

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

23.05. 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»**

за спеціальністю 171 «Електроніка» освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему «Наноструктури для електроніки на основі двовимірних матеріалів»

Здобувача групи ЕП. М-21н Шевченка Вадим Ігоревич

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

Вадим ШЕВЧЕНКО

Керівник кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики

Наталія ШУМАКОВА

Суми 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 «Електроніка», освітньо-наукова програма

«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри
Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
«01» травня 2024 р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**
Шевченка Вадима Ігоревича

1. Тема роботи: «Наноструктури для електроніки на основі двовимірних матеріалів» затверджена наказом СумДУ від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи:

Актуальність теми: актуальність кваліфікаційної роботи обумовлена тим, що двовимірні матеріали є центральним елементом для переважної більшості приладів нанорозмірних масштабів, які використовують у сучасній електроніці. Завдяки використанню двовимірних матеріалів електронне обладнання вдалося зробити більш компактним та точним, збільшити його функціональні можливості.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в дослідженні наноструктур для електроніки на основі двовимірних матеріалів. Вона передбачає вивчення фізичних властивостей таких матеріалів, дослідження методів їх виготовлення та можливого застосування в електронних пристроях.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

1. Наноструктури для електроніки на основі двовимірних матеріалів.
2. Наноструктури на основі двовимірних матеріалів у сучасній електроніці.
3. Застосування наноструктур на основі двовимірних матеріалів у сучасній електроніці.
4. Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур.
5. Визначення розміру наночастинок та побудова гістограми при аналізі мікрознімків.
6. Параметри двовимірних польових транзисторів.
7. Моделювання транспорту носіїв у двовимірних транзисторах.
8. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 3-4. Огляд сучасного стану досліджень у галузі наноструктур для електроніки

Слайди № 5-7. Методи отримання наноструктур на основі двовимірних матеріалів

Слайди № 8. Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур.

Слайди № 9-10. Визначення розміру наночастинок та побудова гістограми при аналізі мікрознімків.

Слайди № 11-12. Транзистори на основі двовимірних матеріалів.

Слайд №13. Висновки.

Слайд №16. Подяка.

6. Дата видачі індивідуального завдання 01.05.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан виконання роботи
1	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 16.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., онлайн	<i>вик.</i>
5	Захист кваліфікаційної роботи	23.05.2024 р., 11-40 онлайн	

Здобувач

Вадим ШЕВЧЕНКО

Керівник

Наталія ШУМАКОВА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 42 сторінках, зокрема, містить 15 рисунків, список використаних джерел складається з 29 найменувань.

Актуальність теми: актуальність кваліфікаційної роботи обумовлена тим, що двовимірні матеріали є центральним елементом для переважної більшості приладів нанорозмірних масштабів, які використовують у сучасній електроніці. Завдяки використанню двовимірних матеріалів електронне обладнання вдалося зробити більш компактним та точним, збільшити його функціональні можливості.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в дослідженні наноструктур для електроніки на основі двовимірних матеріалів. Вона передбачає вивчення фізичних властивостей таких матеріалів, дослідження методів їх виготовлення та можливого застосування в електронних пристроях.

Під час виконання роботи використовували методи досліджень: аналітичний огляд літературних даних, порівняння розрахункових і експериментальних результатів різних авторів, узагальнення проаналізованих результатів.

У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що двовимірні матеріали перспективними для розвитку нанотехнологій, зокрема при виготовленні транзисторів та сенсорів.

Розглянуті методи: хімічного осадження з газової фази, метод літографії та лазерний метод отримання наноструктур на основі двовимірних матеріалів. Розглянуто методи: просвічуючої електронної мікроскопії та скануючого тунельного мікроскопу для дослідження наноструктур. Проведено вимірювання розмірів наночастинок та побудовано гістограми за зібраними даними за допомогою програм ImageJ JS.

Ключові слова: графен, двовимірні матеріали, електропровідність, мікроскопія, наноматеріал, транзистор.

Результати даної роботи були представлені на Міжнародній науковій конференції «Фізика, електроніка, електротехніка :: ФЕЕ» м. Суми, 2024.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. НАНОСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ	5
1.1 Огляд сучасного стану досліджень у галузі наноструктур для електроніки ..	5
1.2 Сучасний стан досліджень у галузі наноструктур для електроніки.....	7
1.3 Методи отримання наноструктур на основі двовимірних матеріалів	8
1.3.1 Хімічне осадження з газової фази (CVD)	8
1.3.2 Метод літографії	10
1.3.3 Лазерний метод.....	12
РОЗДІЛ 2. НАНОСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ У СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ	14
2.1 Застосування наноструктур на основі двовимірних матеріалів у сучасній електроніці	14
2.2 Технології виготовлення наноструктур: зверху – вниз та знизу – вгору ..	17
2.3 Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур	21
2.3.1 Просвічуюча електронна мікроскопія	22
2.3.2 Іонно-польова мікроскопія	23
2.3.3 Скануючий тунельний мікроскоп	24
2.4 Визначення розміру наночастинок та побудова гістограми при аналізі мікрознімків	26
РОЗДІЛ 3. ТРАНЗИСТОРИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ	29
3.1 Параметри двовимірних польових транзисторів	29
3.2. Моделювання транспорту носіїв у двовимірних транзисторах	32
3.3 Визначення характеристик транзисторів	36
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

У сучасному світі електроніка відіграє важливу роль у багатьох аспектах нашого життя, від комунікацій до медицини та виробництва. З розвитком технологій постають нові вимоги до електронних пристроїв: вони повинні бути швидкішими, енергоефективнішими та меншими за розміром. У цьому контексті, дослідження та розробка нових матеріалів та структур для електроніки стає надзвичайно важливим завданням.

Одним з найбільш перспективних напрямків є використання двовимірних матеріалів для створення наноструктур. Такі матеріали, як графен, діоксид молібдену (MoS_2) та інші, мають унікальні фізичні властивості, які роблять їх ідеальними для електронних застосувань. Вони можуть бути використані для створення транзисторів, діодів, сенсорів та інших електронних компонентів, які характеризуються високою швидкістю, низьким споживанням енергії та можливістю роботи на масштабах, де класичні матеріали досягають своїх меж.

Поява двовимірних матеріалів відкрила нові горизонти для розвитку наноелектроніки. Графен, наприклад, володіє виключно високою електропровідністю, теплопровідністю та механічною міцністю. Ці властивості роблять його незамінним у створенні високошвидкісних транзисторів та інших компонентів. Діоксид молібдену, в свою чергу, демонструє чудові напівпровідникові властивості, які можуть бути використані в нових типах електронних пристроїв, таких як гнучка електроніка та прозорі електронні системи.

Враховуючи потенціал та унікальні властивості двовимірних матеріалів, їх дослідження та розвиток стають критично важливими для подальшого технологічного розвитку. Ця робота спрямована на глибше вивчення властивостей цих матеріалів та їх застосування у сучасних та майбутніх електронних пристроях.

РОЗДІЛ 1. НАНОСТРУКТУРИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Огляд сучасного стану досліджень у галузі наноструктур для електроніки

Двовимірні наноматеріали – це клас матеріалів, які відрізняються своєю структурою та властивостями, що залежать від двох просторових координат. Вони відображають матеріали, у яких атоми або молекули організовані у вкладену структуру в двох вимірах, при цьому їх товщина в порівнянні з іншими розмірами відносно невелика[1-5]. Наприклад, на рисунку 1.1 показана діаграма, що ілюструє бібліотеку двовимірних матеріалів. BSCCO – це оксид вісмуту, стронцію, кальцію і міді, тоді як BCN або боркарбонітрид – це суміш бору, вуглецю та азоту.

Найвідоміший двовимірний матеріал графен - це одношаровий кристалічний вуглець, який складається з атомів вуглецю, розташованих у шестикутних гексагональних структурах. Цей матеріал має низку унікальних властивостей, які роблять його особливо цінним у різних сферах науки та технологій. Зокрема, графен відомий своєю високою електропровідністю, винятковою механічною міцністю і прозорістю, що робить його перспективним матеріалом для застосування у виробництві електроніки, сенсорів, акумуляторів та інших пристроїв. Наприклад, графен може бути використаний для створення тонких та легких дисплеїв, ефективних сонячних батарей, а також для зміцнення матеріалів у композитних конструкціях.

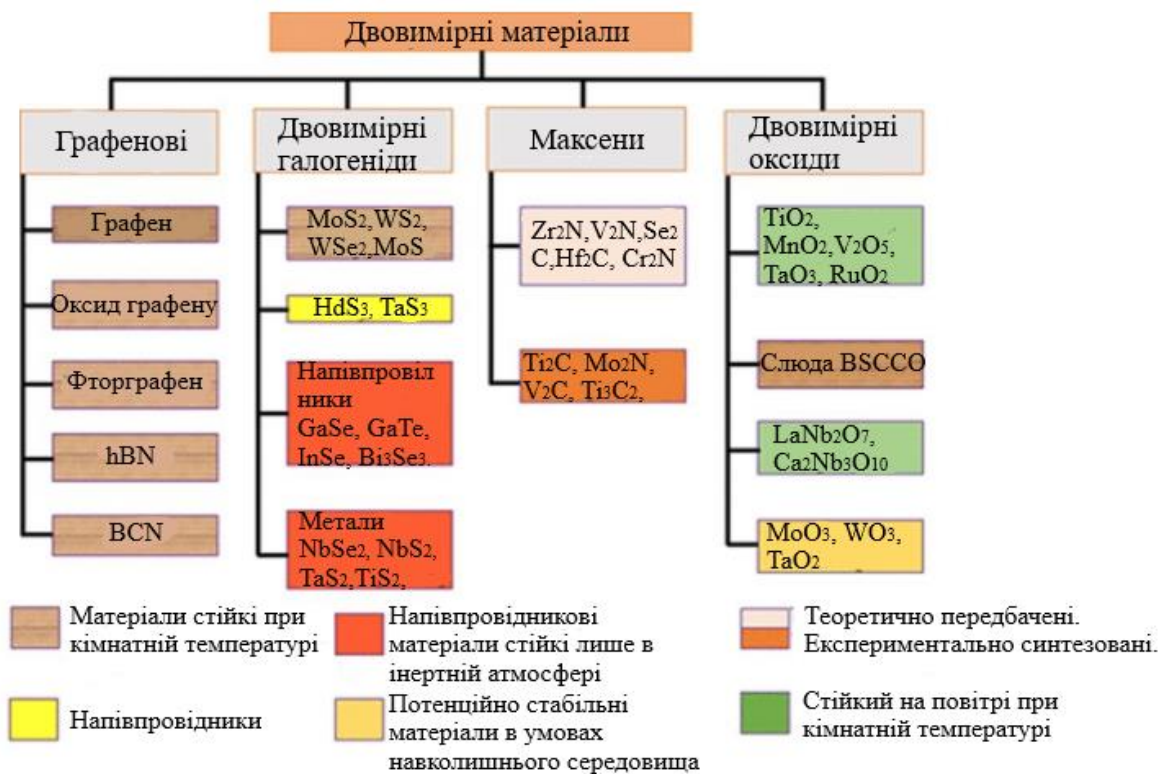


Рисунок 1.1 Бібліотека двовимірних матеріалів [2]

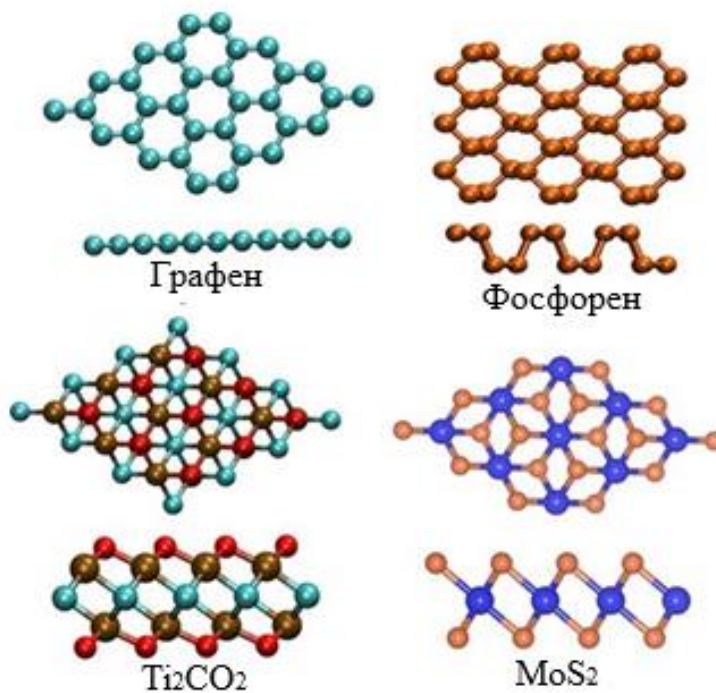


Рисунок 1.2 Структура двовимірних матеріалів [2]

Окрім графену, науковці виявили багато інших двовимірних наноматеріалів, які відрізняються властивостями від багатовимірних форм тих же матеріалів. Наприклад молекулярні стрічки - це приклад двовимірних структур, які складаються з однієї або кількох молекул і мають властивості, що залежать від їх хімічного складу та конфігурації. Ці матеріали можуть виявляти різноманітні властивості, такі як напівпровідникова поведінка або феромагнетизм.

Перовськітові матеріали представляють собою клас нанокристалічних речовин з кристалічною структурою, аналогічною мінералу перовськіту. Вони знаходять широке застосування у фотоелектриці, оптоелектроніці та каталізі.

Моношари двоковалентних матеріалів - це двовимірні структури, що складаються з одного шару атомів одного хімічного елемента. На рисунку 1.2 також показана структура моношарів, зроблених з перехідних металів, таких як молібден (MoS_2) та вольфрам (WS_2), які мають унікальні електронні та оптичні властивості.

1.2 Сучасний стан досліджень у галузі наноструктур для електроніки

Починаючи з моменту відкриття графену в 2004 році, наукова спільнота свідчить про значний прогрес у дослідженнях двовимірних матеріалів [1-4]. Ці матеріали на сьогоднішній день представлені величезним асортиментом. Особливе місце серед них займають шаруваті структури, що складаються з халькогенідів (S, Se, Te) та перехідних металів (Mo, W, Cr, Zr, V, Ti, Nb, Hf, Ta, Pd, Pt), представлені за формулою MeX_2 . Завдяки їх характерній субнанометровій товщині та листоподібній структурі, електронні, оптоелектронні, фізичні та хімічні властивості цих матеріалів є надзвичайно привабливими та викликають значний інтерес серед дослідників [2-5]. Транспорт носіїв (електронів/дірок), фононів і фотонів у двовимірних матеріалах суттєво обмежений зовнішніми поверхнями. Завдяки впливу розмірного ефекту спостерігаються зміни в їх

електронних, теплових та оптичних властивостях, про що свідчать численні дослідження [2-9], присвячені цим питанням.

Важливо зазначити, що двовимірні матеріали виявляють незначну зміну рухливості носіїв заряду зі зменшенням товщини [2-5]. У той же час, багат шарові структури не можуть конкурувати з об'ємними матеріалами, такими як Si або GaAs. Натомість, двовимірні матеріали часто виявляють очевидні переваги в діапазоні товщин менше 3 нм, що є ключовим для подальшого масштабування транзисторів. Згідно з авторами [2], рухливість Si швидко зменшується при товщині менше 5 нм, тоді як рухливість двовимірних матеріалів мало залежить від товщини і значно вища у цьому випадку.

Двовимірні транзистори також відзначаються набагато меншим підпороговим коливанням, що є ключовим аспектом для постійного масштабування довжини затвора до рівня менше 10 нм. Зберігаючи високу електронну провідність на критичному рівні обмеження (<1 нм), можливо використовувати транзистори з довжиною затвора менше 10 нм, при цьому зберігаючи низьке підпорогове коливання та мінімальний струм витoku. Це важливо для досягнення високої продуктивності, що важко досягти за допомогою кремнієвої електроніки, навіть з використанням передових конструкцій FinFET. Таким чином, використання двовимірних матеріалів відкриває перспективи для розвитку вузлів з технологією 5 нм [2-5].

1.3. Методи отримання наноструктур на основі двовимірних матеріалів

1.3.1 Хімічне осадження з газової фази (CVD)

Хімічне осадження з газової фази (CVD) є важливим методом для нанесення твердих покриттів на поверхні підкладок або деталей. Цей процес базується на осадженні тонких плівок на нагрітих деталях за допомогою газоподібних сполук металів.

Суть методу полягає у тому, що кінцевий продукт формується на поверхні підкладки або деталі завдяки взаємодії газоподібних речовин-прекурсорів або піролізу парів речовини-прекурсора. Ці речовини-прекурсори можуть перебувати у газоподібному, твердому або рідкому стані при нормальних умовах. Випаровані або возгонені речовини-прекурсори потім транспортуються до підкладки або мішені за допомогою газу-носія, який може бути інертним або брати участь у самому процесі синтезу. [10].

Цей метод відрізняється великою гнучкістю, оскільки дозволяє використовувати різноманітні речовини-прекурсори та умови реакції для отримання різних видів покриттів з різними властивостями. Також він ефективний для масштабування виробництва, що робить його популярним в промисловості та наукових дослідженнях.

Процес осадження відбувається в спеціальній камері, де знижений тиск створюється за допомогою хімічних реакцій відновлення, піролізу або диспропорціонування. У багатьох випадках використовуються реакції між основним газоподібним реагентом та додатковими сполуками (речовинами-прекурсорами). Найпоширенішими з них є карбоніли, галогени та металоорганічні сполуки[10].

Наприклад, галогеніди металів відновлюються воднем до металу з утворенням сполуки галогенів з воднем, а карбоніли, за допомогою реакції піролізу, розкладаються на метал та окис вуглецю. Хімічні реакції зазвичай оптимально протікають при температурах від 500 до 1500 градусів Цельсія. Тому деталі, що підлягають обробці, нагріваються до таких температур, щоб забезпечити локалізацію хімічної реакції біля їхньої поверхні.

Утворення покриття відбувається шляхом послідовного нашарування матеріалу, що осаджується. Цей метод дозволяє отримувати покриття товщиною від 1 до 20 мікрометрів зі швидкістю від 0,01 до 0,1 мікрометра на хвилину. Використання такого методу забезпечує отримання покриттів із заданими

властивостями та відмінною адгезією, що робить його популярним у виробництві та дослідницьких дослідженнях[11].

Цей метод широко застосовується в індустрії напівпровідників для створення тонких епітаксійних шарів.

Однак основним недоліком методу CVD є необхідність нагрівання деталей до високих температур. Це може негативно впливати на механічні властивості та структуру підкладки, а також призводити до додаткових проблем при отриманні наноструктурного стану самого покриття.

1.3.2 Метод літографії

Літографія, буквально перекладаючись з грецької, означає «малюю на камені». Це метод плоского друку, в якому для виготовлення форми використовується літографський камінь з нанесеним на нього малюнком.

У мікроелектроніці термін "літографія" відноситься до різних методів мікрогравірування діелектричних, металевих та напівпровідникових шарів, які використовуються при виготовленні інтегральних мікросхем. Мінімальні розміри елементів інтегральних мікросхем визначаються переважно літографічними процесами. Ця галузь технології постійно розвивається, щоб відповідати зростаючим вимогам мікро- та наноелектроніки.

На сьогоднішній день основним методом в технології інтегральних мікросхем є фотолітографія - фотохімічний метод мікрогравірування. Фотолітографія використовує світлочутливі полімери та ультрафіолетове світло для створення шаблонів, які потім використовуються для виготовлення мікроелементів на поверхні мікросхеми.

Фотолітографія в основному полягає у використанні фотошаблону (маски), яке проектується на поверхню фоторезиста за допомогою спеціальної оптичної системи. Основним завданням фотолітографії є створення мікрометричних або

нанометричних візерунків на поверхні підкладки для подальшого виготовлення інтегральних схем (рис. 1.3)[12].

Роздільна здатність методу фотолітографії визначається числом ліній N однакової ширини, розділених проміжками тієї ж ширини, яку можна отримати на 1 мм поверхні. Проте фотолітографія має фізичну межу роздільної здатності, яка визначається дифракційним критерієм Релея. Цей критерій означає, що зображення двох близько розташованих точок буде видно окремо, якщо відстань між ними перевищує певну мінімальну величину. Для оптичного випромінювання з довжиною хвилі λ ця межа становить приблизно 120 нм.

Отже, хоча фотолітографія є потужним і широко використовуваним методом для виготовлення мікроелементів, її роздільна здатність обмежена фізичними принципами, такими як дифракція світла.

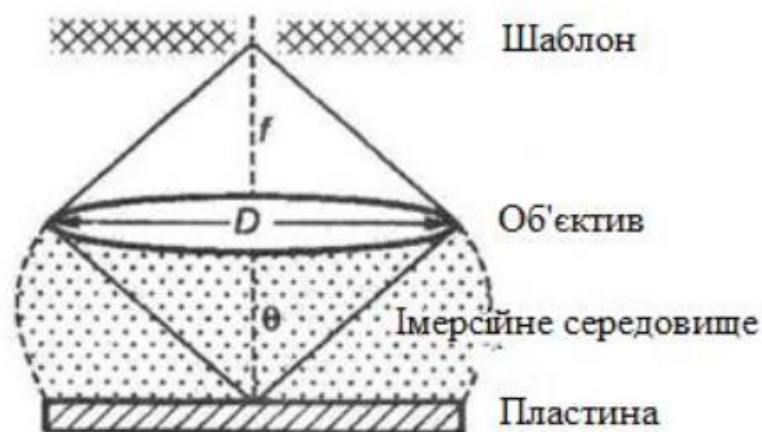


Рисунок 1.3 Взаємне розташування елементів проекційної системи фотолітографії[12]

Вакуумне ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі від 10 до 50 нм використовується для виготовлення мікропроцесорних інтегральних мікросхем надвисокого рівня інтеграції, що можуть містити від 10^8 до 10^{10} елементів на кристалі, і забезпечує роздільну здатність приблизно 20 нм[12].

Окрім оптичної літографії, для виготовлення мікроелементів використовуються інші методи залежно від джерела випромінювання, такі як рентгенолітографія, електронолітографія та іонолітографія. Ці методи відрізняються застосуванням різних видів випромінювання та механізмами формування мікроструктур.

Рентгенолітографія, наприклад, дозволяє досягати роздільної здатності до 15 нм за умови використання джерела випромінювання з довжиною хвилі 1 нм.

Електронно-променева літографія використовує пучок електронів для побудови рисунка. Це послідовний процес, що відрізняється від фотолітографії, де рисунок наноситься одночасно на всю поверхню.

Нанолітографія, або літографія на нанометровому масштабі, включає в себе нанесення малюнка на підкладку, один з розмірів якого лежить в нанодіапазоні до 100 нм. Цей метод стає все більш важливим у сучасних технологіях, оскільки дозволяє виготовляти наноматеріали та наноструктури з високою точністю.

1.3.3 Лазерний метод

Глибоке використання лазерної технології полягає у її здатності обробляти поверхню матеріалів з високою точністю та контролем. Зокрема, застосування імпульсного лазерного випромінювання з великою густиною енергії, у діапазоні від 10^3 до 10^{10} Вт/см², та коротким часом імпульсу, від 10^{-2} до 10^{-9} секунди, дозволяє досягти наноструктурного стану у тонких поверхневих шарах металевих матеріалів або виробів, виготовлених за традиційними технологіями[13].

У деяких випадках також використовується неперервне випромінювання CO₂-лазерів з густиною енергії від 10^5 до 10^7 Вт/см². Швидкості сканування променю лазера такі, що забезпечують час взаємодії матеріалу з випромінюванням від 10^{-3} до 10^{-8} секунди. Ці методи дозволяють досягти високої точності та контролю під час обробки матеріалів, що відкриває широкі можливості для застосування у різних галузях, від металургії до медицини.

Під впливом лазерного опромінення товщина поверхневого шару матеріалу, яка може коливатися від 0,1 до 100 мікрометрів, швидко розплавляється, а потім знову стає твердим з великими швидкостями охолодження, що досягають від 10^4 до 10^8 градусів за секунду. Це призводить до того, що основна маса матеріалу залишається холодною через короткий час термічного впливу, що забезпечує високу ефективність тепловідведення. Високі швидкості охолодження дозволяють отримувати нанокристалічну або навіть аморфну структуру. У випадку аморфної структури нанокристалічний стан може бути досягнутий шляхом проведення додаткового контрольованого процесу кристалізації під час термообробки[14].

Лазерне легування або лазерна імплантація пов'язані з додатковим введенням легуючих речовин у розплавлений поверхневий шар. Це може здійснюватися або шляхом нанесення тонкої плівки легуючої речовини перед опроміненням, або через інжекцію частинок порошку (включаючи наночастинки) у струмені газу в зону впливу лазерного випромінювання[14].

Легування, зазвичай, має дві основні мети:

1. Формування модифікованого шару: Ця ціль передбачає утворення на поверхні матеріалу шару зі зміненим хімічним складом та, відповідно, властивостями. Це може бути досягнуто шляхом введення легуючих речовин під час опромінення лазером. Результатом може бути покращення таких властивостей, як міцність, зносостійкість, корозійна стійкість або провідність.

2. Полегшення формування наноструктурного або аморфного стану: Ця ціль стосується отримання специфічної структури матеріалу внаслідок швидкого охолодження розплавленого поверхневого шару. Лазерне опромінення сприяє швидкому розплавленню та охолодженню, що дозволяє отримувати наноструктурні або аморфні структури, що відрізняються від кристалічних форм та можуть мати певні властивості, корисні для конкретних застосувань.

РОЗДІЛ 2. НАНОСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ У СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

2.1 Застосування наноструктур на основі двовимірних матеріалів у сучасній електроніці

Дослідження та застосування двовимірних наноматеріалів відкривають широкі перспективи для інновацій у різних галузях, включаючи електроніку, фотоніку, сенсоріку, енергетику та біомедицину. Аналіз їх структури та властивостей за допомогою чисельного моделювання дозволяє краще розуміти їх потенціал і сприяє розробці нових пристроїв з покращеними характеристиками. Графен, основний представник двовимірних матеріалів, стає основою для створення наноструктур[15]. Розглянемо галузі в яких він використовується.

Графен використовується для створення польових транзисторів, що дозволяє створювати електронні пристрої меншого розміру, не втрачаючи при цьому їхніх властивостей. ІВМ вже розробляє інтегральні схеми на основі транзисторів з графену, які мають здатність працювати при високих температурах до 128 градусів Цельсія.

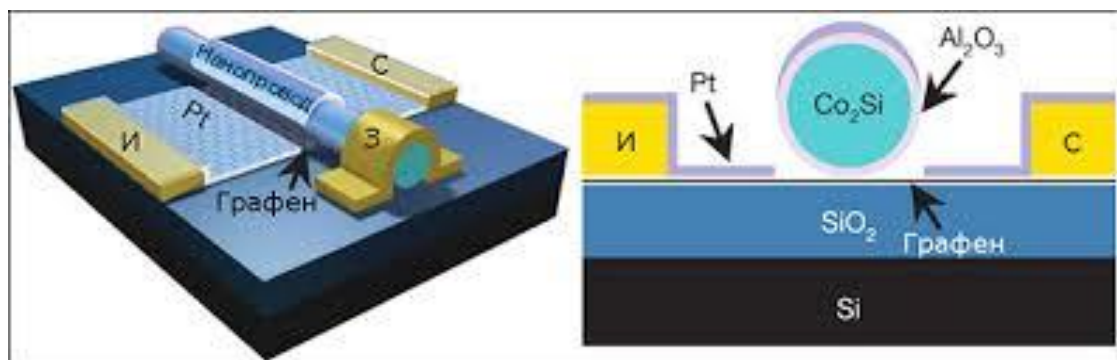


Рисунок 2.1 Транзистор на основі графена[15]

Графен, з його унікальними властивостями, стає ключовим матеріалом у розвитку гнучкої електроніки. Особливо цікавим є використання графену для

створення гнучких дисплеїв, оскільки існуючі методи, такі як використання оксиду індію-олова, мають обмеження у вартості та міцності. Графен, натомість, є більш доступним та міцним матеріалом[15].

Створення гнучких LED-дисплеїв на базі графену, яке було здійснене співробітниками Манчестерського університету, є значним кроком у напрямку розвитку енергоефективних електронних пристроїв. Винахідники використали комбінацію різних двовимірних кристалів для створення дисплею, який може випромінювати світло над усією поверхнею та має товщину від 10 до 40 атомів. Це відкриває шлях для створення першого покоління напівпрозорих розумних пристроїв, які можуть знайти застосування в різних галузях, включаючи оптоелектроніку[18,20].



Рисунок 2.2 Гнучкий дисплей[18]

Дослідники Масачусетського технологічного інституту розробили чип на базі графену, призначений для використання у технології теплового зображення. Цей чип може бути використаний для створення компактних сенсорів, які можуть вміщуватися у смартфони, ноутбуки чи планшети. Графен, який є чутливим до інфрачервоного випромінювання, дозволяє використовувати цей чип без потреби у спеціалізованих системах охолодження. Ізоляція чипу від інших частин приладу

забезпечується також за допомогою графену, що підвищує його ефективність та зручність у використанні[20].

Більш того, графен може бути використаний для покращення ємності батарей та акумуляторів, а також для створення батарей та суперконденсаторів з більшою ємністю, ніж існуючі на ринку аналоги. Інноваційні методи вирощування графенових структур дозволяють досягти оптимальної структури для покращення їхніх характеристик[19].

Розвиток технології графену відкриває безліч перспективних можливостей у виробництві електроніки та інших галузях. Компанія Samsung веде дослідження з метою поліпшення виробництва графену, що може призвести до створення електроніки нано- та мікророзмірів[20].

Одним із напрямків використання графену є його застосування у створенні гнучких сенсорних дисплеїв та комп'ютерів. Це може відкрити двері для розвитку нових технологій у сферах мобільних телефонів, телевізорів та навіть літальних апаратів, забезпечуючи надшвидкий Інтернет та полегшені конструкції. Вперше гнучкий пристрій на базі транзисторів, розроблений Кембріджським центром графену та Plastic Logic, використовує графенові електроди, що замінюють металеві шари електродів.

Графен демонструє переваги перед іншими матеріалами, такими як оксид індія-олово, маючи більшу гнучкість і прозорість. Це відкриває можливості для виробництва тонких, гнучких дисплеїв, що можуть застосовуватись в різних пристроях, включаючи смартфони[23].

У Белгородському університеті в Сербії також була проведена інноваційна розробка, вперше в світі виготовлено багат шарову мембрану конденсаторного мікрофону з застосуванням графену. Це призвело до значного підвищення чутливості мікрофону порівняно з традиційними рішеннями на основі нікелевих мембран. Використання графену у мембрані сприяє поєднанню невеликої ваги з високою гнучкістю та міцністю, що робить цей матеріал ідеальним для акустичних пристроїв[24].

Усі ці розвідки і винаходи свідчать про потенційність графену у сфері електроніки та матеріалознавства, відкриваючи нові можливості для створення ефективних та інноваційних технологій.

2.2 Технології виготовлення наноструктур: зверху – вниз та знизу – вгору

Синтез наноматеріалів на основі графену відкриває широкі можливості для інновацій у багатьох галузях, від електроніки до медицини. З моменту мікромеханічного розпаду в 1999 році інтенсивно проводилися дослідження з метою виробництва графену. Однак для досягнення цілей важливо розробити ефективні методи синтезу наночастинок графену з контрольованими параметрами, такими як розмір, товщина та форма[25].

На сьогоднішній день існують два основних підходи до виробництва графену з різних джерел вуглецю: "зверху вниз" і "знизу вгору". Підходи "зверху вниз" передбачають використання великих вихідних матеріалів, які згортають або розщеплюються до графену. З іншого боку, методи "знизу вгору" включають синтез графену з молекулярних або атомарних структур шляхом їх росту чи депонування на підкладку.

Принцип технології "зверху-вниз" передбачає зменшення розмірів фізичних об'єктів для отримання структур з нанорозмірними параметрами. Це досягається шляхом руйнування великих частинок чи зерен на менші структурні складові. Цей процес може бути реалізований через механічне подрібнення, інтенсивну пластичну деформацію, опромінення високими дозами та інші методи[14].

Технологічний підхід "зверху-вниз" є методом виготовлення мікро- та наноструктур, що базується на зменшенні розмірів вихідних матеріалів через їх фрагментацію за допомогою механічної або іншої обробки. Суть цього підходу полягає в створенні структур з необхідними розмірами та формою шляхом вибіркового видалення матеріалу, який раніше був нанесений на підкладку(рис. 2.1).

Основні етапи цього процесу включають:

1. Нанесення плівок: Спочатку на підкладку наносять тонкий шар матеріалу, який буде використовуватись для створення необхідних структур.
2. Формування легованих шарів: Підкладку можуть обробляти для створення легованих областей, що змінюють електричні властивості матеріалу.
3. Літографія: На поверхню наносять фоточутливий матеріал (фоторезист), на якому за допомогою світлового випромінювання створюють бажаний візерунок. Це досягається використанням масок, які блокують світло в певних областях.
4. Травлення: Після експонування та проявлення фоторезисту матеріал підкладки вибірково видаляють у відкритих областях, створених за допомогою літографії. Це можна зробити за допомогою хімічного травлення або інших методів видалення матеріалу.

Цей процес можна порівняти з різьбленням скульптури з монолітної кам'яної брили, де зайвий матеріал відсікається, щоб створити кінцеву форму.

Розвиток технологій мікромініатюризації та мікротехнологій є важливим напрямом у сучасній науці та техніці. Ці технології дозволяють виготовляти електронні пристрої та компоненти з нанометровою точністю. Вони знаходять широке застосування в різних галузях, таких як:

1. Електроніка: Виробництво мікропроцесорів та інтегральних схем.
2. Медицина: Створення мікро- та наноелектромеханічних систем (MEMS та NEMS) для діагностики та лікування.
3. Комунікації: Розробка високочастотних та оптичних компонентів для телекомунікаційних систем.

Таким чином, розвиток технологій мікромініатюризації на основі підходу "зверху-вниз" відкриває широкі перспективи для розвитку сучасних технологій та їх застосування у різних сферах життя.



Рисунок 2.3 Технологія зверху-вниз[11]

Подальший розвиток технологічного підходу «зверху-вниз» призвів до значного прориву — від мікрообробки до нанообробки, дозволяючи створювати вироби з нанометровими параметрами. Цей перехід став можливим завдяки вдосконаленню існуючих методів та впровадженню інноваційних технологій, що забезпечують роботу на нанометровому рівні з високою точністю[11].

Одним із ключових факторів, що сприяли цьому прогресу, є використання скануючих зондових мікроскопів (Scanning Probe Microscopes, SPM). Ці інструменти забезпечили суттєве просування технологій «зверху-вниз» завдяки можливості нанолокалізації хімічних процесів обробки матеріалів. До таких процесів належать: нанолокальне окислення поверхні, нанолокальне осадження речовини.

Таким чином, скануючі зонди стали важливим інструментом у вдосконаленні технологічного підходу «зверху-вниз», забезпечуючи високу точність і контроль на нанометровому рівні. Це дозволило значно розширити можливості нанотехнологій і сприяло розвитку нових застосувань у різних галузях науки та техніки.

Технологія "знизу-вгору" полягає в тому, що нанооб'єкти створюються шляхом збирання окремих атомів або молекул у більш крупні структури. Цей підхід передбачає формування необхідних структур за допомогою селективного осадження атомів або молекул на визначені ділянки поверхні підкладки, схоже до того, як художник наносить фарбу на полотно, щоб створити зображення.

Цей механізм реалізується через процеси, пов'язані з формуванням і ростом нової фази. Наприклад, методи випаровування-конденсації передбачають випаровування матеріалу з джерела і його конденсацію на підкладці. Іншим підходом є хімічне осадження, де речовини осідають з розчину на підкладці. Також використовуються окислювально-відновлювальні процеси, які включають реакції окиснення та відновлення для створення потрібних структур[11].

Технологія "знизу-вгору" відіграє ключову роль у створенні наноматеріалів і наноструктур, оскільки дозволяє точно контролювати їх розміри, форми та властивості. Це має велике значення для різноманітних застосувань, від електроніки до біомедицини.

Технологічний підхід "знизу-вгору" можна розглядати як "зворотній" в порівнянні з підходом "зверху-вниз". Він полягає в створенні виробів шляхом їх складання безпосередньо з окремих атомів або молекул, а також елементарних атомно-молекулярних блоків, структурних фрагментів біологічних клітин тощо. Цей підхід також відомий як атомна інженерія[13].

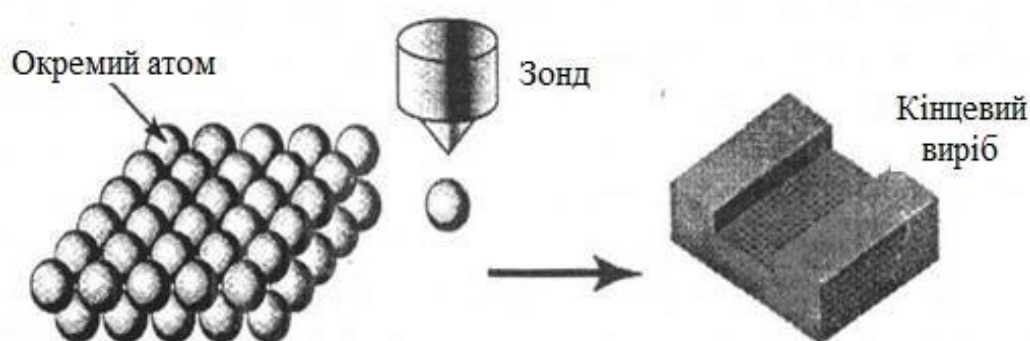


Рисунок 2.4 Технологія «знизу – вгору»[11]

Практична реалізація технології "знизу-вгору" стала можливою завдяки розвитку техніки зондової мікроскопії, яка дозволила не лише спостерігати нанооб'єкти з атомною роздільною здатністю, але й маніпулювати окремими атомами та молекулами, створюючи з них різноманітні просторові конфігурації.

Один з типових прикладів реалізації таких технологій - поштучне укладання атомів на кристалічній поверхні за допомогою скануючих зондів. Це дозволяє наносити не лише окремі атоми, а й шари атомів, відкриваючи шлях до створення складних наноструктур з бажаними властивостями та функціональністю.

Справді, техніка, яка базується на використанні скануючих зондів, дозволяє проводити маніпуляції на рівні окремих атомів і молекул, що відкриває безліч можливостей для створення нових матеріалів та пристроїв з унікальними властивостями. Проте, ці методи часто характеризуються низькою продуктивністю та високою вартістю, що обмежує їх широке застосування в промисловості та наукових дослідженнях[14].

Процес збирання нової фази з окремих атомів, незважаючи на різноманіття існуючих методів отримання наносередовищ, включає дві основні стадії: утворення зародків нової фази та їх подальше зростання. Ці стадії можуть бути складними і вимагати досконалого контролю параметрів процесу для отримання бажаних результатів. Однак, із розвитком нових технологій та методів, таких як молекулярна самоорганізація та масштабування процесів, можливості в цій області постійно розширюються, що відкриває нові перспективи для створення наноматеріалів та наноструктур з унікальними властивостями.

2.3. Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур

Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур є ключовим напрямком сучасної науки. Використання електронної мікроскопії є важливим інструментом для цієї мети, оскільки цей метод надає можливість отримати детальну інформацію про розміри частинок, їхню структуру та взаємодію.

Різні типи електронної мікроскопії використовують різні принципи дії, що дозволяє досліджувати об'єкти на різних масштабах та з високою роздільною здатністю. Розглянемо декілька видів.

2.3.1 Просвічуюча електронна мікроскопія

Просвічуюча електронна мікроскопія відкриває перед науковцями безмежні можливості: у її об'єктиві не просто матеріали та структури, а справжній світ нанорозмірів. Цей метод дозволяє одночасно відобразити деталі з вражаючою роздільною здатністю та розгорнути перед нами мікрокосмічні візерунки, що розкривають складну внутрішню будову матеріалів.

На рисунку 2.5 представлена фотографія мікроскопа JEM-2100F, який є відмінним зразком новітньої електронної технології. Його основна перевага - використання електронної гармати з польовою емісією катода (FEG), що гарантує пучок високої яскравості, значно перевершуючи за яскравістю традиційні катоди, такі як гексаборид лантану (LaB₆), у сто разів. Крім того, мікроскоп обладнаний безліччю додаткових функцій, включаючи високочутливе сканування електронним пучком (STEM), систему аналізу втрат енергії електронів (EELS) та енергодисперсійний спектрометр рентгенівського випромінювання, що надає зручний спосіб збору великого обсягу даних. Управління та відображення інформації в мікроскопі автоматизовані, що робить його використання набагато зручнішим[25].

Система енергодисперсійного спектрометра має новітній детектор, який підвищує чутливість аналізу низькоенергетичних областей у три рази порівняно з попередніми моделями EPC JEOL. Крім того, мікроскоп володіє системою для побудови тривимірних зображень, яка отримує зображення шар за шаром, а потім за допомогою комп'ютерної програми реконструює тривимірне зображення з можливістю огляду з різних сторін. Роздільна здатність мікроскопа становить 0,19 нм за точками та 0,1 нм за лініями[25].

Сучасні просвічуючі електронні мікроскопи забезпечують роздільну здатність до 0,1 нм і розмір ділянки, з якої отримується мікродифракційна картина, до 50 нм. Цей метод дає можливість аналізувати будову матеріалу за отриманим

зображенням та визначати тип кристалічної ґратки за мікродифракційною картинкою.



Рисунок 2.5 Фотографія просвічуючого електронного мікроскопа з термопольовою емісією JEM - 2100F (виробник JOEL Ltd, Японія)[25]

Мікроскопи з дуже вузьким променем дозволяють проводити локальний хімічний аналіз матеріалу за спектром енергетичних втрат електронів, що пройшли через об'єкт дослідження, включаючи аналіз стосовно легких елементів, таких як бор, вуглець, кисень та азот.

2.3.2 Іонно-польова мікроскопія

Іонно-польова мікроскопія - це ще один метод, що надає роздільну здатність, наближену до міжатомних відстаней. У цій техніці на металеву голку з гострим кінчиком, що розташовується у камері з високим вакуумом, надається позитивний

потенціал. Це створює досить велике електричне поле та його градієнт поблизу кінчика голки. Таке поле дозволяє іонізувати залишкові молекули газу, які наближаються до голки, передаючи електрони голці і, отримуючи позитивний заряд.

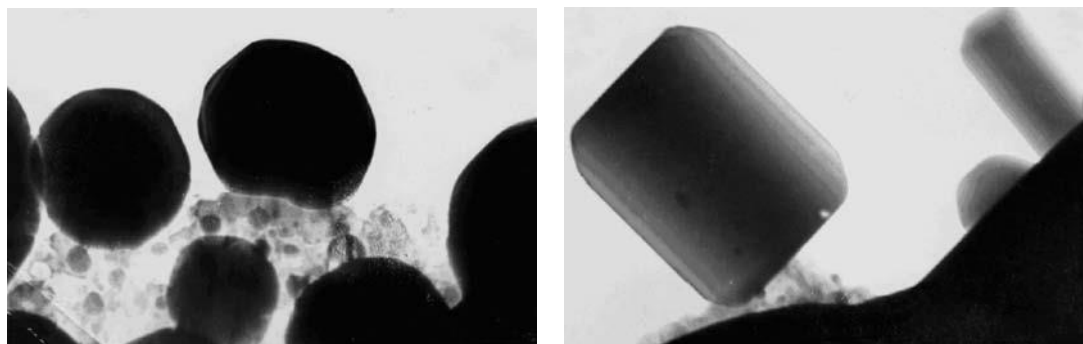


Рисунок 2.6 Електронно-мікроскопічний знімок змінювання профілю частинок Co на підкладинці Al_2O_3 : а – вище граничної температури T_g ; б – нижче граничної температури T_g [25]

Ці іонізовані газоподібні катіони відштовхуються голкою і рухаються від неї уздовж ліній електростатичного поля до розташованої поблизу фотопластини. При зіткненні з фотопластиною вони утворюють засвічені точки. Кожна з цих точок на пластині відповідає атому, який знаходиться на кінчику голки. Таким чином, розподіл цих точок на фотопластині утворює сильно збільшене зображення розподілу атомів на кінчику голки[25]

2.3.2 Скануючий тунельний мікроскоп

Скануючий тунельний мікроскоп використовує голку з надзвичайно тонким кінчиком як зонд. Цей кінчик з'єднаний з позитивним полюсом джерела напруги і приближений до поверхні зразка на відстань близько 1 нм. Електрони, що належать окремим атомам на поверхні зразка, притягуються до позитивно зарядженого кінчика і тунелюють на нього, утворюючи слабкий електричний струм[20].

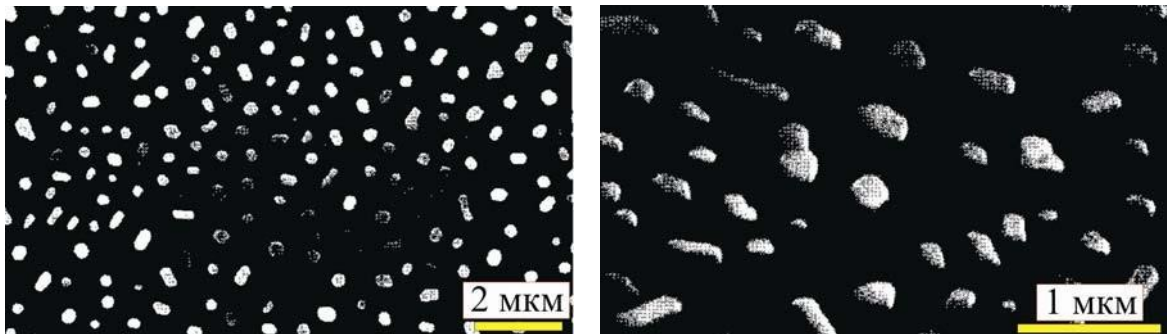


Рисунок 2.7 Зображення плівок Au товщиною 120 Å, отриманих скануючою електронною мікроскопією: а – при нормальному падінні пучка; б – під кутом 45° [25]

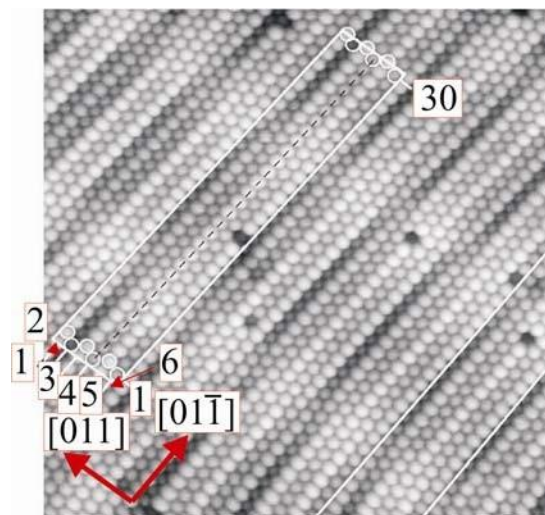


Рисунок 2.8 СТМ-зображення квазігексагональної реконструйованої поверхні Pt (100)[25]

Метод скануючої тунельної мікроскопії має обмеження, пов'язані з необхідністю електропровідності матеріалу зразка та вимогою до вакууму і температури. Однак для досягнення високої роздільної здатності у діапазоні близько 1 нм ці обмеження не є обов'язковими. На рисунку 2.8 зображена фотографія квазігексагональної реконструйованої поверхні Pt (100), де елементарна комірка суперструктури містить понад 30 атомів у напрямі [011] і шість атомів у напрямі [011̄].

2.4 Визначення розміру наночастинок та побудова гістограми при аналізі мікрознімків

Для визначення розміру наночастинок я скористався програмою ImageJ JS. Завантаживши в програму знімки з мікроскопа, які ми зробили на кафедрі електроніки та інформаційних технологій.

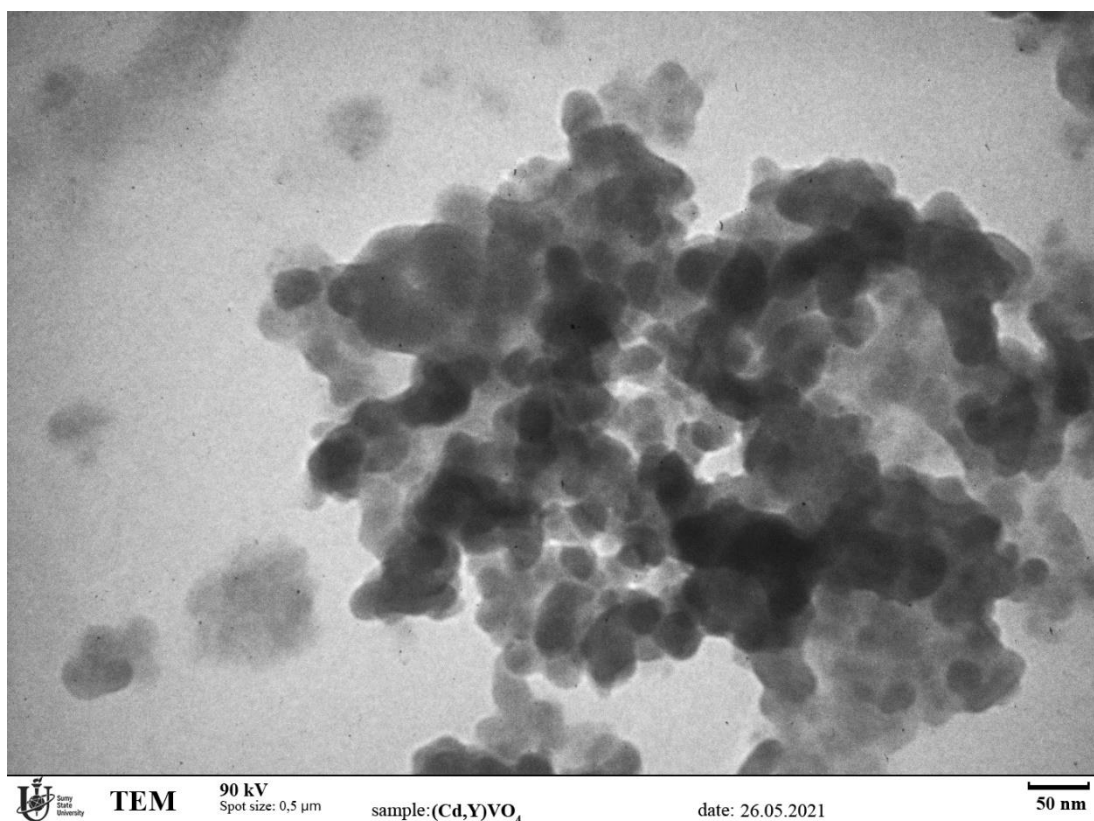


Рисунок 2.9 Знімок з мікроскопа матеріалу $(\text{Cd},\text{Y})\text{VO}_4$

Провевши заміри зі знімків наночастинок в програмі ImageJ JS, дізнаємось статистичні дані: N – кількість вимірювань; Mean – середнє, Mode – найбільш ймовірне; min, max – мінімальне та максимальне значення розміру наночастинок. Та можемо побудувати гістограм (рис.2.10)

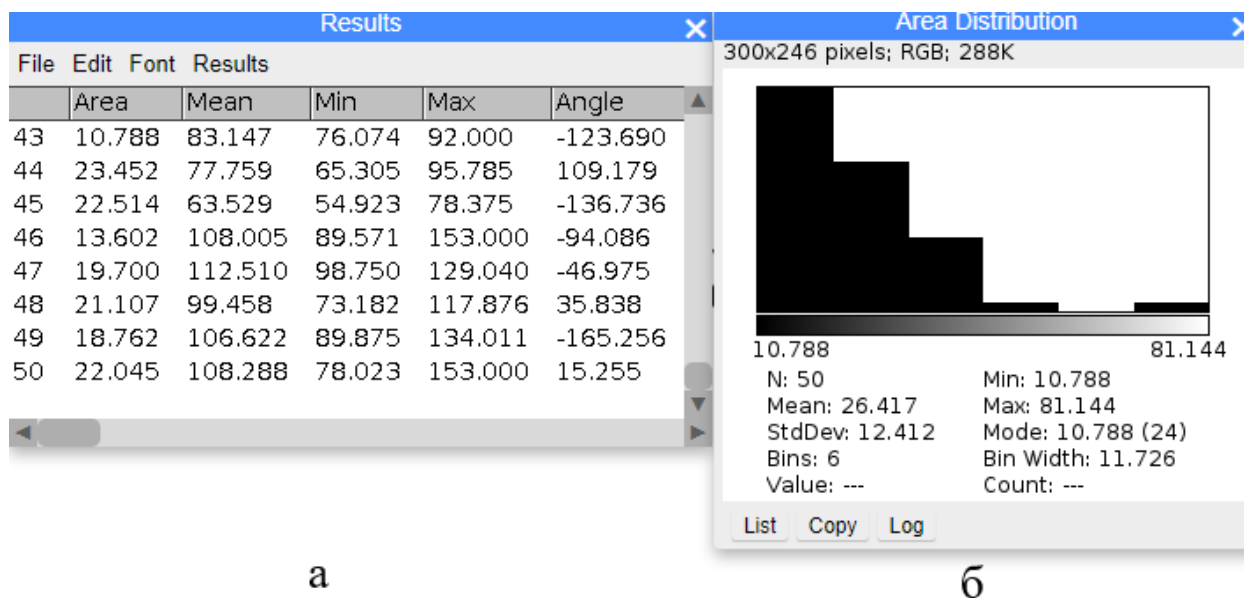


Рисунок 2.10 а) Результати вимірів наночастинок $(\text{Cd,Y})\text{VO}_4$, б) гістограма CsPbBr_3

Проаналізувавши результати вимірювань, можемо зробити висновки, що в матеріалі $(\text{Cd,Y})\text{VO}_4$ було проведено $N=50$ вимірювань: $\text{Min}=10,8$ нм, $\text{Max}=81,1$ нм, $\text{Mean}=26,4$ нм, $\text{Mode}=10,8$ нм.

Аналогічно проводимо вимірювання на другому знімку.

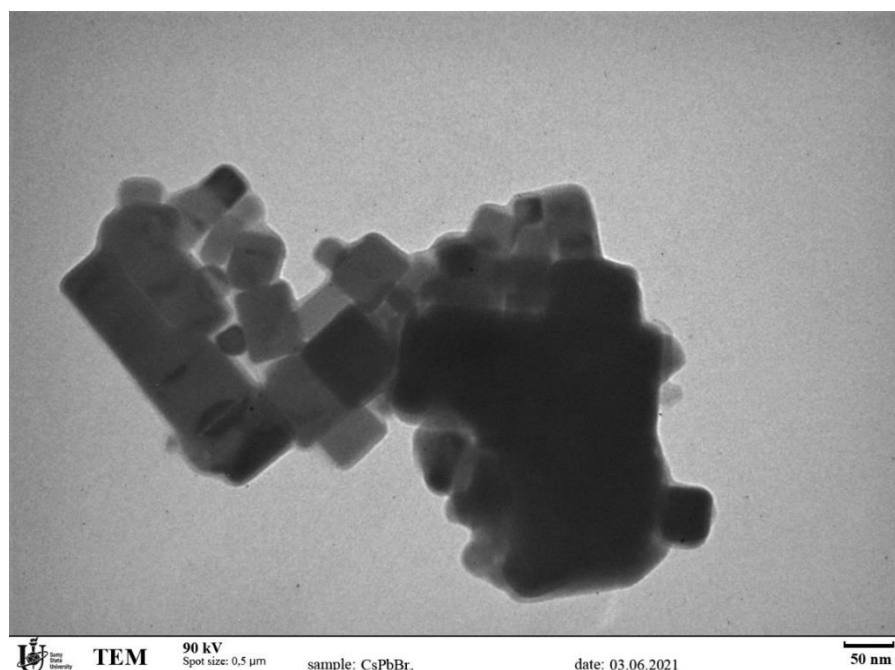
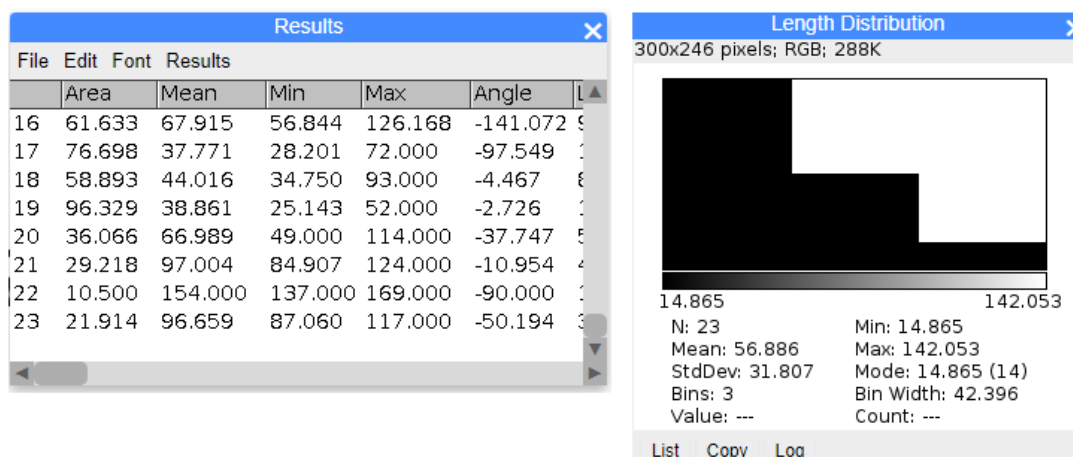


Рисунок 2.11 Знімок з мікроскопа матеріалу CsPbBr_3



а

б

Рисунок 2.12 а) Результати вимірів наночастинок CsPbBr_3 , б) гістограма CsPbBr_3

Проаналізувавши результати вимірювань, можемо зробити висновки, що в матеріалі CsPbBr_3 було проведено $N=23$ вимірювань: $\text{Min}=14,9$ нм, $\text{Max}=142$ нм, $\text{Mean}=56,9$ нм, $\text{Mode}=14,9$ нм.

У даному розділі було проведено вимірювання наночастинок таких матеріалів, як $(\text{Cd},\text{Y})\text{VO}_4$ та CsPbBr_3 , за допомогою програми ImageJ JS, яка використовується для аналізу наноматеріалів. Завдяки використанню цієї програми, було отримано значну кількість статистичних даних щодо розміру наночастинок, таких як максимальний, мінімальний, середній та найбільш ймовірний розмір. Крім того, побудовано гістограми на основі зібраних даних, що сприяло більш глибокому аналізу та порівнянню результатів. Отже, використання програми ImageJ JS значно полегшило процес аналізу наноматеріалів і дозволило отримати вичерпну інформацію для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 3. ТРАНЗИСТОРИ НА ОСНОВІ ДВОВИМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Параметри двовимірних польових транзисторів

Двовимірні польові транзистори вирізняються своєю незвичайною конструкцією в порівнянні з традиційними тривимірними MOSFET-транзисторами. Вони складаються з тонких шарів матеріалів, таких як графен, перовскітні сполуки та інші двовимірні матеріали. Одним з найбільш значущих прикладів двовимірних транзисторів є графеновий польовий транзистор (Graphene Field-Effect Transistor, GFET), на якому зосередимо нашу увагу.

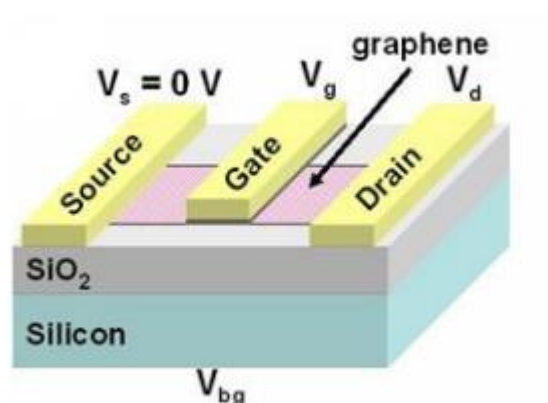


Рис. 3.1 Транзистор з графену (Graphene Field-Effect Transistor, GFET)[2]

Графен, що лежить в основі GFET, представляє собою один шар вуглецю з видатними електронними характеристиками, такими як висока мобільність електронів. Зазвичай графеновий шар розташовується на підкладці або ізоляційному шарі, що сприяє утворенню каналу транзистора. Верхня частина конструкції містить гейт (затвор), що регулює струм у графеновому каналі. Гейт зазвичай виготовляється з металу або діелектрика. Під шаром графену розташовані електроди витоку та стоку, через які проходить струм. Витік

забезпечує подачу електронів, тоді як стік приймає їх після проходження через канал.

Напруга, яка подається на гейт, дозволяє регулювати електронну провідність каналу. Зміна напруги на гейті призводить до зміни концентрації електронів у каналі, що, своєю чергою, впливає на струм, який проходить через транзистор.

Різноманітні двовимірні польові транзистори мають різні структури та конфігурації, залежно від матеріалу та призначення пристрою. Незважаючи на це, їх основний принцип роботи однаковий: створення каналу в тонкому шарі матеріалу та контроль його провідності за допомогою гейта. На рис. 3.1 показані типові параметри двовимірного польового транзистора. Структура такого транзистора включає металевий затвор, напівпровідниковий канал між витоком та стоком, та ізоляційний оксид затвора, який виступає бар'єром між каналом і затвором. Струм у каналі напівпровідника (струм стоку, I_D) залежить від напруги між джерелом і стоком (V_{DS}) і модулюється напругою на затворі (V_{GS}), що змінює провідність каналу[2].

Двовимірні польові транзистори, як-от транзистори на основі графену або перовскітних матеріалів, мають кілька важливих параметрів, що визначають їх ефективність та функціональні можливості:

1. Транзисторний коефіцієнт підсилення: показує залежність вихідного струму транзистора від вхідної напруги. Більше значення g_m свідчить про вищу ефективність транзистора.
2. Ефективна довжина каналу: відстань вздовж каналу, де відбувається перенесення заряду. Менша довжина забезпечує вищу швидкодію транзистора.
3. Насичена напруга стоку: напруга між стоком і джерелом транзистора, при якій канал досягає насиченого стану. Вища напруга стоку дозволяє досягти більшої вихідної потужності транзистора.
4. Максимальна густина струму: максимальна густина струму, яку транзистор може переносити через свій канал. Вища густина струму дає змогу транзистору працювати при високих потужностях.

5. Опір каналу: опір каналу транзистора, який впливає на втрати потужності та ефективність пристрою. Менший опір означає менші втрати потужності та кращу ефективність.

6. Порогова напруга: напруга, необхідна для ввімкнення транзистора та початку провідності у каналі. Цей параметр визначає вольт-амперну характеристику транзистора[2].

7. Розміри каналу і геометрія транзистора. Транзистори з ширшим каналом можуть забезпечувати більшу провідність і, відповідно, вищу швидкодію. Зменшення довжини каналу дозволяє досягти вищих частот роботи, але може призводити до збільшення витоків струму. Ширина гейта також важлива, оскільки впливає на здатність транзистора до ефективного керування струмом у каналі. Окрім цього, оптимізація геометрії транзистора може допомогти знизити енергоспоживання і поліпшити його загальну ефективність.

8. Швидкодія транзистора визначається часом, необхідним для відкриття та закриття каналу. Вищий рівень швидкодії дозволяє транзистору функціонувати на високих частотах, що є надзвичайно важливим для високопродуктивних електронних пристроїв[2].

9. Енергоспоживання (Power Consumption) визначає енергоефективність транзистора. Низьке енергоспоживання дозволяє зменшити витрати на електроенергію та підвищити загальну ефективність пристрою, що є критично важливим для мобільних та портативних гаджетів.

Двовимірні наноматеріали відкривають широкі перспективи для розвитку новітніх технологій та пристроїв у різних галузях, таких як електроніка, фотоніка, сенсорика, енергетика та біомедицина. Вивчення їх структури та властивостей за допомогою чисельного моделювання сприяє глибшому розумінню їхнього потенціалу і стимулює розробку інноваційних пристроїв з покращеними характеристиками. Моделювання допомагає дослідникам оптимізувати матеріали для конкретних застосувань, виявляти нові можливості для їх використання та вдосконалювати існуючі технології[2].

3.2. Моделювання транспорту носіїв у двовимірних транзисторах

У двовимірних польових транзисторах процес транспорту носіїв заряду в тонкому каналі, зробленому з двовимірних матеріалів, таких як графен або перовскітні структури, виявляється досить унікальним.[26-28] Тут ми маємо кілька ключових механізмів:

- Дифузія носіїв заряду, що відбувається вздовж каналу, схожа на те, що спостерігається в тривимірних транзисторах, де носії переміщуються від витoku до стоку під впливом градієнта концентрації.

- Взаємодія з розсіювачами також важлива: коли носії заряду зіштовхуються з фононами або дефектами в матеріалі, це може викликати втрату енергії та зміну їхнього напрямку.

- Квантові ефекти, такі як квантова точка, провідність та тунелювання, можуть виникати в двовимірних системах, що має важливе значення для транспорту носіїв заряду та створення спеціальних пристроїв.

- Електростатичне поле, яке генерується напругою на гейті, може змінювати концентрацію носіїв заряду і, відповідно, впливати на їхній рух вздовж каналу, що надає можливість контролювати електронну провідність каналу.

Ці механізми взаємодіють між собою та піддаються регулюванню різними параметрами, такими як напруга на гейті, конфігурація транзистора та властивості матеріалу. Вплив цих факторів формує транспорт носіїв заряду в двовимірних польових транзисторах, що визначає їхні характеристики та функціональні можливості.

Для математичного опису транспорту носіїв заряду в двовимірних польових транзисторах застосовуються різні транспортні моделі. Однією з найпоширеніших є дрейф-дифузійна модель, що ґрунтується на комбінації дрейфу носіїв заряду під впливом електричного поля та їх дифузії через градієнт концентрації. Ця модель

використовує рівняння неперервності для математичного опису зміни концентрації носіїв заряду в каналі транзистора[27-28].

Цей підхід дозволяє достатньо точно визначити особливості та механізми перенесення заряду в двовимірних польових транзисторах, що є ключовим для розуміння та розробки ефективних електронних пристроїв на їхній основі. Дослідження цих механізмів допомагає покращити розуміння процесів, які відбуваються в транзисторах, та сприяє розвитку нових технологій у сфері електроніки.

$$J_n = qD_n \nabla n - qn\mu_n \nabla \psi - \mu_n n (kT \nabla (\ln n_{ie})), \quad (3.1)$$

$$J_p = -qD_p \nabla p - qp\mu_p \nabla \psi + \mu_p p (kT \nabla (\ln n_{ie})), \quad (3.2)$$

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

Модель Больцмана та енергетичних зон використовує статистичну механіку для опису розподілу електронів та дірок у енергетичних зонах матеріалу. Ця модель, названа на честь фізика Людвіга Больцмана, дозволяє розрахувати розподіл носіїв заряду в матеріалі, враховуючи ефекти розсіювання та взаємодію з дефектами та фононами[27-28].

Статистика Больцмана використовується для обчислення коефіцієнта дифузії, який визначає швидкість руху носіїв заряду в матеріалі.

$$D = \frac{kT_L}{q} M, \quad (3.3)$$

де k , T_L – постійна Больцмана, температура решітки

Поряд з моделлю Больцмана, важливу роль у фізичному описі матеріалів відіграє також статистика Фермі-Дірака (ФД). Ця статистика використовується для опису розподілу електронів у зоні провідності матеріалу та інших параметрів, пов'язаних з енергією електронів (F_α , ε_c , ε_{Fn} , ϕ_n та n_{ie} – інтеграл ФД порядку α , енергія зони провідності, квазірівень Фермі, квазіпотенціал Фермі та ефективна концентрація власних носіїв)[27-28].

$$D = \frac{\left(\frac{kT_L m_n}{q}\right) F_{1/2} \left\{ \frac{1}{kT_L} [e_{Fn} - e_c] \right\}}{F_{-1/2} \left\{ \frac{1}{kT_L} [e_{Fn} - e_c] \right\}} \quad (3.4)$$

$$e_{Fn} = -q\phi_n = -\frac{kT_L}{q} \ln\left(\frac{n}{n_{ie}}\right), \quad (3.5)$$

Модель Ландавера-Буттікера є важливим інструментом у теоретичному описі транспорту носіїв заряду через бар'єрні структури, такі як підкладка або діелектричний шар[27-28].

$$I_{DS}(V_{DS}, V_{GS}) = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} \{T(E, V_{DS}, V_{GS}) [f_S(E - E_{FS})] - [E - E_{FD}]\} dE, \quad (3.6)$$

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

Модель дискретних рівнів використовує квантову механіку для опису транспорту носіїв заряду через дискретні енергетичні рівні в двовимірних матеріалах. Ця модель дозволяє враховувати квантові ефекти, такі як квантова точка та квантова провідність.

Використання таких моделей дозволяє краще розуміти та передбачати роботу двовимірних польових транзисторів, а також допомагає у їхньому проектуванні. Вибір конкретної моделі залежить від конкретної ситуації та особливостей досліджуваного транзистора.

У класичній теорії рівняння Пуассона та рівняння безперервності використовуються для визначення параметрів, таких як густина струму носіїв, коефіцієнт генерації та рекомбінації. Дифузійно-дрейфові транспортні моделі зі статистикою Больцмана або Фермі-Дірака можуть бути використані для прогнозування робочих характеристик польових транзисторів. Застосування квантового потенціалу Бома допомагає подолати проблему короткоканальних ефектів[27-28].

Слід зазначити, що балістичні транзистори характеризуються власними модами енергетичних рівнів з контрольованими потенційними бар'єрами. Вони мають невелику область, відому як вікно Фермі, з балістичною провідністю. Струм у таких транзисторах визначається за концепцією Ландауера. Благодаря відсутності зворотного розсіювання, що призводить до збільшення довжини вільного пробігу до лінійних розмірів каналу, такі транзистори можуть мати відмінні характеристики[27-28].

Також виникає бар'єр Шоттки між металевим електродом і каналом, що раніше ускладнювало створення балістичних транзисторів. Однак застосування паладію як матеріалу для електродів дозволило подолати цю перешкоду, що сприяло розвитку та вдосконаленню балістичних транзисторів

3.3 Визначення характеристик транзисторів

Для моделювання та аналізу роботи транзисторів на основі двовимірних наноматеріалів широко використовуються чисельні розрахунки, які дозволяють визначити різні характеристики транзисторів[27-28]. Основні з них включають:

1. Вольт-амперна характеристика (ВАХ): Ця характеристика відображає залежність струму, який протікає через транзистор, від напруги, що прикладена до нього. Через чисельні розрахунки можна точно встановити цю залежність та виявити нелінійні ефекти, такі як насичення струму або тунельний пробій.

2. Фактор підсилення: Ця характеристика відображає співвідношення між вхідним і вихідним струмами транзистора. Вона використовується для визначення підсилення сигналу в транзисторних схемах. За допомогою чисельних розрахунків можна встановити значення фактора підсилення в залежності від різних параметрів транзистора, таких як розмір каналу або концентрація носіїв заряду.

3. Провідність: Ця характеристика відображає величину та підсилюючу здатність транзистора і характеризує залежність вихідного струму від вхідного сигналу. Через чисельні розрахунки можна встановити значення паралельної провідності в залежності від параметрів транзистора та умов роботи.

4. Коефіцієнт передачі потужності: Ця характеристика відображає співвідношення між вхідною та вихідною потужностями в транзисторі і характеризує ефективність підсилення сигналу. Чисельні розрахунки дозволяють визначити значення цього коефіцієнта в залежності від параметрів транзистора та умов роботи.

Для визначення цих характеристик використовуються чисельні методи, такі як метод скінченних елементів (МСЕ), метод скінченних різниць (МСР) або метод молекулярної динаміки (ММД). Ці методи дозволяють розв'язувати рівняння, що описують поведінку електронів та носіїв заряду в транзисторі. Результати чисельних розрахунків допомагають встановити взаємозв'язки між різними параметрами транзистора та його характеристиками, що дозволяє оптимізувати його проектування та покращувати ефективність[29].

За допомогою таких розрахункув проводилися чисельні експерименти для аналізу впливу різних параметрів на характеристики транзисторів на основі

двовимірних наноматеріалів. Досліджувалися такі параметри, як геометрія структури, концентрація носіїв заряду, ступінь однорідності матеріалу та інші. За допомогою отриманих результатів встановлюються оптимальні значення цих параметрів для досягнення найкращих електронних характеристик транзисторів[29]

ВИСНОВКИ

1. У даній кваліфікаційній роботі було проведено детальний огляд сучасного стану досліджень у галузі наноструктур для електроніки на основі двовимірних матеріалів. Наданий узагальнений погляд на методи отримання наноструктур, зокрема застосування хімічного осадження з газової фази (CVD), метод літографії та лазерний метод.

2. Розглянуто застосування наноструктур на основі двовимірних матеріалів у сучасній електроніці. Дослідження фізичних та електронних властивостей наноструктур, проведені за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії та скануючого тунельного мікроскопу.

3. Проаналізовано параметри двовимірних польових транзисторів. Зокрема, вони відзначаються високою швидкістю перенесення заряду, низькою споживаною енергією та здатністю до інтеграції на мікро- та наномасштабах. Ці характеристики роблять їх відмінними кандидатами для використання у високоефективних та енергоефективних пристроях, таких як мікропроцесори, сенсори, фотодетектори та інші.

4. Дослідження наноструктур на основі двовимірних матеріалів має великий потенціал для застосування в електроніці, а подальші дослідження у цій галузі можуть принести значний внесок у розвиток сучасних технологій.

5. В ході виконання кваліфікаційної магістерської роботи були проведені розрахунки, метою яких було вимірювання розмірів наночастинок та побудова гістограм матеріалів $(\text{Cd},\text{Y})\text{VO}_4$ та CsPbBr_3 за допомогою програми ImageJ JS. Визначено данні досліджуваних матеріалів $(\text{Cd},\text{Y})\text{VO}_4$: $\text{Min}=10,8$ нм, $\text{Max}=81,1$ нм, $\text{Mean}=26,4$ нм, $\text{Mode}=10,8$ нм та CsPbBr_3 : $\text{Min}=14,9$ нм, $\text{Max}=142$ нм, $\text{Mean}=56,9$ нм, $\text{Mode}=14,9$ нм. За зібраними даними побудовано гістограму.

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. Recent Advances in the Carrier Mobility of Two-Dimensional Materials: A Theoretical Perspective / S.H.Mir, V.K.Yadav, J. K.Singh // ACS Omega. – 2020. – V. 5. – P. 14203–14211.
3. Electrical characterization of 2D materials-based field-effect transistors / Sekhar Babu Mitta et al // 2D Mater. – 2021. – 8. – P. 012002.
4. 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.
5. Promises and prospects of two-dimensional transistors / Y. Liu, X. Duan, HJ. Shin et al. // Nature. – 2021. – V. 591. – P. 43–53.
6. Computational methods for 2D materials modeling / A Carvalho, P.E.Trevisanutto, S. Taioli et al. // Rep. Prog. Phys. –2021. – V.84. – P. 106501 (21pp).
7. 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.
8. Vertical MoS₂ transistors with sub-1-nm gate lengths / F. Wu, H. Tian, Y. Shen et al. // Nature. – 2022. – V. 603. – P. 259–264.
9. Low Voltage Operating 2D MoS₂ Ferroelectric Memory Transistor with Hf_{1-x}Zr_xO₂ Gate Structure / Zhang, S., Liu, Y., Zhou, J. et al. // Nanoscale Res Lett. – 2020. – V. 15. – P. 157 (9 pp).
10. Боровий М.О. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої / Боровий М.О., Куницький Ю.А., Каленик О.О., Овсієнко І.В., Цареградська Т.Л. – Київ: «Інтерсервіс», 2015. – 350 с.

11. Завражна О. М. Основи нанотехнологій.: навчально-методичний посібник для вчителів та студентів педагогічних університетів / О. М. Завражна, О. О. Пасько, А. І. Салтикова. – Суми: Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 184 с.

12. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці : підручник / І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – 2-ге вид., допов. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 169 с.

13. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.

14. Яблонь Л.С., Бойчук В.М. Фізичні основи нанотехнологій: Курс лекцій. – Івано-Франківськ, 2015. – 103 с

15. <https://web.archive.org/web/20160411021934/http://gadget.com/science/14677-что-такое-графен-i-chem-on-interesen/> Що таке графен і чим він цікавий. Дата доступу 15.05.2024

16. <https://web.archive.org/web/20160521201408/http://globalscience.ru/article/read/ua18798/> Графен змінить наше життя: практичне застосування графена в майбутньому. Дата доступу 15.05.2024

17. <https://web.archive.org/web/20160512093013/http://www.epravda.com.ua/news/2016/04/3/588023/> Сонячні батареї зможуть виробляти енергію від дощу. Дата доступу 15.05.2024

18. <https://web.archive.org/web/20160604071755/http://apple-news-android.ru/32190-vcheni-stvorili-gnuchkij-napivprozorij-led-displej.html> Вчені створили гнучкий напівпрозорий дисплей на основі графену. Дата доступу 15.05.2024

19. <https://web.archive.org/web/20160414051657/http://hi-news.ru/technology/grafen-vo-frityure-ili-texnologiya-kotoraya-pozvolit-sozdat-batarejki-budushhego.html> "Графен у Фрітюрі", або технологія, яка дозволить створювати батарейки майбутнього. Дата доступу 15.05.2024

20. <https://web.archive.org/web/20160530170614/http://hi-news.ru/technology/grafen-sdelaet-smartfony-samsung-tonkimi-legkimi-i-gibkimi.html>
Графен зробить смартфони Samsung тонкими, легкими та гнучкими. Дата доступу 15.05.2024
21. <https://web.archive.org/web/20160530175324/http://hi-news.ru/technology/parashyuty-budut-delat-iz-samogo-legkogo-materiala-v-mire.html>
Парашути робитимуть із найлегшого матеріалу у світі. Дата доступу 15.05.2024
22. <https://web.archive.org/web/20160504032732/http://hi-news.ru/technology/vpervye-proizveden-gibkij-displej-na-osnove-grafena.html> Вперше зроблений гнучкий дисплей на основі графену. Дата доступу 15.05.2024
23. <https://web.archive.org/web/20160405142511/http://lifehacker.ru/2015/10/22/v-ozhidanii-chuda-kak-grafen-izmenit-smartfony-i-nosimye-gadzhety/> В очікуванні дива: як графен змінить смартфони та гаджети, що носяться. Дата доступу 15.05.2024
24. <https://web.archive.org/web/20160403023622/http://www.3dnews.ru/924520> Графенові мікрофони демонструють рекордну чутливість. Дата доступу 15.05.2024
25. Наноматеріали і нанотехнології: Навчальний посібник / Азаренков М. О., Неклюдов І. М., Береснєв В. М., Воєводін В. М., Погребняк О. Д., Ковтун Г. П., Соболев О. В., Удовицький В. Г., Литовченко С. В., Турбін П. В., Чишкала В. О. – 2014. – 323 с.
26. Low Voltage Operating 2D MoS₂ Ferroelectric Memory Transistor with Hf_{1-x}Zr_xO₂ Gate Structure / Zhang, S., Liu, Y., Zhou, J. et al. // Nanoscale Res Lett. – 2020. – V. 15. – P. 157 (9 pp).
27. Datta S. Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport – Part B: Quantum Transport / S. Datta – Singapore: World Scientific, 2018 – 260 p.
28. Lundstrom M. Fundamentals of Nanotransistors / M. Lundstrom – Singapore: World Scientific, 2018. – 342 p.

29. Моделювання характеристик польового транзистора з каналом на основі молібден сульфїду / І.П. Бурик, В.В. Бібик, Т.М. Гричановська, М.П. Бурик // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. –2023. – Том 34 (73), №1. - С.348-353