубок для конкретного застосування. [11]

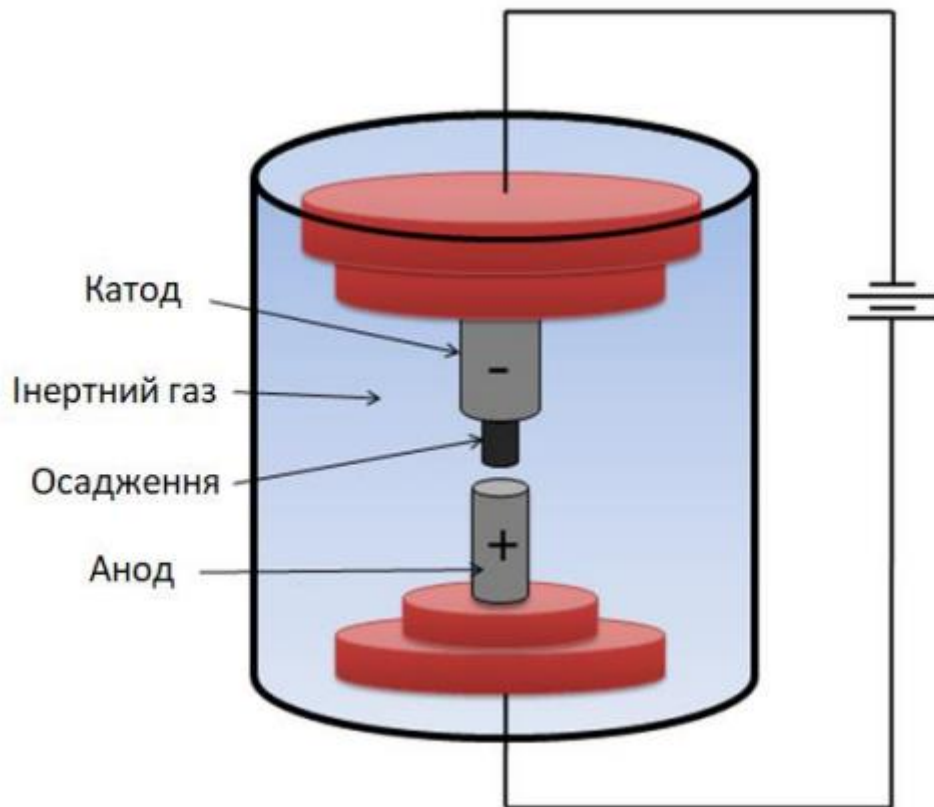


Рисунок 1.6 - Метод дугового розряду [11]

1.3.2. Лазерна абляція

У 1996 році група вчених під керівництвом Смоллі з Університету Райса вперше досягла масштабного виробництва одношарових вуглецевих нанотрубок методом лазерної абляції. [7]

Стандартний процес лазерної абляції включає у себе блок графіту, що містить каталітичний метал. Композитний блок формується шляхом змішування графіту з каталітичним металом у трубчастій печі, нагрітій приблизно до 1473 К. Далі лазер спрямовується на графітовий блок, а газ аргон подається у напрямку лазера. Під

час обробки лазером цілі виникають вуглецеві нанотрубки, які потім транспортуються потоком газу на охолоджений мідний колектор. [5]

Лазерна абляція надає змогу формувати переважно одношарові нанотрубки, у той час як інші методи дозволяють створювати суміш багатошарових і одношарових нанотрубок. [4]

Цей метод (рис. 1.7) має кілька переваг, такі як високоякісне виробництво одношарових вуглецевих нанотрубок (SWCNT), контроль над їхнім діаметром, вивчення динаміки росту і отримання нових матеріалів. [15]

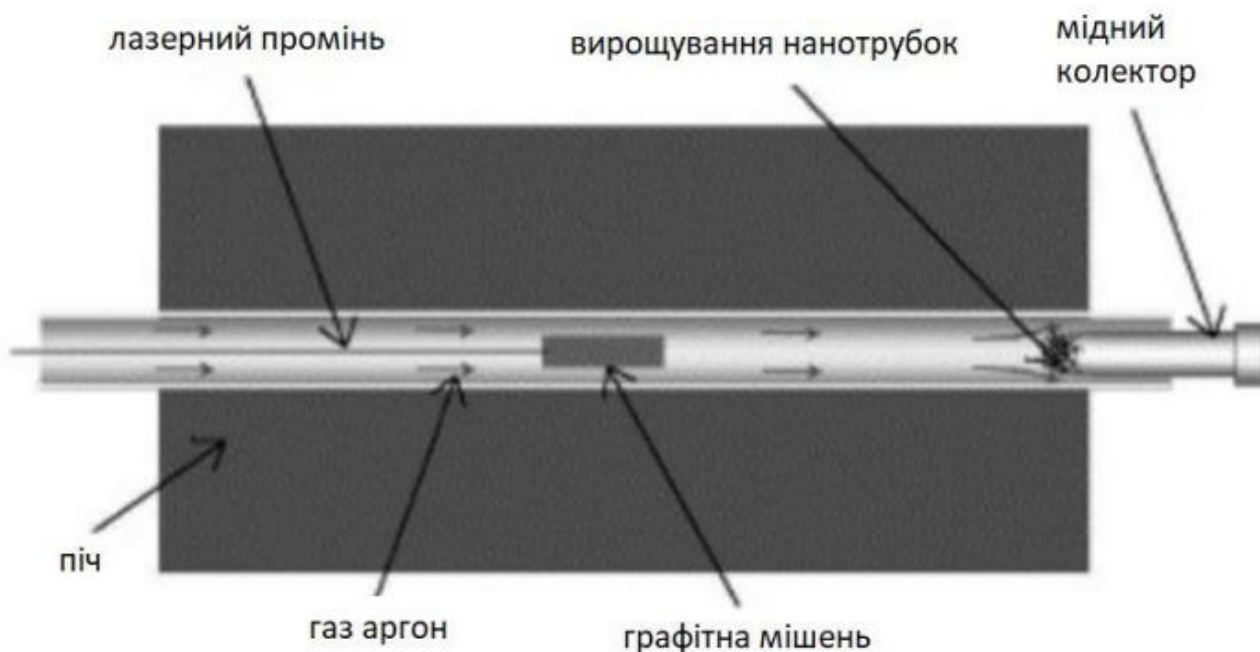


Рисунок 1.7 - Метод лазерної абляції [10]

1.3.3. Окис вуглецю високого тиску (HiPCO)

Даний унікальний метод виник в Університеті Райса у 1999 році для виробництва вуглецевих нанотрубок. У цьому методі, на відміну від інших, де

металеві каталізатори вбудовують або наносять на підкладку перед початком осадження вуглецю, каталізатор вводять у газову фазу. [16]

HiPCO (High-Pressure Carbon Monoxide) - це техніка (рис.1.8), що виробляє одношарові вуглецеві нанотрубки у безперервній фазі газового потоку. У цьому процесі використовується CO як джерело вуглецю, а $\text{Fe}(\text{CO})_5$ виступає попередником каталізатора. Оксид вуглецю подається у нагрітий реактор, де він змішується з невеликою кількістю $\text{Fe}(\text{CO})_5$, утворюючи одношарові вуглецеві нанотрубки. Розмір і діаметр цих нанотрубок можна приблизно контролювати, регулюючи тиск CO. [5]

Для очищення кінцевого продукту вуглецевих нанотрубок від аморфного вуглецю та залишкових домішок заліза у процесі HiPCO використовується багатоетапний метод, який включає окислення, обробку кислотою та фільтрацію. [17]

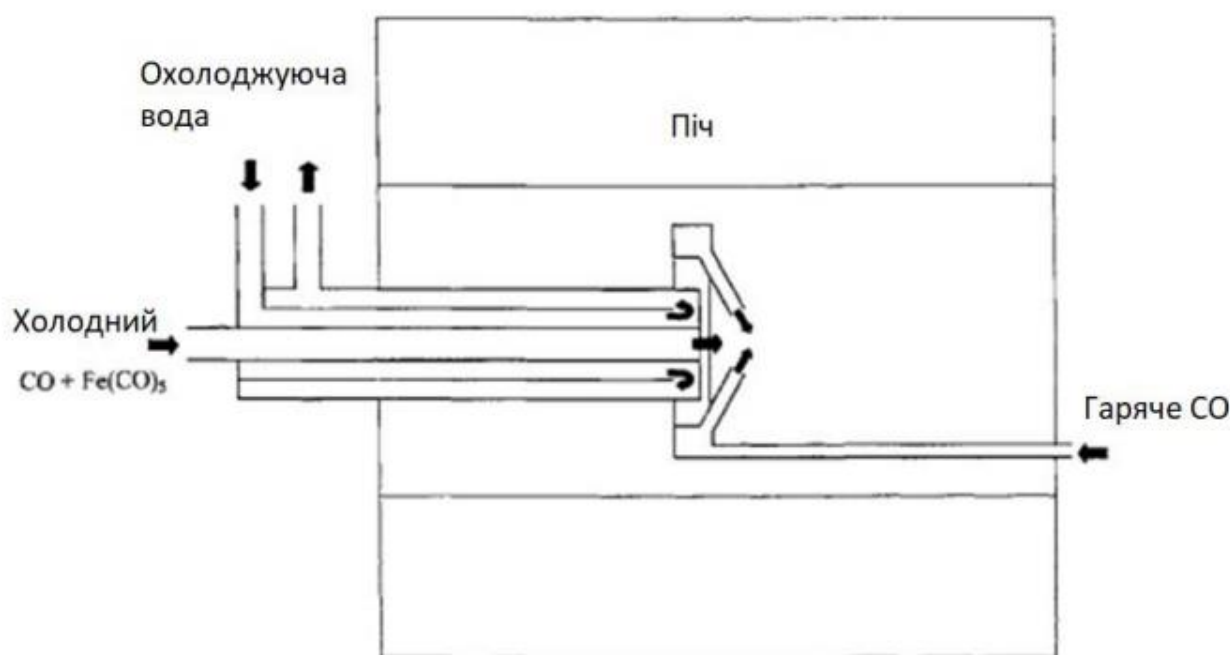


Рисунок 1.8 - Окис вуглецю високого тиску (HiPCO) [5]

1.3.4. Хімічне осадження з пари

У 1996 році був впроваджений метод хімічного осадження парою (Chemical Vapor Deposition, CVD) для великотоннажного виробництва та синтезу вуглецевих нанотрубок. Ця техніка дозволяє контролювати напрямки зростання на підкладці та синтезувати значну кількість вуглецевих нанотрубок. [16]

Процес CVD (рис.1.9) включає взаємодію летких попередників з субстратом, де вони розкладаються, утворюючи відклад, з видаленням зайвих продуктів потоком газу. Вуглецеві нанотрубки отримують за участю газу з вмістом вуглецю та металевого каталізатора за температур вище 700 °С. [5]

Основною перевагою методу CVD є можливість використання вуглецевих нанотрубок без додаткового очищення, якщо немає необхідності видаляти частинки каталізатора. У процесі CVD ВНТ вирощуються шляхом розкладання органічного газу на підкладці, покритій металевими частинками каталізатора. [18]

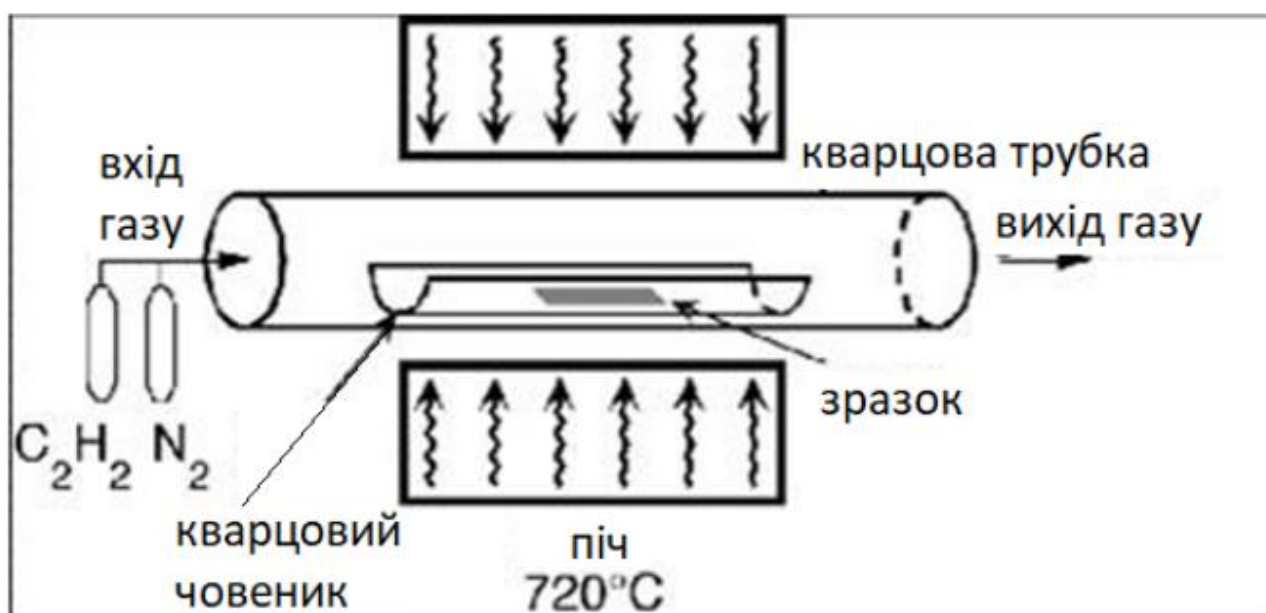


Рисунок 1.9 - Хімічне осадження з пари [5]

1.3.5. Синтез полум'ям

У цьому способі формування вуглецеві нанотрубки (ВНТ) виробляються через пряме спалювання джерела вуглецю у присутності окислювального газу. [19]

Цей метод є економічним та придатним для великомасштабного виробництва одношарових вуглецевих нанотрубок. [5] Метод базується на синтезі SWNT у контрольованому полум'ї, створюючи температуру та формуючи вуглецеві атоми з вуглеводневих пальників, а також утворюючи малі аерозольні металеві каталізаторні острови. [16] Під час гарячого синтезу, згоряння вуглеводневого палива забезпечує достатню кількість тепла для створення необхідного температурного середовища та утворення малих аерозольних металевих каталізаторів. Одношарові вуглецеві нанотрубки вирощуються у цих каталізаторних зонах аналогічно методам дугового розряду та лазерної абляції. [5]

1.4. Функціоналізовані нанотрубки

Функціональні матеріали - це матеріали з наперед визначеними властивостями, що задовольняють потребам електроніки, медицини, космонавтики та інших галузей. Вони включають полімери, біосумісні матеріали, сплави з пам'яттю форми, теплозахисні та екрануючі матеріали, іонні провідники і інші, можуть також бути "розумними", адаптуючись до змін у навколишньому середовищі. [20]

Функціоналізовані нанотрубки формуються внаслідок зміни складу та структури вихідних нанотрубок за допомогою хімічних або фізичних методів. На рис.1.10 зображено три основні методи функціоналізації CNT: [21]

1. Легування або часткове заміщення атомів вуглецю атомами іншого сорту, або введення дефектів у стінки нанотрубок.
2. Інкапсуляція атомів або молекул всередину нанотрубки, у міжстінковий простір CNT або між сусідніми нанотрубками утвореного пучка.
3. Приєднання різнорідних атомів або молекул до зовнішніх поверхонь.

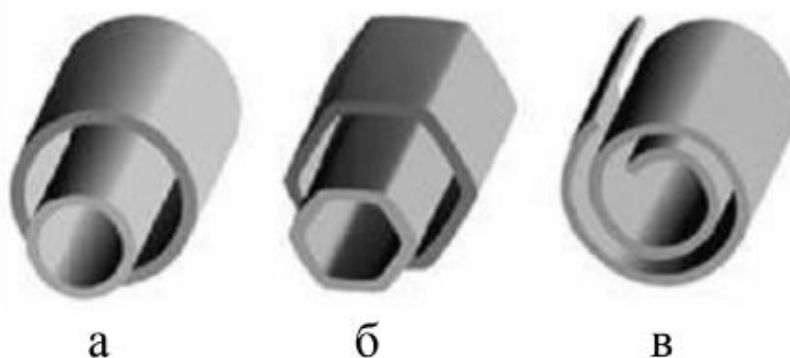


Рисунок 1.10 - Схематичне зображення поперечного перерізу CNT: а) коаксиальна кругла; б) шестикутна призма; в) згортка [21]

Функціоналізація CNT відкриває нові можливості для їхнього використання в органічному середовищі. Атомне модифікування дозволяє отримати наноматеріали з унікальними характеристиками, використовуються у композитах, електронних пристроях, літєвих батареях та інших областях, зокрема, для зберігання водню. [21]

1.5. Застосування вуглецевих нанотрубок

1. Генна інженерія: використання CNT у розробці геномів, біозображенні, тканинній інженерії та протеоміці.

Застосування у генній терапії, де обгортання одноланцюгової ДНК навколо SWNT відбувається внаслідок зміни її електростатичних властивостей. Використання у діагностиці та терапії за допомогою біосенсорів та молекулярних сенсорів. [22]

2. Штучні імпланти: застосування ВНТ як імплантатів у вигляді штучних суглобів та заміни кістки. Висока міцність на розрив і розташування у структурі кістки. [22]

3. Інші медичні застосування CNT: використання для безпечної та ефективної доставки ліків з підвищенням розчинності препарату. Застосування у наномедицині з великим потенціалом для майбутнього. [22]

4. Наноелектроніка: нанотрубки, завдяки своїй великій провідності, можуть знайти застосування у галузі електроніки. Одностінні нанотрубки виявляються найбільш провідним типом. Їхню високопровідність підсилює скручування та згинання. Завдяки високій провідності та невеликому розміру, нанотрубки можуть бути ефективною альтернативою міді, особливо за розмірів менше 40 нм. [11]

5. Датчики: застосування ВНТ для підвищення чутливості біосенсорів та молекулярних сенсорів для виявлення різних речовин, включаючи витоки на хімічних заводах. [22]

6. Вуглецеві нанотрубки у суперконденсаторах: використання вуглецевих нанотрубок (ВНТ) у суперконденсаторах значно підвищило їхню ефективність та ємність накопичувача заряду. Багато дослідницьких лабораторій використовують ВНТ для покращення характеристик суперконденсаторів порівняно з традиційними матеріалами, такими як активоване вугілля. [14]

7. CNTs у приладах з польовою емісією: польова емісія - це процес випромінювання електронів з поверхні матеріалу. Вуглецеві нанотрубки характеризуються високою щільністю струму, значним коефіцієнтом посилення та

стабільністю, а також низьким порогом увімкнення електричного поля. Ці властивості роблять їх ефективними для використання у пристроях для польової емісії, де відбувається випромінювання електронів з поверхні матеріалу. [14]

8. Створення польових транзисторів де вони виконують роль каналу провідності. Польові нанотранзистори мають компактні розміри порівняно із кремнієвими, досягаючи високої швидкодії. Виготовляються вони методом нанесення на кремнієву пластину з використанням двох електродів (стік і витік транзистора), між якими розміщується нанотрубка як затвор. Швидкодія таких транзисторів перевищує швидкість кремнієвих аналогів і оцінки показують, що нанотрубка може й функціонувати на частоті до 1 ТГц. [21]

Виробництво транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок можна значно спростити, використовуючи технологію друку фарбою, що містить у собі вуглецеві нанотрубки. До того ж, можливий синтез Y-подібних нанотрубок, які можуть функціонувати як транзистори, без потреби у додаткових елементах. [21]

1.6. Висновки до першого розділу

У даному розділі розглянуто параметри і характеристики вуглецевих нанотрубок, наведено будову та структуру одношарової та багатшарової нанотрубки. Наведено структуру кристалічної ґратки вуглецевих нанотрубок у залежності від вектора хіральності. Проаналізовано основні методи виготовлення вуглецевих нанотрубок, та визначено найбільш продуктивні з них. Визначено перспективні напрямки застосування вуглецевих нанотрубок.

2 СТРУКТУРИ, КОНСТРУКЦІЇ, ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ

2.1. Історія виникнення польових транзисторів з вуглецевими нанотрубками

Електропровідність польових структур на основі вуглецевих нанотрубок сильно залежить від діаметра трубки та кута згортання, і навіть невеликі відмінності у цих параметрах можуть спричинити перехід від металевого до напівпровідникового стану. [23]

У 1998 році групою Деккера та Мартель були створені перші CNT-FET. Вони виготовлялися за допомогою розміщення вуглецевих нанотрубок на поверхні SiO_2 та кремнієвій підкладці, яка слугувала зворотнім затвором. Для виводів стоку та витоку використовувалися платинові (Pt) електроди. Однак випадкове розташування трубок призводило до обмежених характеристик. Використання хімічного осадження метану на візерунковій підкладці дозволило вирощувати вуглецеві нанотрубки лише на спеціальних металевих каталізаторах. [5]

Ранні версії CNT-FET виготовляли на Si-підкладках і мали проблеми зі зв'язком затвора через товстий шар SiO_2 та геометрію зворотного затвора. У 2002 році відбулося важливе вдосконалення з введенням геометрії верхнього затвора у CNT-FET. [5]

Для структури CNT-FET характерним є високий бар'єр Шотткі на границі електрод-нанотрубка. Головним чинником струму була модуляція контактного опору на межі електрод-нанотрубка, а не провідність каналу. [5]

Протягом останнього десятиліття досягнуто значний прогрес у розумінні принципів роботи CNTFET. Було розроблено велику кількість моделей для вивчення цих транзисторів як експериментально, так і теоретично. [24]

2.2. CNTFET з бар'єром Шотткі

CNTFET з бар'єром Шотткі, який відображений на рисунку 2.1, функціонує за принципом прямого тунелювання через бар'єр Шотткі та термоелектронної емісії через бар'єр між витком та каналом, як зображено на рисунку 2.2. Електронне тунелювання - це процес, за якого електрони «просочуються» крізь потенційний бар'єр, який вони не могли б подолати за звичайних обставин згідно з класичною механікою, але цей явище пояснюється квантовою механікою. Ширина бар'єру регулюється напругою на затворі. Отже, провідність пристрою залежить від напруги на затворі. Перенесення носіїв заряду в CNTFET відбувається через термоелектронну емісію та квантове тунелювання у зоні провідності та валентній зоні, що призводить до зменшення струму увімкненого стану та обмеженої провідності. [25]

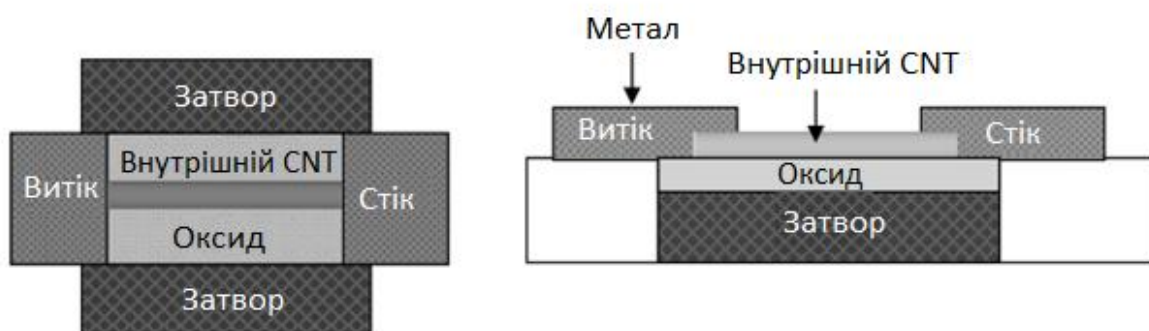


Рисунок 2.1 - CNTFET з бар'єром Шотткі [25]

Транзистор CNTFET завершується металевими контактами для витоку та стоку і виявляє амбіполярну провідність. В нього існує непотрібний стік-витік струм, який можна зменшити, використовуючи асиметричну структуру пристрою. Наприклад, CNTFET можна створити з різною товщиною нижнього оксиду на контактах витоку та стоку, або затвор можна перемістити ближче до витоку. [25]

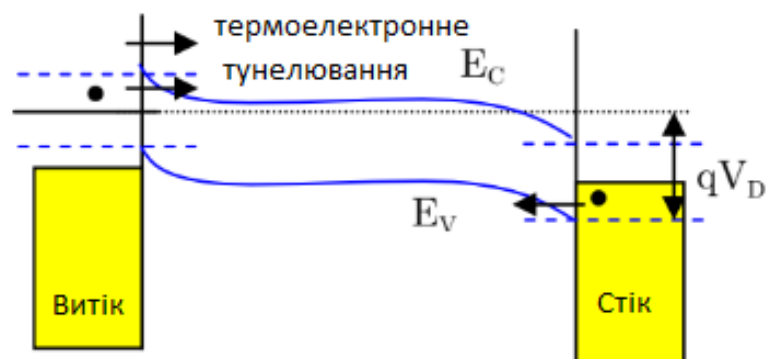


Рисунок 2.2 - CNTFET з бар'єром Шотткі з амбіполярним транспортом [25]

2.3. Виготовлення польових транзисторів з вуглецевих нанотрубок

Польові транзистори, такі як MOSFET і CNT-FET, контролюють струм за допомогою електричного поля. MOSFET досягає зміни провідності через напругу затвора, що утворює канал під оксидом затвора. CNT-FET використовує SWNT як провідний канал, де зміна напруги затвора впливає на провідність, дозволяючи стоку та витоку підтримувати струм. [5]

Високі характеристики окремих польових транзисторів з вуглецевих нанотрубок (CNT-FET) спонукали до перших спроб інтеграції цих пристроїв у

структури з декількох CNT-FET. Такі структури можуть виконувати логічні операції і функціонувати як пристрої пам'яті. [2]

CNT-FET складається з двох контактів: витіку і стоку, між якими за умови різниці потенціалів виникає струм. На контакт затвору подається напруга, яка впливає на цей струм, змінюючи поверхневий потенціал CNFET через горизонтальний контакт затвора. [10]

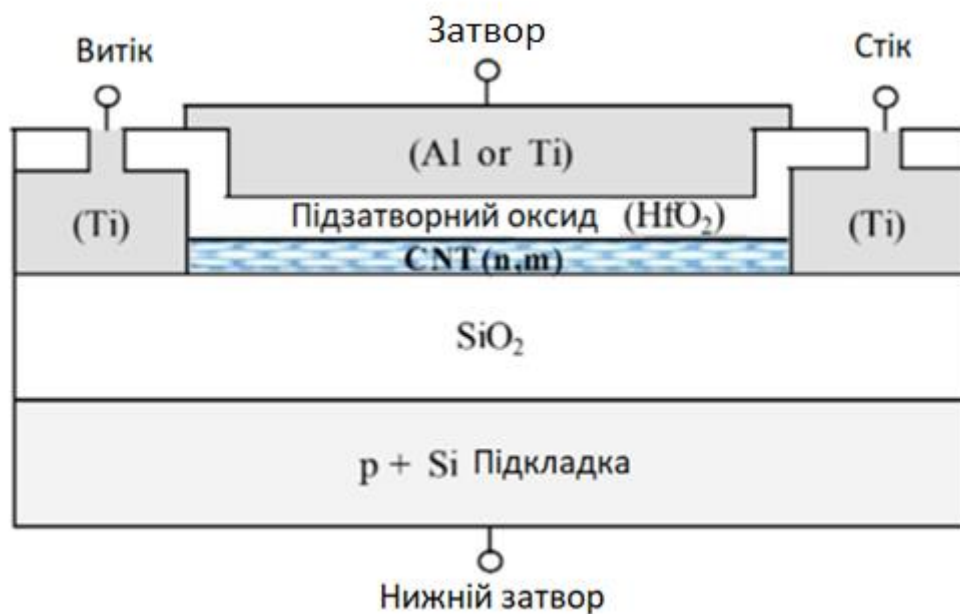


Рисунок 2.3 – Структура транзистора CNT-FET [5]

Перспективною є технологія виготовлення вуглецевих нанотрубок, яка забезпечує «балістичний» транспорт носіїв заряду. Процес виготовлення пристрою розпочинається з виготовлення вуглецевих нанотрубок на підкладці. Для пристроїв CNFET, що виготовляються на кварці, цей процес може бути описаний, як представлено нижче [26]:

1. Вирощування ВНТ на кварці.

2. Перенесення CNT для виготовлення пристрою на кремнії (не потрібно для виготовлення на кварці).
3. Випаровування шаблону та контактів джерела/стоку, використовуючи паладій.
4. Створення шаблону активних ділянок каналу та витравлювання ВНТ за їхніми межами.
5. Осадження оксиду гафнію атомно-шаровим осадженням.
6. Випаровування металевого верхнього затвора (з титану та платини). [26]

2.4. Геометричні розміри транзистора з вуглецевих нанотрубок: ширина та довжина

Транзистор CNT ґрунтується на концепції одновимірного провідника, який взаємодіє з електричним полем, прискорюючи слабо зв'язаний електрон у напрямку поля. Однак деякі електрони можуть рухатися хаотично внаслідок процесів розсіювання. Процеси розсіювання електронів залежать від середньої довжини вільного пробігу електрона (L_m) — середньої відстані, яку електрон може подолати до події розсіювання. В ідеальній кристалічній ґратці електрони рухаються без розсіювання, але насправді симетрія решітки ВНТ порушується дефектами, домішками та впливом навколишнього середовища. [10]

Розглядаючи масштабування розмірів транзистора для збільшення щільності упаковки на мікросхемі, існують дві критичні довжини: довжина каналу, тобто відстань між витоком і стоком, і довжина контакту, тобто довжина витоку/стоку. [27]

У нанорозмірних матеріалах опір не змінюється неперервно зі зменшенням розмірів. Розмірні ефекти призводять до виникнення квантових ефектів. [10]

2.5. Фізика пристрою з балістичним дрейфом електронів

Транзистори на основі вуглецевих нанотрубок (CNT) привабливі як альтернатива кремнієвим, завдяки їхнім електростатичним властивостям, таким як балістичний транспорт електронів і низькі порогові напруги провідності. Це робить CNT придатними для створення високошвидкісних і енергоєфективних схем. Фізичні властивості та теорія ВНТ продовжують досліджуватися, проте більшість сучасних моделей основанийі на наближенні балістичного транспорту. [28]

Чисельне моделювання фізичних процесів дрейфу дає можливість дослідити роботу нанорозмірних пристроїв. На рисунку 2.4 показано розраховану балістичну функцію розподілу у пристрої в увімкненому стані. Результати вказують на суттєву зміну форми функцій уздовж каналу під час дрейфу і прояв балістичного транспорту електронів. [29] На рисунку 2.5 показані обчислені енергетичні характеристики у нанорозмірному транзисторі за низького та високого зміщення стоку з напругою затвора як параметром. [29]

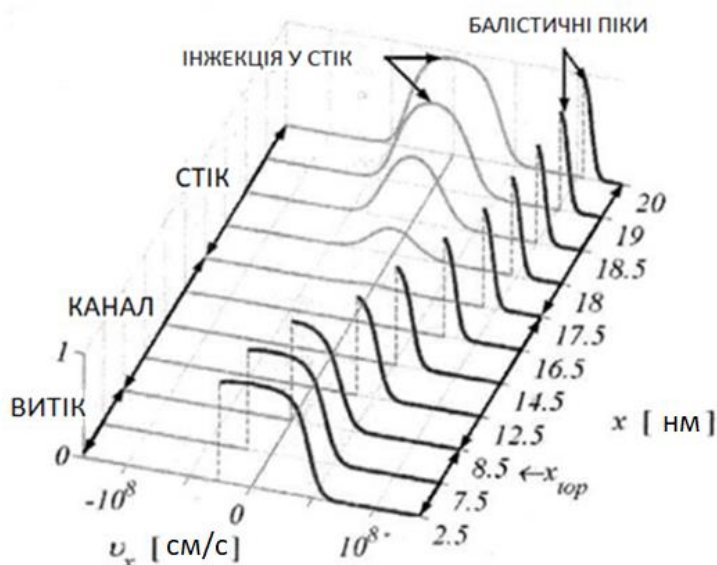
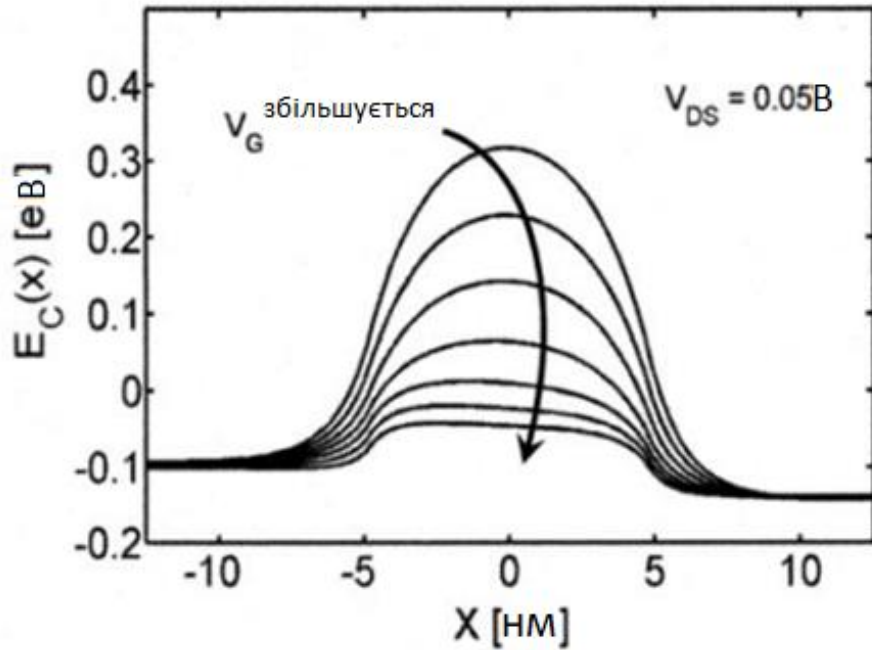
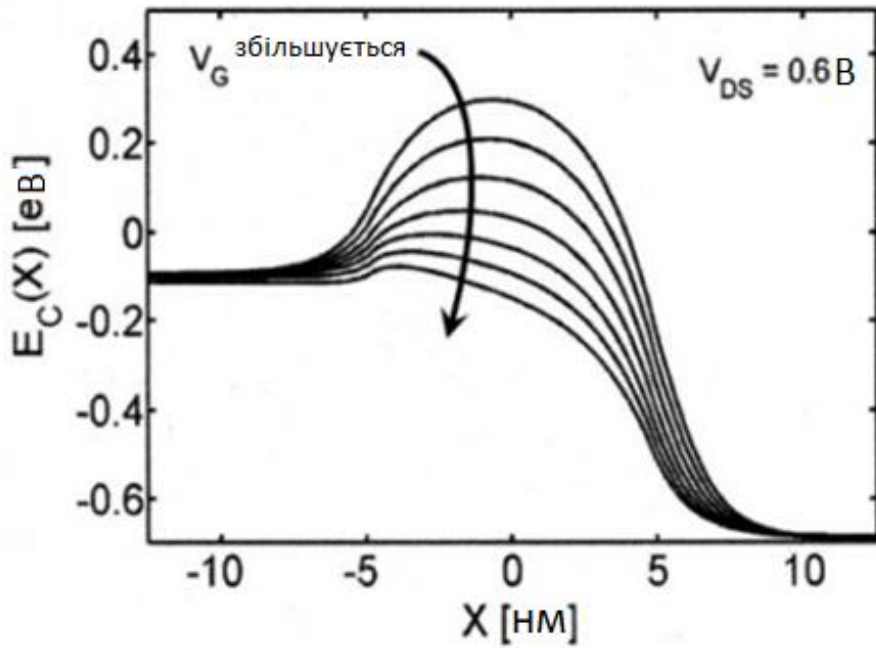


Рисунок 2.4 - Балістична функція розподілу у модельному пристрої за умов увімкненого стану [29]

Наведені результати ілюструють також зміну середньої дрейфової швидкості електронів уздовж каналу нанотранзистора.



(a)



(b)

Рисунок 2.5 – Розраховані енергетичні характеристики за (а) за низького зміщення стоку та (б) за високого зміщення стоку. Параметром є напруга затвора [29]

2.6. Висновки до другого розділу

У даному розділі розглянуто структури, конструкції та технології транзисторів з каналом на основі вуглецевої нанотрубки.

Зазначено особливості дрейфу носіїв заряду у вуглецевій нанотрубці та дано оцінку значень та залежності середньої дрейфової швидкості електронів уздовж каналу нанотранзистора.

Проаналізовано особливості виготовлення та фізико-топологічні параметри польових транзисторів з каналом на основі вуглецевих нанотрубок.

3 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ

3.1. Чисельна математична модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

Для моделювання у роботі використовується структура транзистора на основі нанотрубки, наведена на рис.2.3 з шаром діелектрика SiO_2 замість діелектрика HgO_2 .

У моделі схеми транзистора напівпровідниковий канал керується напругою затвора V_G , напругою стоку V_d і напругою витoku V_s з напругою підкладки V_{sub} . В неідеальному транзисторі також присутні чотири паразитні ємності: ємність затвора C_G , ємність стоку C_d , ємність витoku C_s і ємність підкладки C_{sub} . Ємність затвора представляє собою комбінацію електростатичної ємності C_E та квантової ємності C_Q в послідовному з'єднанні. [25]

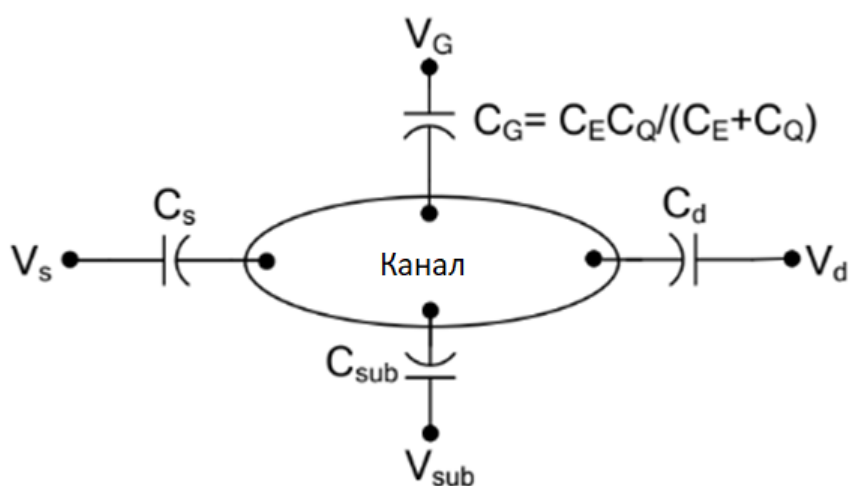


Рисунок 3.1 – Схема транзистора з врахуванням паразитних ємностей [25]

Зміну заряду можна записати як

$$\Delta Q = q(N_s + N_d + N_0), \quad (3.1)$$

де N_s – густина станів у k -просторі із додатною швидкістю, N_d – густина станів у k -просторі із від’ємною швидкістю N_0 – густина станів у разі рівноваги. V_{sc} – самоузгоджений потенціал каналу. З прикладанням напруги до затвору і стоку відбувається зниження напруги бар’єру у пристрої і це пов’язано з потенціалом V_L . Проте додаткові електрони змінюють потенціал до величини V_P . Самоузгоджена напруга визначається як [25]

$$V_{sc} = V_L + V_P = \frac{-Q_t + \Delta Q}{C_\Sigma}, \quad (3.2)$$

де Q_t і C_Σ — загальний заряд і сумарна ємність контактів транзистора, які можуть бути представлені так:

$$Q_t = C_s V_s + C_G V_G + C_d V_d + C_{sub} V_{sub}, \quad (3.3)$$

$$C_\Sigma = C_s + C_G + C_d + C_{sub}. \quad (3.4)$$

Стани носіїв заряду можуть бути описані функцією розподілу Фермі-Дірака та густинами, відповідно до рівнянь: [25]

$$N_s = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} D(E) f(E - U_{SF}) dE, \quad (3.5)$$

$$N_d = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} D(E) f(E - U_{DF}) dE, \quad (3.6)$$

$$N_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} D(E) f(E - E_F) dE, \quad (3.7)$$

де

$$U_{SF} = E_F - qV_{sc}, \quad (3.8)$$

$$U_{DF} = E_F - qV_{sc} - qV_{dc}. \quad (3.9)$$

Одновимірною функцією щільності стану може бути визначена так:

$$D(E) = \frac{2g_v g_s}{3\pi a_{cc} t} \sum_i \frac{E}{\sqrt{E^2 - (E_G/2)^2}}, \quad (3.10)$$

де $g_v = 2, a_{cc} = 1.42 \text{ \AA}, t = 3\text{eV}$

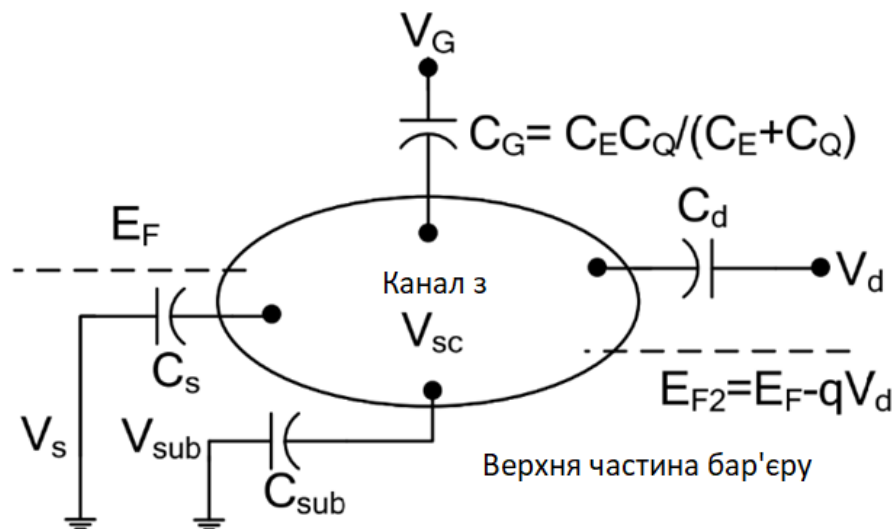


Рисунок 3.2 – Модель електростатичної ємності для «балістичного» транзистора [25]

C_s , C_d і V_{sc} представимо відповідними виразами:

$$C_s = (1 - \beta) C_c, \quad (3.11)$$

$$C_d = \beta C_c, \quad (3.12)$$

$$V_{sc} = \Delta\Phi_B / q, \quad (3.13)$$

де Φ_B — поверхневий потенціал каналу.

Теплова швидкість визначається як:

$$v_{th} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m^*}}. \quad (3.14)$$

Електрони починають дрейфувати під дією електричного поля. Швидкість дрейфу визначається як середня власна швидкість і визначається як

$$v_{id} = \int_{E_c}^{top \approx \infty} D(E) f(E) dE. \quad (3.15)$$

Розв'язок рівняння може бути аналітично виражений за допомогою густини станів та розподілу Фермі

$$v_{id} = v_{th} \frac{\Gamma\left(\frac{d+1}{2}\right) \xi_{\left(\frac{d-1}{2}\right)\{\eta_d\}}}{\Gamma\left(\frac{d}{2}\right) \xi_{\left(\frac{d-2}{2}\right)\{\eta_d\}}}, \quad (3.16)$$

Де $\Gamma(x)$ – гамма-функція. Параметр $d=1$ використовується для квазі-одновимірної структури, таких як нанотрубка та нанострічка, тоді як $d=2$ для квазі-2D MOSFET. Рівняння щодо густини носіїв заряду та швидкості квазіодновимірних (Q1D) носіїв заряду, інжектованих з витоку і стоку, можна виразити у вигляді відповідно до інтегральної функції Фермі-Дірака $\xi_i(\eta)$ [25]:

$$N_s = N_{1D} \xi_{-\frac{1}{2}}(\eta_c), \quad (3.17)$$

$$N_d = N_{1D} \xi_{-\frac{1}{2}}(\eta_c - U_d), \quad (3.18)$$

$$v^+ = \frac{\xi_0(\eta_c)}{\xi_{-\frac{1}{2}}(\eta_c)} \cdot \frac{v_{th}}{\sqrt{\pi}}, \quad (3.19)$$

$$v^- = \frac{\xi_0(\eta_c - U_d)}{\xi_{-\frac{1}{2}}(\eta_c - U_d)} \cdot \frac{v_{th}}{\sqrt{\pi}}, \quad (3.20)$$

$$\eta_c = (E - U_{sc}) / k_B T, \quad (3.21)$$

$$U_d = qV_d / k_B T, \quad (3.22)$$

$$N_{1D} = \sqrt{\frac{2m^* k_B T}{\pi \hbar^2}}. \quad (3.23)$$

$$\xi_i(\eta) = \frac{1}{\Gamma(i+1)} \int_0^\infty \frac{x^i}{e^{(x-\eta)} + 1} dx. \quad (3.24)$$

Рівняння 3.17-3.20 для двовимірної структури нанотранзистора можна представити так [25]:

$$N_s = N_{2D} \xi_0(\eta_c), \quad (3.25)$$

$$N_d = N_{2D} \xi_0(\eta_c - U_d), \quad (3.26)$$

$$v^+ = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\xi_{\frac{1}{2}}(\eta_c)}{\xi_0(\eta_c)} \cdot v_{th}, \quad (3.27)$$

$$v^- = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\xi_{\frac{1}{2}}(\eta_c - U_d)}{\xi_0(\eta_c - U_d)} \cdot v_{th}. \quad (3.28)$$

Силу струму можна визначити відповідно до швидкості електричного заряду, який рухається з витоку та стоку [25]:

$$I^+ = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} qv(E) D(E) f(E - U_{SF}) dE, \quad (3.29)$$

$$I^- = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} qv(E)D(E)f(E-U_{DF})dE. \quad (3.30)$$

Для одновимірної Q1D структури рівняння (3.29, 3.30) можна переформулювати так [25]:

$$I^+ = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \xi_0(\eta_c), \quad (3.31)$$

$$I^- = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \xi_0(\eta_c - U_d). \quad (3.32)$$

У той час як струм у двовимірній структурі Q2D виражається як [25]:

$$I^+ = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \xi_{\frac{1}{2}}(\eta_c), \quad (3.33)$$

$$I^- = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \xi_{\frac{1}{2}}(\eta_c - U_d). \quad (3.34)$$

Повний струм визначається різницею від'ємного і додатного струмів відповідно до формалізму Ландауера-Буттікера для одновимірної (3.35) і двовимірної (3.36) структури: [25]

$$I_{ds} = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \left[\xi_0 \left(\frac{U_{SF}}{k_B T} \right) - \xi_0 \left(\frac{U_{DF}}{k_B T} \right) \right], \quad (3.35)$$

$$I_{ds} = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \left[\xi_{\frac{1}{2}} \left(\frac{U_{SF}}{k_B T} \right) - \xi_{\frac{1}{2}} \left(\frac{U_{DF}}{k_B T} \right) \right]. \quad (3.36)$$

3. 2. Аналітична фізико-топологічна модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

Струм стоку представляє собою функцію напруги на затворі та напруги стоку, яка може бути записана так [30]:

$$I_{DS} = \sqrt{\frac{8m^* q (V_{GS} - V_T)}{\pi^2 h^2 (1 + C_q / C_e)}} \cdot q \frac{\mu_0}{L} \cdot \frac{V_{DS}}{1 + V_{DS} / V_C}, \quad (3.37)$$

де $m^* = 0,051 \cdot m_0$ - ефективна маса, де $m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31}$ [кг];

$L = 7 \cdot 10^{-9}$ [м] - довжина нанотрубки;

$t_{ins} = 0,3 \cdot 10^{-9}$ [м] - товщина ізолятора;

$t_{CNFET} = 1,57 \cdot 10^{-9}$ [м] - діаметр нанотрубки;

$v_F = 3 \cdot 10^5 \frac{m}{c}$ - швидкість Фермі; $n_{1D} = 3,25 \cdot 10^8$ [м⁻¹]- значення концентрації

носіїв для моделі CNFET з низькою рухливістю;

$n_{1D} = 8,95 \cdot 10^8$ [м⁻¹]- значення концентрації носіїв для моделі з високою рухливістю;

$\mu_0 = 360 \cdot 10^{-4}$ [м² / (В·с)] - низька рухливість носіїв заряду;

$\mu_0 = 7200 \cdot 10^{-4}$ [м² / (В·с)] - висока рухливість носіїв заряду;

$V_T = -0,05$ [В] - порогова напруга. [30]

Електричну ємність визначимо з такого рівняння [30]:

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\left(2t_{ins} + t_{CNFET}\right) / t_{CNFET}\right)} \quad (3.38)$$

де $\epsilon = 3,9\epsilon_0$ електрична константа для SiO₂ як ізолятора.

Наступні параметри визначимо як це наведено у роботі [30].

Квантова ємність визначається так:

$$C_q = \frac{2q^2}{hv_F} \quad (3.39)$$

Критичну напругу задаємо таким рівнянням:

$$V_C = \frac{v_{sat}}{\mu_0} L \quad (3.40)$$

де швидкість насичення дорівнює: [30]

$$v_{sat} = \frac{h}{4m^*} (n_{1D} \pi). \quad [30] \quad (3.41)$$

3. 3. Апроксимаційна математична модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

Для моделювання CNTFET рівняння можна виразити з використанням таких потенціалів відповідно стоку, витoku і затвору V_d , V_s і V_G . [25]

$$I_{ds}(V_G, V_d, V_s) = G_{ON} \frac{k_B T}{q} \left[\log \left(1 + \exp \left(q \left(E_F - V_{sc}(V_G, V_d, V_s) \right) / k_B T \right) \right) \right] - \quad (3.42)$$

$$- G_{ON} \frac{k_B T}{q} \left[\log \left(1 + \exp \left(q \left(E_F - V_{sc}(V_G, V_d, V_s) - V_d - V_s \right) / k_B T \right) \right) \right]$$

де $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ [Кл] - елементарний заряд електрона;

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ [Дж · К⁻¹] = $8.617 \cdot 10^{-5}$ [eV · К⁻¹] - стала Больцмана;

$T = 300$ [К] - температура;

$E_F = 1$ [eV] = $1.6 \cdot 10^{-19}$ [Дж] - енергія Фермі;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} [\text{Дж} \cdot \text{с}] = 4,135 \cdot 10^{-15} [\text{eВ} \cdot \text{с}]$ - стала Планка;

$M = 50$ - кількість підзон.

Загальний опір можна отримати з лінійної області ВАХ. Його також можна розрахувати як:

$$R_{ON} = R_{channel} + R_{contact} \quad (3.43)$$

Провідність для таких пристроїв визначається величиною, зворотною рівнянню, наведеному вище: [25]

$$G_{ON} = \frac{1}{R_{ON}} \quad (3.44)$$

Максимальна провідність CNT у «балістичному» наближенні запишеться

[25]:

$$G_{ON} = \frac{4q^2}{h} M \quad (3.45)$$

Застосовуємо нелінійну апроксимацію для залежності V_{sc} від V_d і V_G у вигляді полінома четвертого порядку. Вираз може бути записано так [25]:

$$V_{sc}(V_G, V_d, V_s) = AV_d + BV_G^4 + CV_G^3 + DV_G^2 + EV_G + F \quad (3.46)$$

де A , B , C , D , E і F – коефіцієнти, які отримані методом налаштування кривих відповідно до експериментальних даних. Така аналітична модель дозволяє проводити моделювання вихідних характеристик нанотранзистора за наявності масивів експериментальних даних та не потребує значних обчислювальних витрат. Коефіцієнти для V_{sc} для порівняння математичних моделей буде використано як наведено у роботі [25]:

$$V_{sc} = -0.035V_d + 0.664V_G^4 - 0.877V_G^3 + 0.349V_G^2 - 0.921V_G + 3.821 \cdot 10^{-4} \quad (3.47)$$

3.4. Висновки до третього розділу

У третьому розділі розглянуто три типи математичних моделей польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки: чисельну, аналітичну фізико-топологічну та аналітичну апроксимаційну.

Наведено рівняння для кожної моделі з урахуванням низки наближень для подальшого розроблення алгоритмів і програм розрахунку у середовищі МАТЛАБ.

Визначено параметри і набір вхідних даних для зазначених математичних моделей.

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРІВ З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ

4. 1. Аналіз результатів розрахунків для аналітичної фізико-топологічної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

Моделювання за допомогою аналітичної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки у середовищі МАТЛАБ проведемо з використанням формули розрахунку струму стоку від напруги на затворі та напруги стоку (3.37). Електрична ємність визначається формулою (3.38), квантова ємність – формулою (3.39), критична напруга – формулою (3.40), швидкість насичення – формулою (3.41). Необхідні параметри для розрахунку також представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри та експериментальні дані аналітичної моделі за низьких та високих значень рухливості

Параметри	Низька рухливість	Висока рухливість
Вектор хіральності	(20 0)	
Діаметр трубки t_{CNFET} , [нм]	1,57	
Елементарний заряд електрона q , [Кл]	$1,6 \cdot 10^{-19}$	
Стала Планка h , [Дж·с]	$6,626 \cdot 10^{-34}$	
Діелектрична проникність ϵ_0 , [Ф/м]	$8,85 \cdot 10^{-12}$	
Ефективна маса m^*	$0,051 \cdot m_0$	
Довжина каналу L , [нм]	7	

Товщина ізолюючого шару t_{ins} , [нм]	0,3	
Швидкість Фермі v_F , [м/с]	$3 \cdot 10^5$	
Діелектрична константа ϵ	3,9	
Рухливість μ_0 , [м ² / (В·с)]	$360 \cdot 10^{-4}$	$7200 \cdot 10^{-4}$
Концентрація носія n_{1D} , [1/м]	$3,25 \cdot 10^8$	$8,95 \cdot 10^8$
Швидкість насичення v_{sat} , [м/с]	$5,82 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$
Квантова ємність C_q , [Ф]	$1,331 \cdot 10^{-10}$	
Критична напруга V_C , [В]	1,29	0,18
Порогова напруга V_T , [В]	-0,05	

У результаті моделювання отримуємо такі графіки залежності струму витoku від напруги на затворі за низьких та високих значень рухливості носіїв заряду.

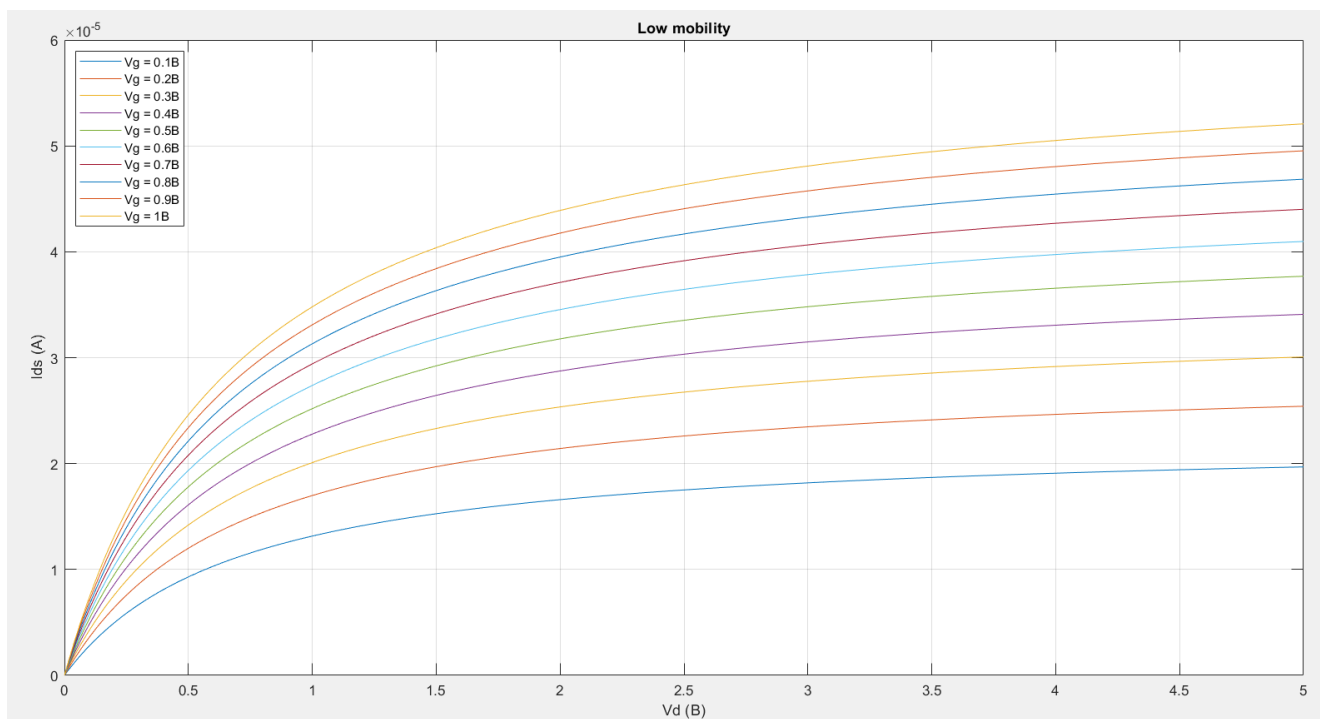


Рисунок 4.1 – Аналітична фізико-топологічна модель. Графік залежності струму витoku від напруги на затворі за низьких значень рухливості носіїв заряду.

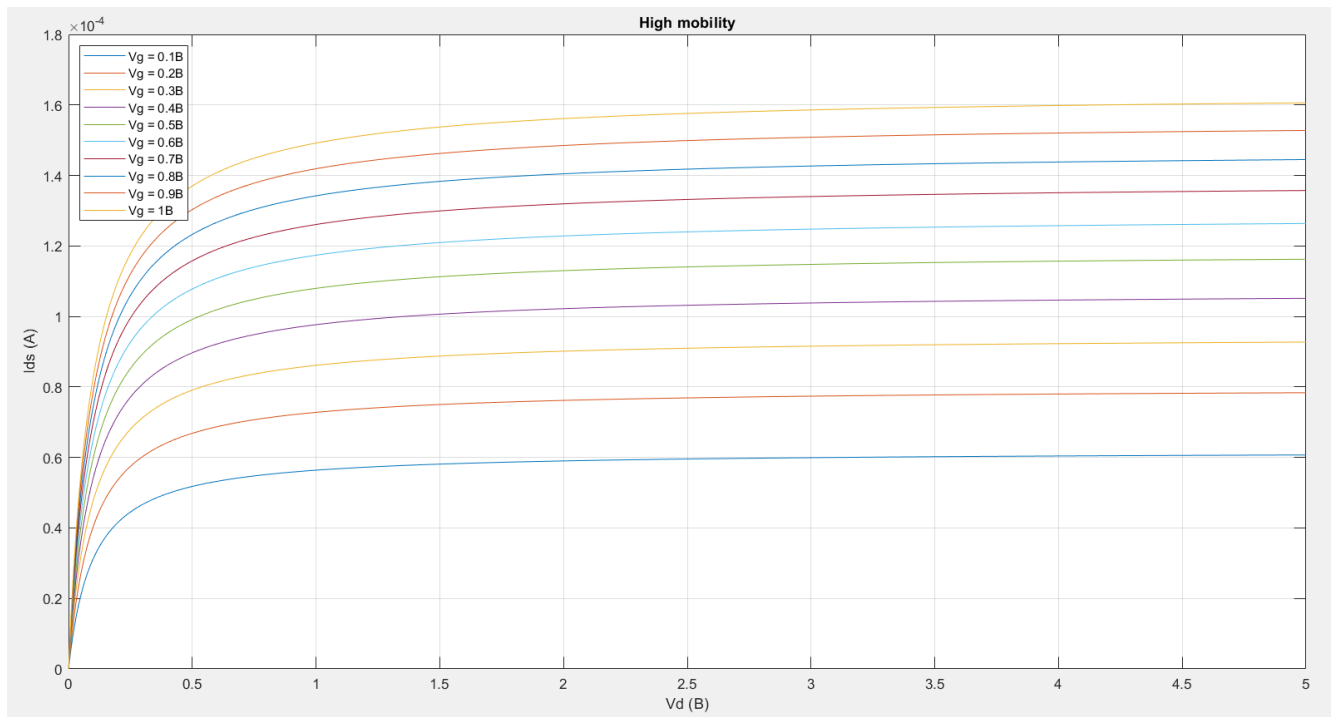


Рисунок 4.2 – Аналітична фізико-топологічна модель. Графік залежності струму витіку від напруги на затворі за високих значень рухливості

Графіки ілюструють зміну струму стоку у залежності від напруги стік-витік за різних значень напруги на затворі.

Зі збільшенням V_g вольт-амперні характеристики зміщуються, що вказує на вплив напруги затвора на рівні струму і перекриття провідного каналу пристрою. Зазвичай вищі значення напруги на затворі ведуть до збільшення струмів стоку, що є типовим для поведінки польового транзистора з каналом на основі вуглецевої нанотрубки.

Низька рухливість вказує на те, що напівпровідниковий матеріал (нанотрубка), який використовується, має обмежену дрейфову швидкість електронів, що позначається на рівнях вихідного струму нанотранзистора у широкому діапазоні змін напруг затвору і стоку. У матеріалах із низькою рухливістю носії заряду рухаються повільніше під впливом електричного поля, що може бути пов'язано з неідеальністю нанотрубки і впливом різних механізмів розсіювання на дрейф носіїв заряду.

На рис.4.3 і 4.4 наведено вхідні вольт-амперні характеристики

нанотранзистора, де параметром є напруга на стоці. Відповідні графіки залежностей струму стоку наведено для структури з низькою та високою рівнями рухливості.

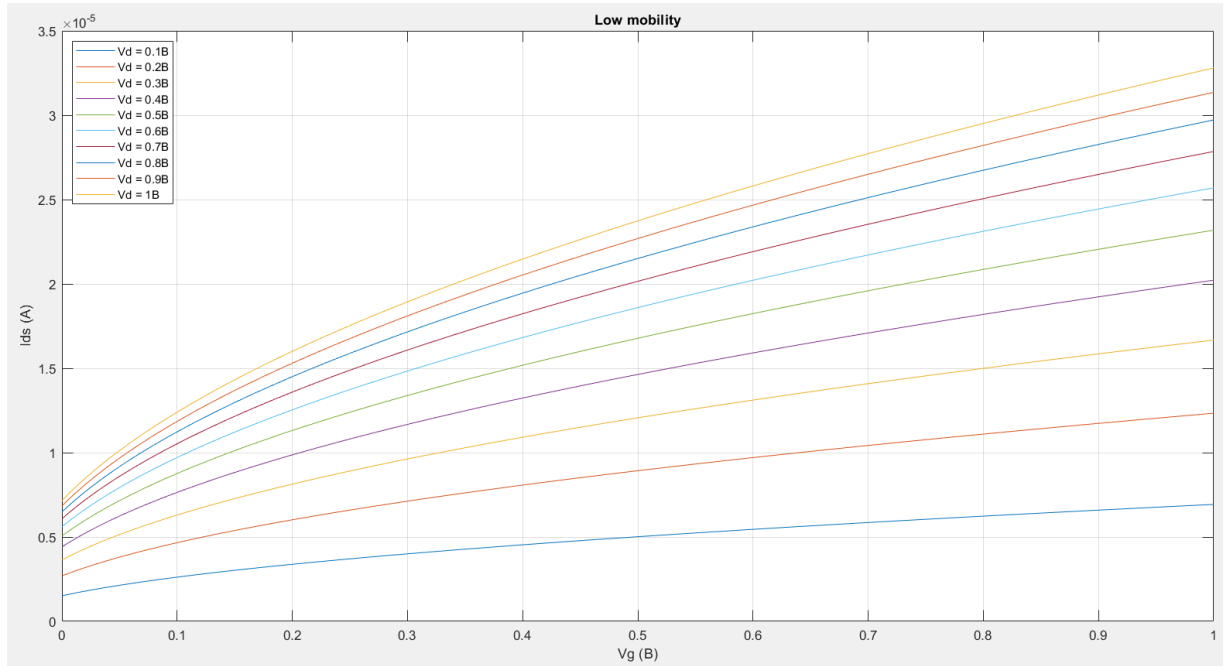


Рисунок 4.3 – Графік залежності струму стоку (I_{ds}) як функція напруги на затворі (V_g) для низьких рівнів рухливості носіїв заряду

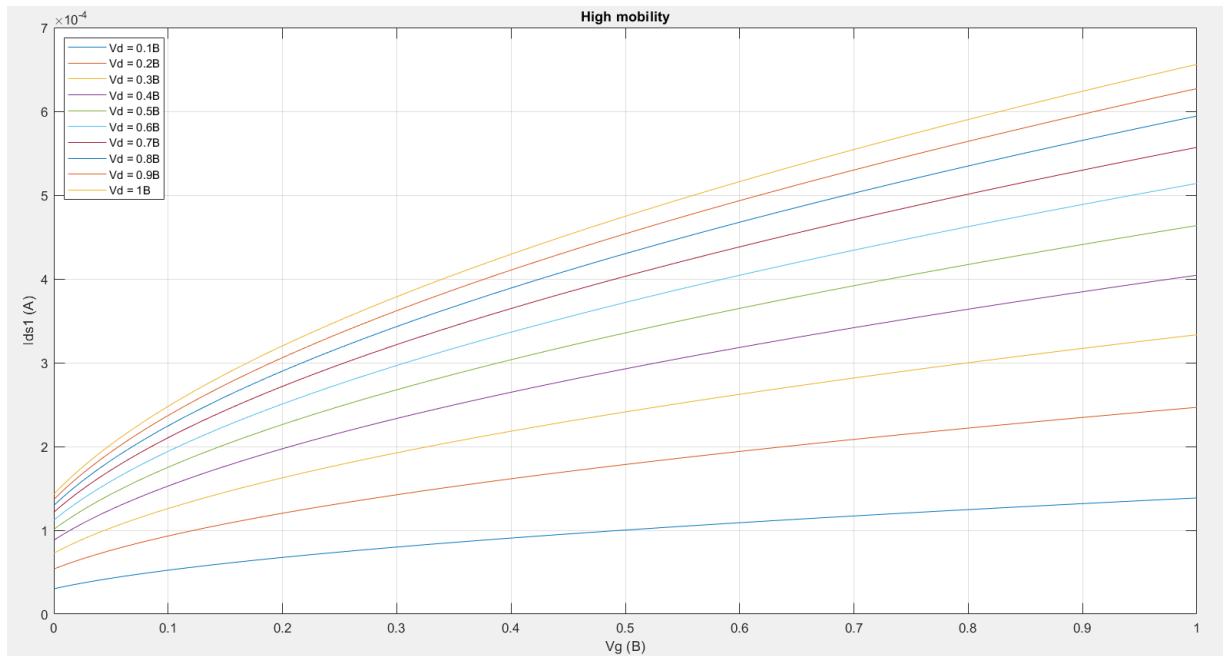


Рисунок 4.4 – Графік залежності струм стоку (I_{ds}) як функція напруги на затворі (V_g) для високих рівнів рухливості носіїв заряду

Графіки ілюструють особливості зміни вихідного струму транзистора щодо рівнів струму відкритого і закритого транзистора, переходу від «омічної» області зміни струму до області насичення струму стоку.

Наведені вихідні характеристики транзистора свідчать про низькі рівні потужності транзистора і можливості високого ступеня інтеграції мікро- і наносхем на основі польового транзистора з каналом у вигляді вуглецевої нанотрубки.

4.2. Вплив параметрів структури транзистора на основі вуглецевої нанотрубки в аналітичній фізико-топологічній моделі

4. 2. 1. Вплив параметра структури L (довжини каналу) транзистора

Для подальшого моделювання в середовищі МАТЛАБ скористаємось формулами (3.37-3.41).

Проаналізуємо вплив L -довжини каналу на вихідні вольт-амперної характеристики. Проаналізуємо ВАХ транзистора за низьких та високих рівнів рухливості носіїв заряду та за зміни параметру L . На рисунках нижче наведено ВАХ транзистора за значення $L=10$ нм – червоною штрих пунктирною лінією, за значення $L=50$ нм – синьою точковою лінією, за значення $L=100$ нм – чорною лінією.

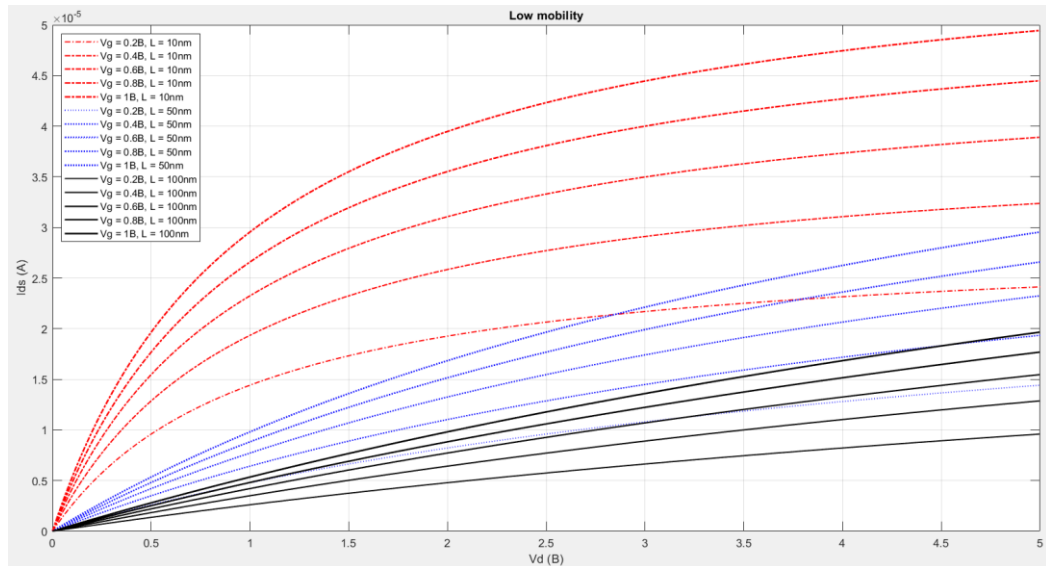


Рисунок 4.5 – Вихідні ВАХ для аналітичної фізико-топологічної моделі за різних значень параметру L для низьких рівнів рухливості

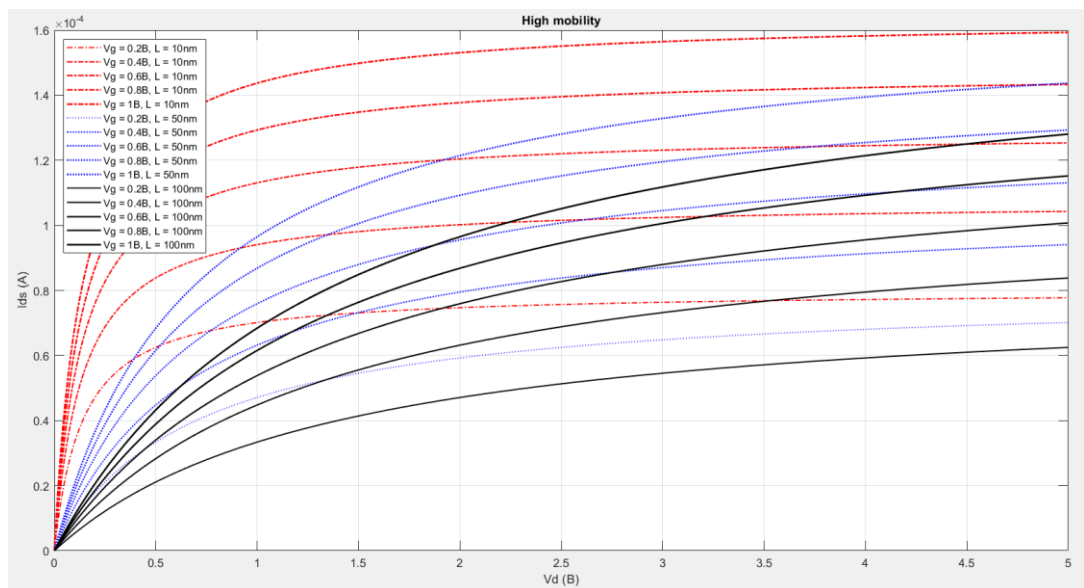


Рисунок 4.6 – Вихідні ВАХ для аналітичної фізико-топологічної моделі за різних значень параметру L для високих рівнів рухливості

Зміни довжини каналу транзистора L визначають простір і час дрейфу носіїв заряду, що, у свою чергу, впливає на характеристики транзистора як щодо рівнів струму, так і на хід залежностей щодо переходу з «омічної» області до області насичення. Помітна тенденція зменшення вихідного струму транзистора із

збільшенням довжини нанотрубки.

4. 2. 2. Вплив параметра структури t_{ins} (товщини ізолюючого шару) транзистора

Розглянемо вплив товщини ізолюючого шару під затвором на вихідні вольт-амперні характеристики транзистора. Здійснено моделювання ВАХ для моделі за низьких та високих значень рухливості та зміни параметра t_{ins} . На рисунках нижче наведено результати моделювання для значення $t_{ins}=0,1$ нм – червоною штрих пунктирною лінією, для $t_{ins}=1$ нм – синьою точковою лінією, для $t_{ins}=5$ нм – чорною суцільною лінією. Проаналізуємо графіки вольт-амперних характеристик за зміни параметру

t_{ins} .

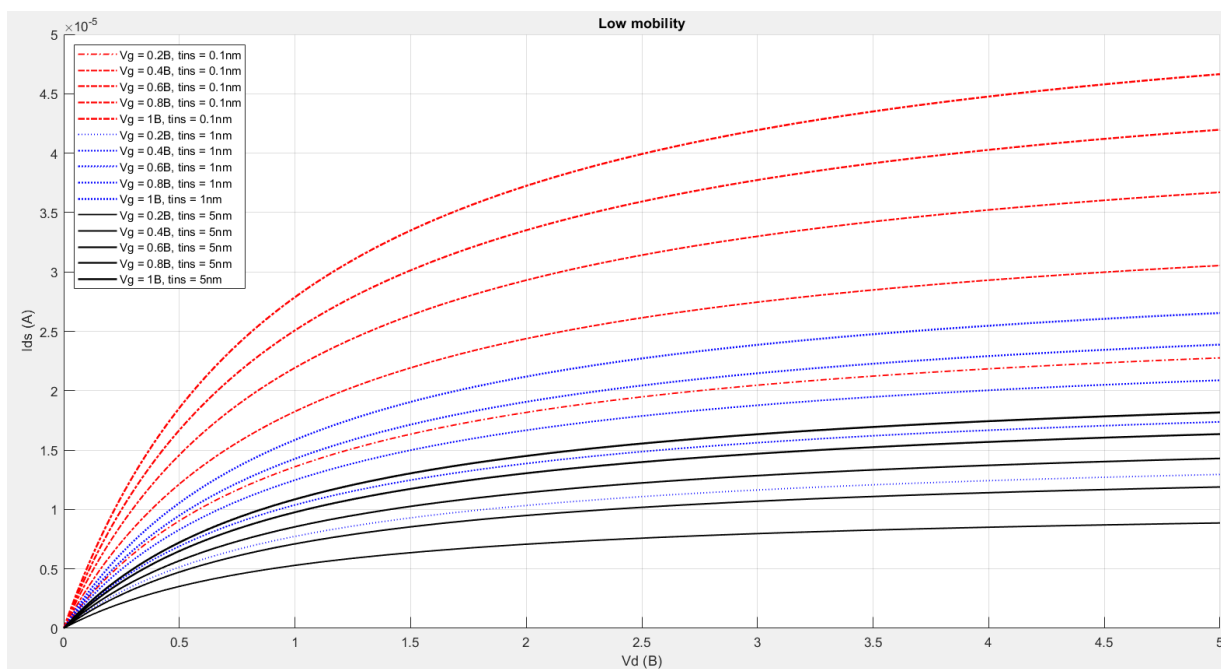


Рисунок 4.7 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру t_{ins} для низьких рівнів рухливості

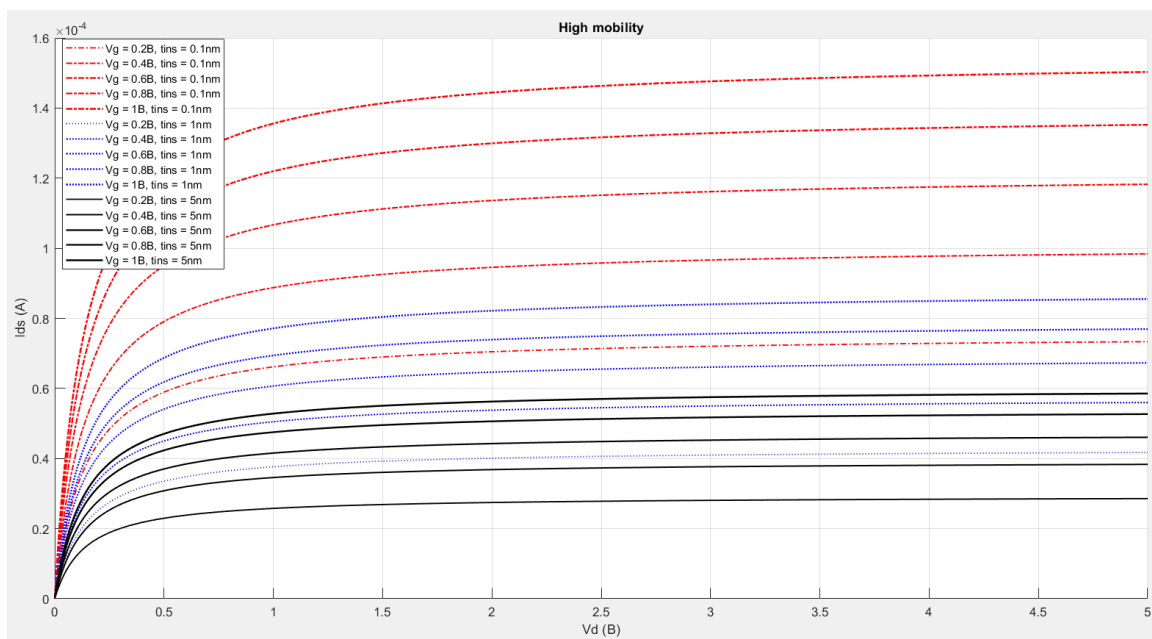


Рисунок 4.8 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру t_{ins} для високих рівнів рухливості

Зміни товщини діелектрика t_{ins} призводять до змін у ємності затвора, що, у свою чергу, впливає на характеристики транзистора. Більші значення шару ізолятора затвора можуть привести до зміни умов накопичення заряду та, відповідно, до змін струму стоку.

Варіації параметра t_{ins} впливають на роботу транзистора, змінюючи його здатність контролювати вихідний струм. Більш тонкі шари ізолятора затвора забезпечують більші значення струму транзистора і кращу керованість полем затвора вихідним струмом. Але товщина шару діелектрика обмежується технологічними можливостями. Перспективними можуть бути застосування замість оксидів кремнію нових діелектричних матеріалів з високим значенням електричної сталості, як це показано на рис.2.3.

4. 2. 3. Вплив параметра структури C_q (квантової ємності) транзистора

Проаналізуємо вплив квантової ємності на вихідні вольт-амперні характеристики . Здійснено моделювання ВАХ для моделей з низькою та високою рухливістю носіїв заряду за зміни значення параметра C_q . На рисунках нижче наведено вихідні характеристики для значень параметра C_q , яке розраховане за формулою (3.39), і позначено чорною лінією для значення $C_q = 1,331 \cdot 10^{-10} [\Phi]$ та знайденої величини квантової ємності експериментальним методом (наведено у роботі [30]) – позначено червоною штрих пунктирною лінією.

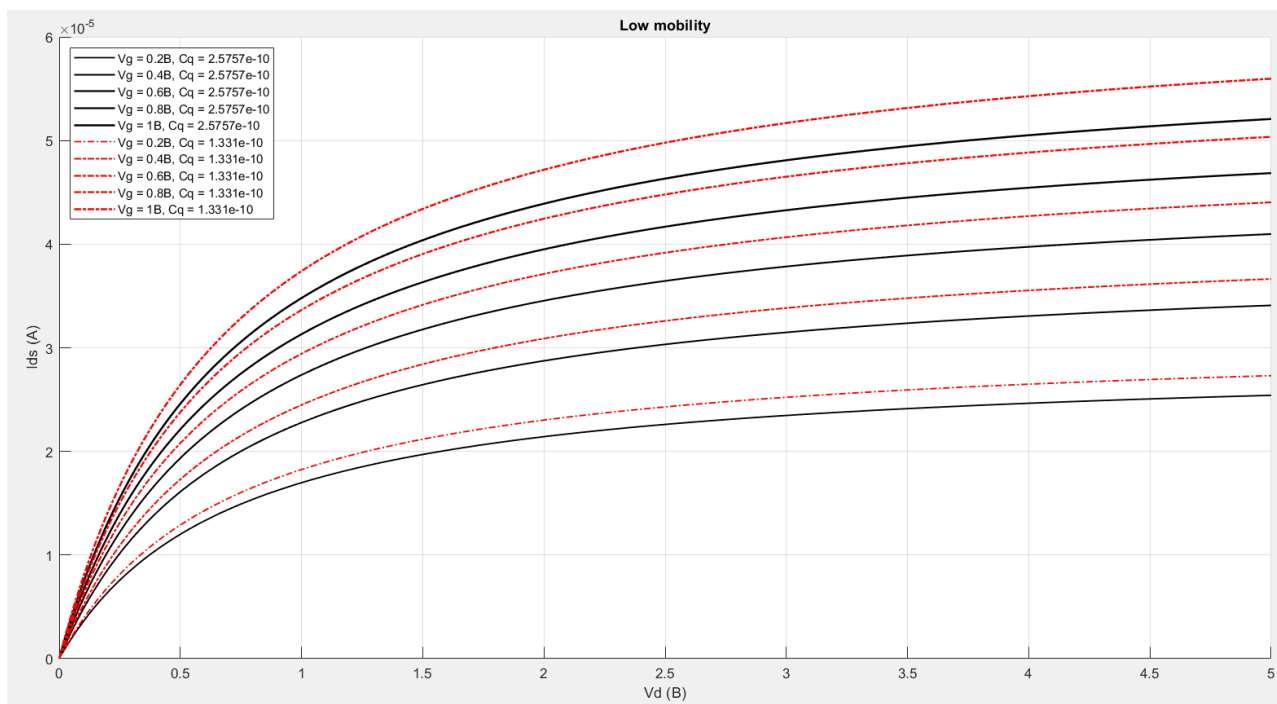


Рисунок 4.9 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру C_q [Φ] для низьких рівнів рухливості

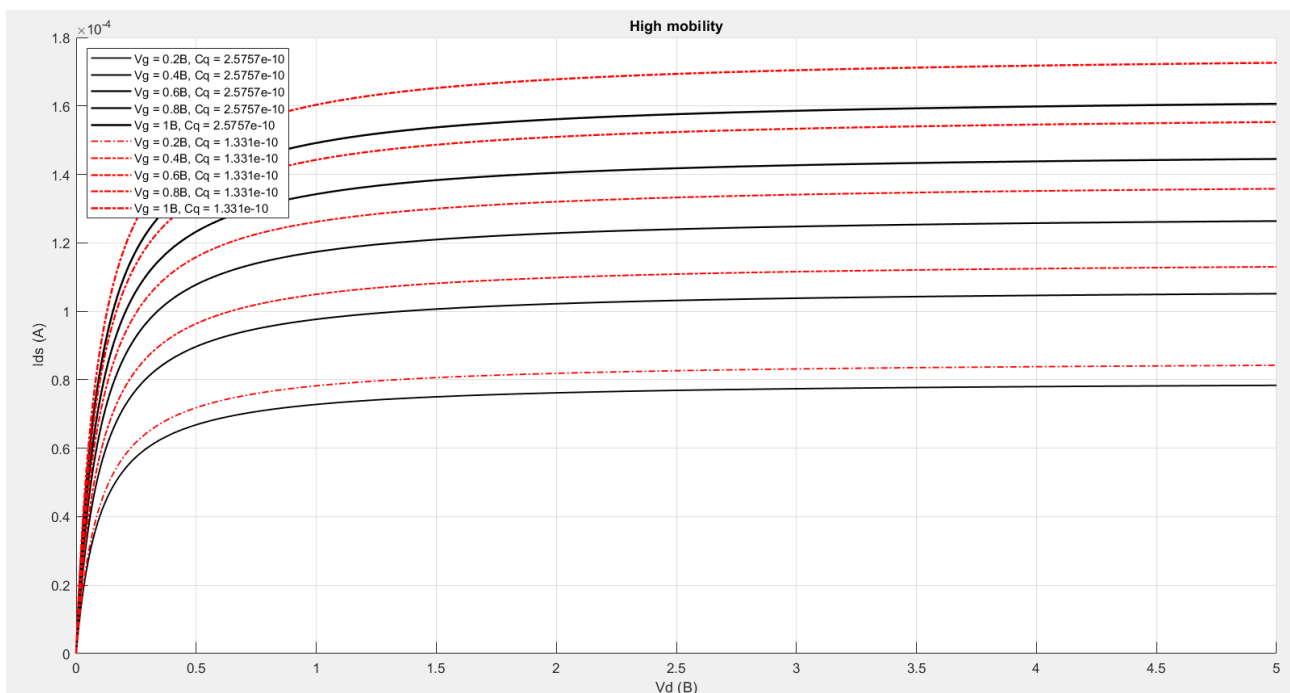


Рисунок 4.10 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру C_q [Ф] для високих рівнів рухливості

Графіки наглядно показують вплив різних значень C_q на рівні струму стоку. Менші значення квантової ємності дозволяють отримувати більші рівні вихідного струму транзистора, але зміна C_q майже не впливає на хід кривих як на «омічній» області, так і в області насичення струму стоку. Різниця в експериментальних (більш високі значення) і теоретичних значеннях квантової ємності може бути пов'язана як з недосконалістю вимірювань тестової структури, так і спрощеним підходом щодо розрахунків значень квантової ємності.

4. 2. 4. Вплив параметра структури v_{sat} (швидкість насичення) транзистора

Розглянемо вплив насичення швидкості v_{sat} на вихідні вольт-амперної характеристики. Розрахуємо ВАХ для моделей з низькою та високою рухливістю за зміни значення параметра v_{sat} . На рисунку наведено значення параметра v_{sat} ,

розраховане за формулою (3.41) та чорними лініями відповідно розраховані ВАХ та значення v_{sat} , знайдене експериментальним методом [30] – відповідні ВАХ позначено червоною штрих пунктирною лінією.

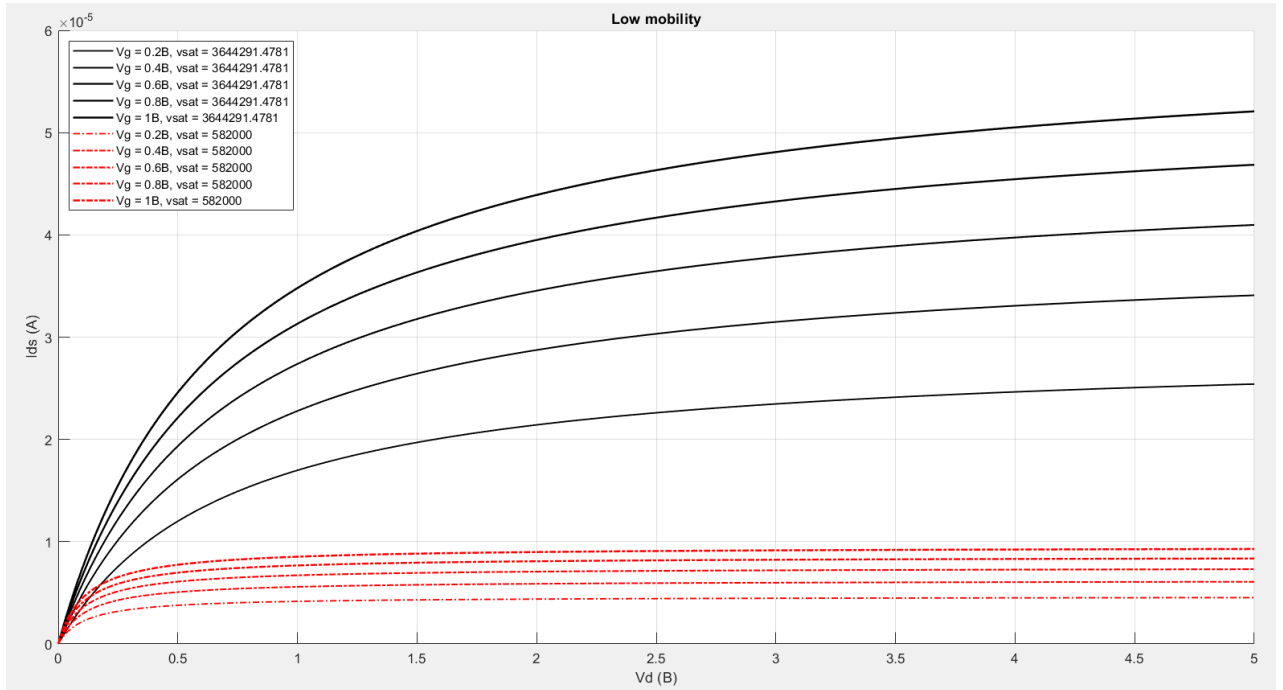


Рисунок 4.11 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру v_{sat} [м/с] для низького значення рухливості

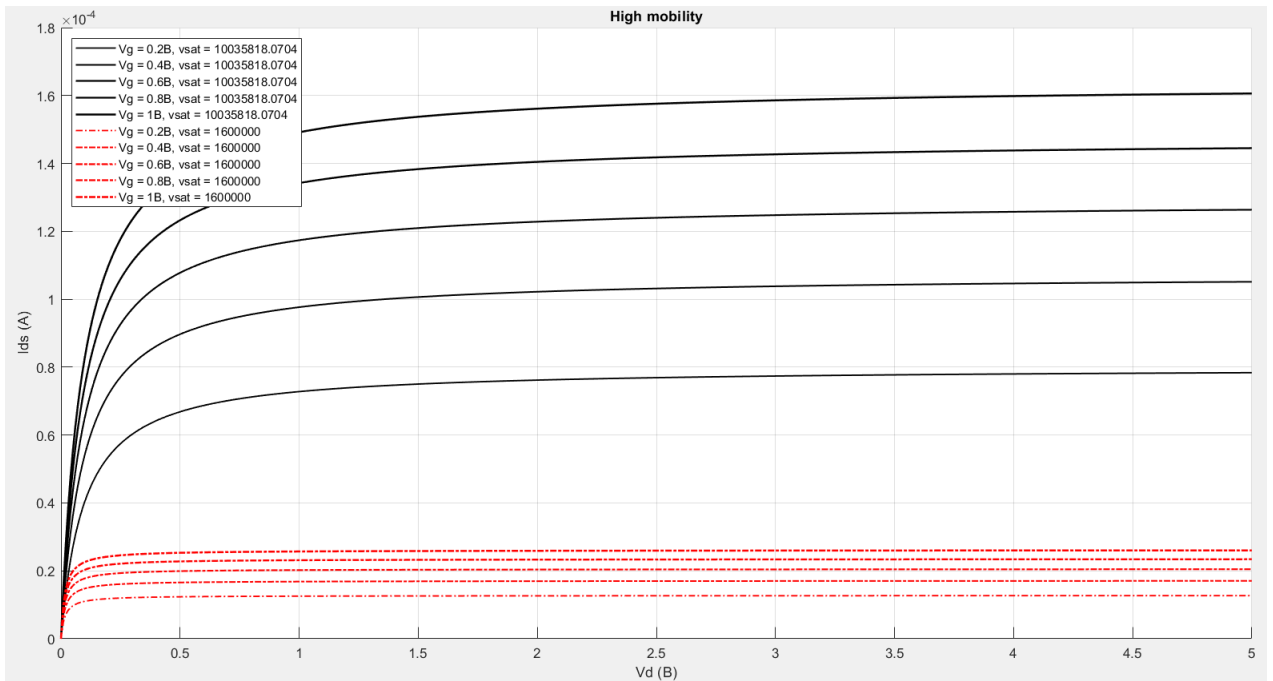


Рисунок 4.12 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру v_{sat} [м/с] для високого рівня рухливості

Збільшення швидкостей насичення веде до зростання струму стоку, що свідчить про умови швидшого руху носіїв заряду через канал, що призводить до покращення швидкодії пристрою.

4. 2. 5. Вплив параметра структури V_c (критична напруга) транзистора

Розглянемо вплив критичної напруги V_c на вихідні вольт-амперні характеристики транзистора. Здійснено моделювання вольт-амперних характеристик для випадку з низькою та високою рухливостями за зміни значення параметра V_c . На наведених нижче рисунках показано значення параметра V_c , розраховане за формулою (3.40) – відповідні залежності ВАХ позначено чорною лінією та значення V_c , знайдені експериментальним методом [30] – відповідні залежності ВАХ позначено червоною штрих пунктирною лінією.

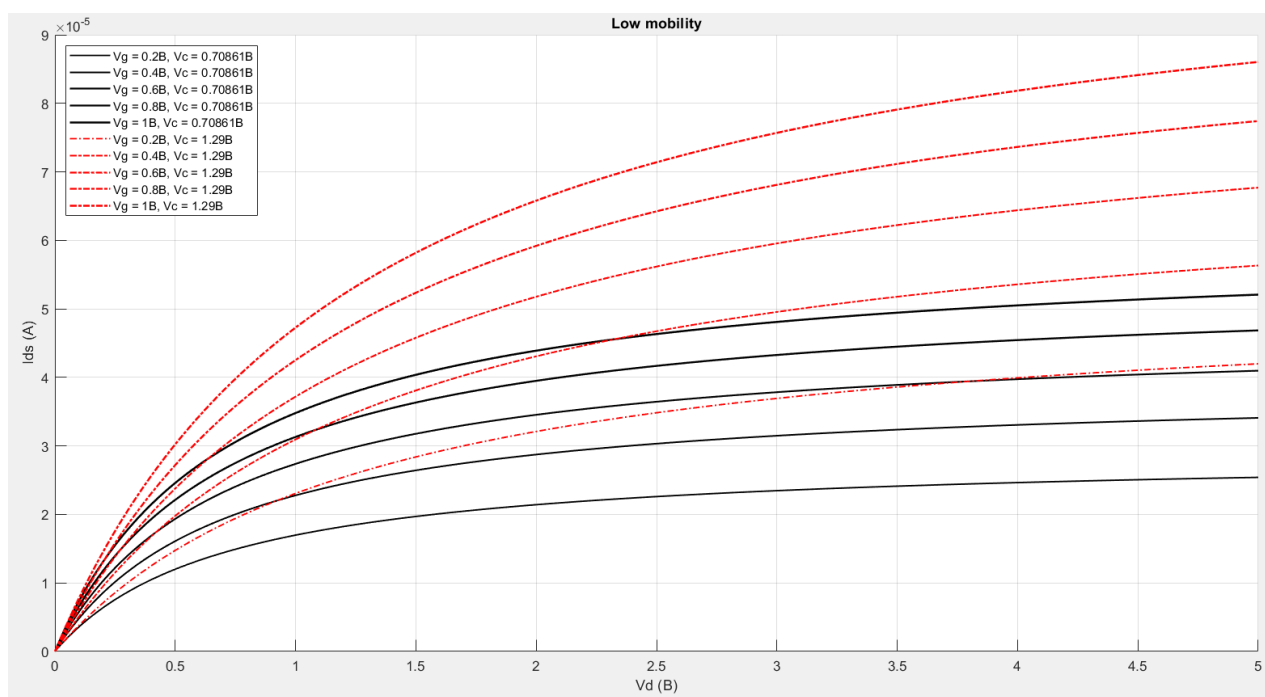


Рисунок 4.13 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру V_c для високого значення рухливості

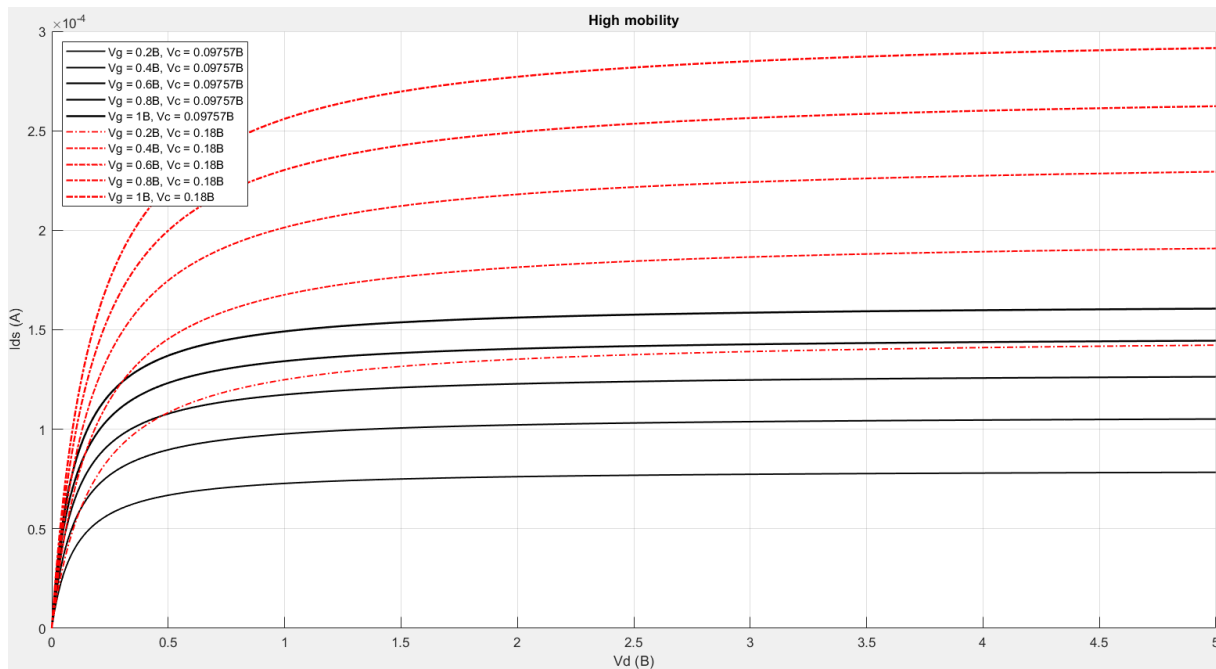


Рисунок 4.14 – ВАХ аналітичної фізико-топологічної моделі за зміни параметру V_c для високого значення рухливості

Коли V_c збільшується, струм стоку (I_{ds}) має тенденцію до зменшення.

Менші значення V_c призводять до вищих струмів стоку, що вказує на потенційно кращі показники крутизни ВАХ пристрою.

4. 3. Апроксимаційна модель транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

Розглянемо результати моделювання за допомогою апроксимаційної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки у середовищі МАТЛАБ з використанням формули розрахунку струму стоку від напруги на затворі та напруги стоку (3.37). Необхідні параметри та формули для розрахунку

представленні у пункті 3.3.

У результаті моделювання отримуємо наступні графіки залежності струму витоку від напруги на затворі (рис.4.5) .

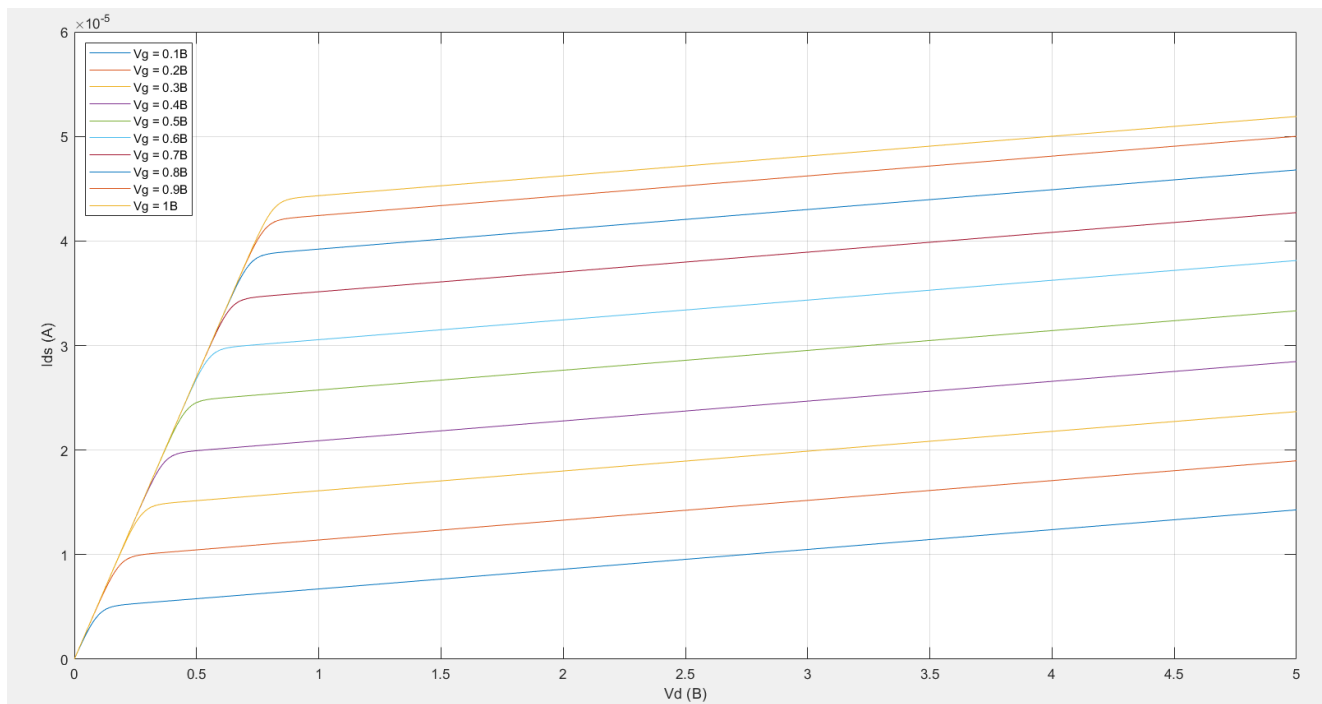


Рисунок 4.15 – Апроксимаційна модель. Графік залежності струму витоку від напруг на стоці і затворі

Звертають увагу особливості вихідних вольт-амперних характеристик розрахованих на основі апроксимаційної моделі і суттєво відрізняються від ВАХ на основі аналітичної фізико-топологічної моделі. По-перше, вони мають лінійний характер як на «омічній» ділянці, так в області насичення струму току. По-друге, нахил залежностей на ділянці насичення струму стоку постійний, що означає постійність провідності (опору) провідного каналу. По-третє, перехід залежностей від «омічної» області до області насичення досить різкий.

Апроксимаційна модель демонструє вищі значення струму стоку за менших значень напруги на затворі V_g порівняно з випадком низької рухливості фізико-топологічної моделі.

Суттєвою також є залежність ВАХ апроксимаційної моделі за зміни параметра M . Відповідно ВАХ для значення $M=1$ зображене чорною лінією, а для $M=5$ – червоною штрих пунктирною лінією.

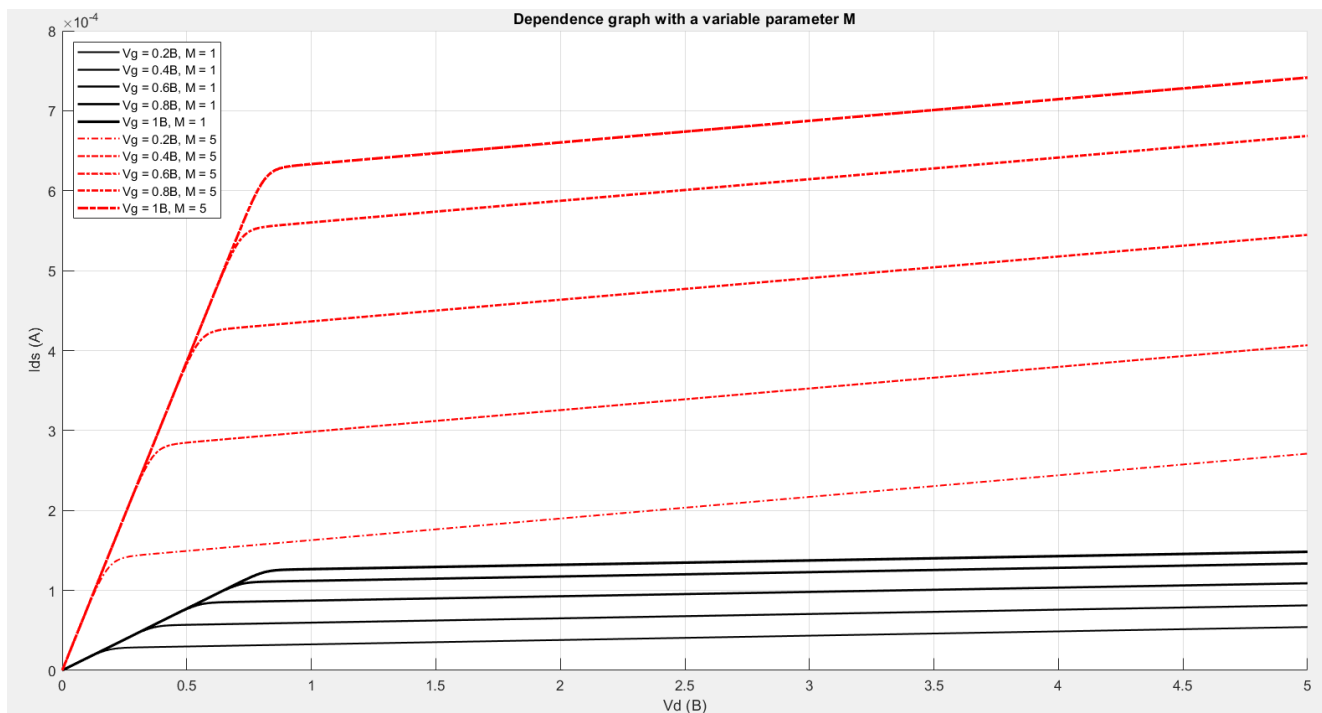


Рисунок 4.16 – ВАХ апроксимаційної моделі за зміни параметру M

Збільшення значень параметра M супроводжується загальним підвищенням струму стоку (I_{ds}) за однакових значеннях напруги на затворі та напруги стік-витік. Суттєво змінюється також нахил ВАХ як на «омічній» ділянці, так і на ділянці насичення струму стоку. Зміщується також точка переходу до області насичення.

4. 4. Порівняння аналітичної фізико-топологічної та апроксимаційної моделей транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

На рис.4.17 наведено результати порівняння вихідних вольт-амперних характеристик, розрахованих у середовищі МАТЛАБ, де суцільною лінією

зображено результати моделювання за апроксимаційною моделлю, а пунктирною лінією – відповідно результати моделювання за аналітичною фізико-топологічною моделлю за низького рівня рухливості.

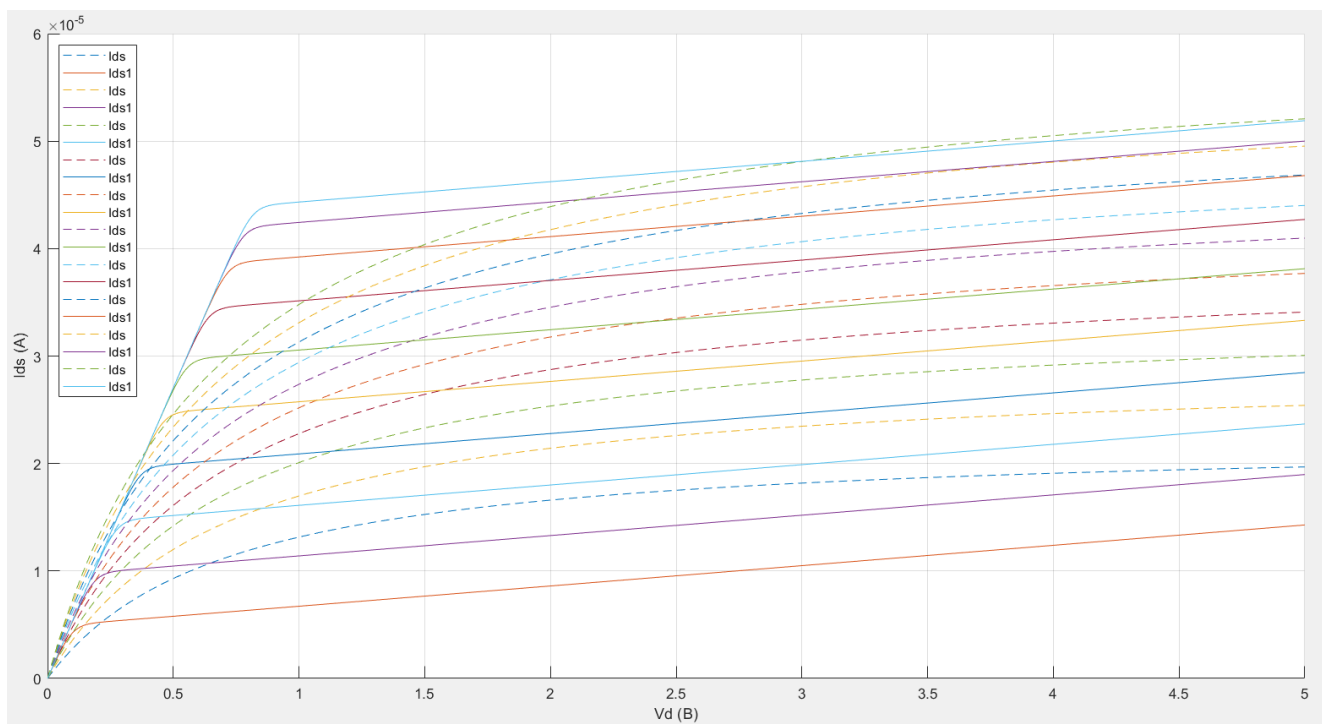


Рисунок 4.17 - Порівняння ВАХ аналітичної фізико-топологічної та апроксимаційної моделей транзистора на основі вуглецевих нанотрубок

На цьому графіку показано пряме порівняння між характеристиками аналітичної фізико-топологічної моделі для низької рухливості та апроксимаційною моделлю.

Результати експериментальних досліджень [30] структур польового транзистора на основі вуглецевих нанотрубок з підзатворним діелектриком з діоксиду кремнія свідчать про адекватний характер розрахованих за допомогою аналітичної фізико-топологічної моделі вихідних ВАХ, наведених у даній роботі, зокрема, щодо рівнів вихідних струмів і характеру кривих на відповідних ділянках ВАХ. Однак для надійної верифікації реалізованих у дисертації моделей необхідні додаткові дані про фізико-топологічні параметри структури транзистора та удосконалення моделей щодо опису механізмів розсіювання у нанотрубці.

Розвиток підходів до моделювання пов'язано як з удосконаленням математичних моделей, так і появою нових конструкцій та технологічних досягнень у створенні нових перспективних структур польових транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок. [31]

4.5. Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі досліджено результати моделювання транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок. Проведено аналіз аналітичної фізико-топологічної моделі транзистора та побудовано графіки струму витоку від напруги на затворі за різних значень рухливості носіїв заряду.

Досліджено вплив на вольт-амперні характеристики за різних значень рухливості різних параметрів структури транзистора для аналітичної фізико-топологічної моделі, зокрема, довжини каналу, товщини ізолюючого шару під затвором, квантової ємності, швидкості насичення та критичної напруги.

Представлено результати моделювання для апроксимаційної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки з аналізом впливу напруги на затворі на струм стоку за різних напруг стік-витік. .

Проведено порівняльний аналіз аналітичної фізико-топологічної та апроксимаційної моделей транзистора. Більш фізичні результати отримано за допомогою аналітичної фізико-топологічної моделі, однак за наявності експериментальних даних і верифікацій параметрів обидві аналітичні моделі, які не потребують значних обчислювальних витрат, можуть бути використані як для оптимізації параметрів і характеристик структури нанотранзистора, так і для розрахунків у пакетах схемотехнічного проектування.

ВИСНОВКИ

1. У роботі проведено аналіз властивостей вуглецевих нанотрубок та польових транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок, методів їх виготовлення та напрямки застосування.
2. Розглянуто три типи математичних моделей польових транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок: чисельна, аналітична фізико-топологічна та аналітична апроксимаційна.
3. Розроблено алгоритми та програми розрахунку у середовищі МАТЛАБ для аналітичної фізико-топологічної та аналітичної апроксимаційної моделей.
4. Проведено аналіз аналітичної фізико-топологічної моделі транзистора та отримано вихідні вольт-амперні характеристики. За різних значень рухливості носіїв заряду досліджено вплив на вольт-амперні характеристики параметрів структури транзистора, зокрема, довжини каналу, товщини ізолюючого шару під затвором, квантової ємності, швидкості насичення та критичної напруги.
5. Представлено результати моделювання для апроксимаційної моделі транзистора на основі вуглецевої нанотрубки з аналізом впливу напруги на затворі на струм стоку за різних напруг стік-витік.
6. Проведено порівняльний аналіз аналітичної фізико-топологічної та апроксимаційної моделей транзистора. Більш фізичні результати отримано за допомогою аналітичної фізико-топологічної моделі, однак за

наявності експериментальних даних і верифікації параметрів обидві аналітичні моделі, які не потребують значних обчислювальних витрат, можуть бути використані як для оптимізації параметрів і характеристик структури нанотранзистора, так і для розрахунків у пакетах схемотехнічного проєктування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Md Nur Karim, M.A. Sayed Patwary, S.M. Ashik Abedin, Md Riaj Hossen and Md Saifur Rahmen. A review on carbon nanotubes: preparation, properties and applications. 2020. P. 96-103:
https://www.researchgate.net/publication/358030931_A_Review_on_Carbon_Nanotubes_Preparation_Properties_and_Applications
2. Michael J. O'Connell, Ph.D. Carbon Nanotubes Properties and Applications.2006.P.321:
https://macbeth.if.usp.br/~gusev/Carbon_Nanotube2.pdf
3. Professor Hongjie Dai. AN INTRODUCTION TO CARBON NANOTUBES, 2003. P. 14.
4. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка. Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, Ю. І. Якименко, 2012. 300с.
5. Jose Mauricio Marulanda Prado. Current transport modeling of carbon nanotube field effect transistors for analysis and design of integrated circuits: Doctoral Dissertations: Louisiana State University, Baton Rouge, U.S.A. August 2008. 141p.
6. О.М. Бурлака, Я.В. Пірко. Вуглецеві нанотрубки та застосування їх для генетичної трансформації рослин. Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України. Київ, 2011. С.84-101.
7. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. C. Eklund. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes: Academic, San Diego, 1996. 996p.
8. Павлиш В.А., Закалик Л.І., Корж Р.О., Доскоч З.І. Моделювання електричних характеристик нанорозмірного транзистора. Національний університет “Львівська політехніка”, Львів.2008. с.11-16.
9. Назаров О.М., Нищенко М.М. Наноструктури та нанотехнології: навчальний посібник. Київ.: НАУ, 2010. 256с.

10. Shobhit Kareer. Fabrication of Carbon Nanotube Field Effect Transistor Using Dielectrophoresis and Its Application as Static Random Access Memory Bit Cell: A dissertation submitted for the degree of Master of Applied Science: Ottawa, Canada. 2019. 91p.
11. Sonia Khanna and Nazmul Islam. Carbon Nanotubes-Properties and Applications. Department of Chemistry, India. 2018. P. 001-006.: <https://juniperpublishers.com/omcij/pdf/OMCIJ.MS.ID.555705.pdf>
12. Simone Colasanti. Modeling and Simulation of Carbon Nanotubes Networks: Toward a Multiscale Approach: Dissertation: Technical University of Munhen. 2016. P.169.
13. Roberto Marani and Anna Gina Perri. The next generation of FETs: CNTFETs. Polytechnic University of Bari, Italy. 2015. P.14.
14. Yaseen Lone. Nanotechnology, Carbon Nanotubes (CNTs) and Applications. India 2021. P. 71-89.: <https://austinpublishinggroup.com/ebooks/nanotechnology/chapters/nanotechnology-carbon-nanotubes-CNTs.pdf>
15. Georg Broza. SYNTHESIS, PROPERTIES, FUNCTIONALISATION AND APPLICATIONS OF CARBON NANOTUBES: A STATE OF THE ART REVIEW. Germany. September 2009. P. 35-45.: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1344/fulltext287.pdf>
16. Muhammad Musaddique Ali Rafique, Javed Iqbal. Production of Carbon Nanotubes by Different Routes— A Review. University of Engineering and Technology, Pakistan. 2011. P. 29-34.: https://www.scirp.org/pdf/jeas20110200001_85900219.pdf
17. Adedeji Ebenezer Agboola. Development and model formulation of scalable carbon nanotube processes: HiPCO and CoMoCAT process models. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. 2005. P. 425.: https://repository.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2634&context=gradschool_theses

18. Kalpana Awasthi, Anchal Srivastava and O.N. Srivastava. SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES. Physics Department, Banaras Hindu University, INDIA. P.65.: <https://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0505/0505526.pdf>
19. Seyed Oveis Mirabootalebi and Gholam-Hosein Akbari Fakhrabadi. Methods for synthesis of carbon nanotubes – Review. 2017. P.1-10.: https://www.researchgate.net/publication/321038392_Methods_for_synthesis_of_carbon_nanotubes_-_Review
20. М.О. Боровий, Ю.А. Куницький, О.О. Каленик, І.В. Овсієнко, Т.Л. Цареградська. НАНОМАТЕРІАЛИ, НАНОТЕХНОЛОГІЇ, НАНОПРИСТРОЇ. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ 2015. 351с.
21. О. П. Ткач. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні: Навчальний посібник. Сумський державний університет. 2014. 127с.
22. Monika Trivedi and Reecha. Recent Development and Applications of Carbon Nanotubes. 2020. P. 1-9.
23. J. W. G. Wildöer, L. C. Venema, A. G. Rinzler, R. E. Smalley, and C. Dekker, Nature. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes. Journal of letters to nature. 1998. Vol 391. P. 59-62.
24. Dafeng Zhou. Circuit-level Modelling and Simulation of Carbon Nanotube Devices: A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy: University of Southampton. July 2010. P. 176.
25. Michael Loong Peng Tan. Device and Circuit-level Models for Carbon Nanotube and Graphene Nanoribbon Transistors: A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy : Queens' College; University of Cambridge. January 2011. P.193.
26. Albert Lin. CARBON NANOTUBE SYNTHESIS, DEVICE FABRICATION, AND CIRCUIT DESIGN FOR DIGITAL LOGIC APPLICATIONS. May 2010. P.166.
27. Aaron D. Franklin and Zhihong Chen. Length scaling of carbon nanotube transistors. 2010. P. 858-862.

28. Simulation Tom J. Kazmierski, Member, IEEE, Dafeng Zhou. Numerically Efficient Modeling of CNT Transistors With Ballistic and Nonballistic Effects for Circuit. 2010. P. 99-107.
29. Anisur Rahman, Jing Guo, Supriyo Datta, Fellow, Mark S. Lundstrom. Theory of Ballistic Nanotransistors. IEEE transactions on electron devices. Vol. 50. No. 9. September 2003. P. 1853-1864.
30. Desmond C.Y. Chek, Michael L.P. Tan. Analytical modeling of high performance single-walled carbon nanotube field-effect-transistor.2010. P. 579-584.
31. Li Xiang , Huaidong Ye, Hui Wang, and Yuwei Wang. Conformable Carbon Nanotube Thin Film Transistors on Ultrathin Flexible Substrates // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES. – VOL.70, NO. 6, JUNE–2023. – P.3106–3111.