

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

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

за спеціальністю 171 «Електроніка»

освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему «**Властивості наноструктурних матеріалів як елементів електронних приладів і систем**»

Здобувача групи ЕП.м-32 Іващенко Ярослава Олександровича

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

_____ Ярослав ІВАЩЕНКО

Керівник к.ф.-м.н., доцент Наталія ШУМАКОВА _____

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«04» листопада 2024 р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Іващенко Ярослава Олександровича

1. Тема роботи **«Властивості наноструктурних матеріалів як елементів електронних приладів і систем»**

затверджена наказом СумДУ від «01» листопада 2024 р., № 1130-VI

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи: 11 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета):

Актуальність: потреба в поглибленому вивченні наноструктурних матеріалів, які мають унікальні властивості на нано- та мікрорівнях, що значно підвищують ефективність електронних пристроїв.

Мета: аналіз фізичних та хімічних властивостей наноструктурних матеріалів, визначення їхнього потенціалу для застосування в сучасних електронних системах.

4. Зміст текстової частини роботи (перелік питань, які необхідно розробити):

- 1) Розглянути наявні дослідження стосовно наноматеріалів.
- 2) Описати класифікацію та властивості наноструктурних матеріалів.
- 3) Дослідити застосування наноматеріалів як електронних приладів та систем.
- 4) Дослідити газочутливість напівпровідникових матеріалів які використовуються у сенсорах водню.

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайд № 1-2: Актуальність та мета роботи.

Слайд № 3-6: Класифікація наноматеріалів.

Слайд № 7-9: Властивості наноматеріалів.

Слайд № 10: Вплив наноструктурних матеріалів на електронні пристрої.

Слайд № 11: Нові захисні наноматеріали.

Слайд № 12: Нанотрубки-металурги.

Слайд № 13-15: Мікро- і наноелектромеханічні схеми.

Слайд № 16-17: Дослідження газочутливості напівпровідникових наноматеріалів для створення сенсорів водню.

Слайд № 18: Висновки.

Слайд № 19: Список використаних джерел.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан виконання роботи
1	Класифікація та властивості наноструктурних матеріалів	04.11.2024 р.	Виконано
2	Дослідження застосування наноматеріалів	12.11.2024 р.	Виконано
3	Дослідження газочутливості напівпровідникових наноматеріалів для створення сенсорів водню	25.11.2024 р.	Виконано
4	Підготовка тексту магістерської роботи	01.12.2024 р.	Виконано
5	Підготовка презентації до захисту кваліфікаційної роботи	07.12.2024 р.	Виконано
6	Попередній захист роботи	12.12.2024 р., 10 ⁰⁵ (онлайн)	Виконано
	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2024 р., 11 ⁴⁰	

6. Дата видачі індивідуального завдання: 01.11.2024 р.

Здобувач

Ярослав ІВАЩЕНКО

Керівник

Наталія ШУМАКОВА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 36 сторінках, зокрема, містить 18 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел складається з 20 найменувань.

Актуальність теми:

В умовах зростаючих вимог до технологій і продуктивності, наноструктурні матеріали виступають важливими компонентами, що відкривають нові горизонти у розробці електронних систем. Актуальність теми дипломної роботи зумовлена потребою в поглибленому вивченні цих матеріалів, які мають унікальні властивості на нано- та мікрорівнях, що значно підвищують ефективність електронних пристроїв.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в аналізі фізичних та хімічних властивостей наноструктурних матеріалів, а також у визначенні їхнього потенціалу для застосування в сучасних електронних системах.

Під час виконання роботи використовували методи літературного аналізу, експериментальних досліджень, а також сучасні методи матеріалознавства, такі як скануюча електронна мікроскопія (SEM) та рентгенівська дифракція (XRD).

У результаті проведених наукових досліджень встановлено, що наноструктурні матеріали, зокрема на основі діоксиду олова, леговані добавками сурми та оксидом кобальту, демонструють високу газочутливість до водню, короткий час відгуку та стабільні характеристики. Отримані матеріали показали значний потенціал для застосування в сенсорах, зокрема для моніторингу водню в промислових умовах, де важлива надійність та швидкодія.

Ключові слова: НАНОМАТЕРІАЛИ, МЕМС, НЕМС, ВЛАСТИВОСІ, КЛАСИФІКАЦІЯ, ЗАСТОСУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЇ, ОСАДЖЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАНОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	7
1.1 Класифікація наноматеріалів.....	7
1.1.1 Класифікація за розміром.....	7
1.1.2 Класифікація за формою.....	9
1.1.3 Класифікація за властивостями	10
1.1.4 Класифікація за структурними ознаками.....	12
1.2 Властивості наноструктурних матеріалів	14
1.2.1 Фізичні властивості.....	14
1.2.2 Хімічні властивості	15
1.2.3 Оптичні властивості	17
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ	19
2.1 Вплив наноструктурних матеріалів на електронні пристрої	19
2.2 Нові захисні керамічні наноматеріали	20
2.3 Нанотрубки-металлурги.....	21
2.4 Мікро- і наноелектромеханічні системи	23
2.4.1 Застосування МЕМС технологій	25
2.4.2 Нанобіоелектроніка.....	27
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОЧУТЛИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ВОДНЮ	28
3.1 Матеріали та методика досліджень	28
3.2 Результати дослідження.....	30
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

ВСТУП

Сучасний розвиток електроніки, що стрімко прогресує, вимагає нових матеріалів, які здатні забезпечити високу продуктивність, енергоефективність та функціональність електронних пристроїв. В умовах зростаючих вимог до технологій і продуктивності, наноструктурні матеріали виступають важливими компонентами, що відкривають нові горизонти у розробці електронних систем. Актуальність теми дипломної роботи «Властивості наноструктурних матеріалів як елементів електронних приладів і систем» зумовлена потребою в поглибленому вивченні цих матеріалів, які мають унікальні властивості на нано- та мікрорівнях, що значно підвищують ефективність електронних пристроїв. [1]

Об'єктом дослідження є наноструктурні матеріали, які використовуються в електроніці, а предметом – їхні властивості та вплив на характеристики електронних приладів. Мета дослідження полягає в аналізі фізичних та хімічних властивостей наноструктурних матеріалів, а також у визначенні їхнього потенціалу для застосування в сучасних електронних системах. Для досягнення цієї мети поставлено ряд завдань:

1. Вивчення основних типів наноструктурних матеріалів та їх властивостей.
2. Аналіз впливу наноструктурних матеріалів на електронні пристрої.
3. Проведення експериментальних досліджень для оцінки характеристик матеріалів.

Методи дослідження включають літературний аналіз, експериментальні дослідження, а також сучасні методи матеріалознавства, такі як скануюча електронна мікроскопія (SEM) та рентгенівська дифракція (XRD).

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості впровадження наноструктурних матеріалів у виробництво електронних пристроїв, що забезпечить підвищення їхньої ефективності та надійності. Результати дослідження можуть бути використані для покращення розробки нових технологій в електроніці, а також для вдосконалення існуючих методів виробництва.

РОЗДІЛ 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАНОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Класифікація наноматеріалів

Наноструктурні матеріали – це матеріали, які мають структуру на нанометровому рівні, складаються з груп наночастинок. В них наночастинки можуть бути структурними елементами. Наноструктурні матеріали поділяються по характеру взаємозв'язку наночастинок на консолідовані наноматеріали та нанодисперсії.

1.1.1 Класифікація за розміром

Наноматеріали класифікуються за розміром, виходячи з форми і масштабу їхніх структурних елементів, і виконують різні функції залежно від їхніх властивостей і застосування.

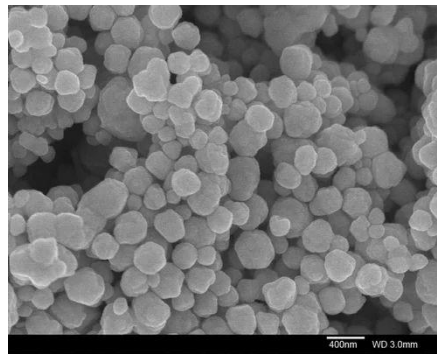


Рисунок 1.1 – Наночастинки срібла [2]

Наночастинки мають розміри від 1 до 100 нм і демонструють унікальні фізико-хімічні властивості через квантові ефекти та значну площу поверхні. Вони широко застосовуються в електроніці, медицині та енергетиці. Наприклад, наночастинки золота використовують у біосенсорах, а срібла — для антимікробних покриттів (рис. 1.1). Оксидні наночастинки, такі як ZnO і TiO₂, використовуються у

фотокаталізі, сенсорах і п'єзоелектричних наногенераторах. Магнітні наночастинки застосовують у МРТ і цільовій доставці ліків. [3]

Методи синтезу наночастинок включають фізичні, хімічні та біологічні підходи, кожен з яких забезпечує контрольовані розміри й властивості.

Наноплівки – це шари матеріалів товщиною від кількох до сотень нанометрів, які відзначаються унікальними оптичними, електронними та біомедичними властивостями. Їх використовують у транзисторах, сонячних батареях, оптичних фільтрах і медичних покриттях. Методи отримання включають магнетронне розпилення, CVD і золь-гель методи. Наноплівки на основі ZnO і TiO₂ підвищують ефективність пристроїв завдяки своїм електронним і оптичним характеристикам.

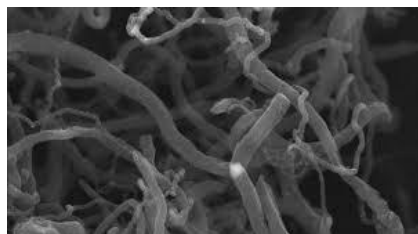


Рисунок 1.2 – Мікроскопічне зображення нановолокон [2]

Нановолокна – це ниткоподібні структури діаметром кілька нанометрів із великою довжиною, які мають високу міцність і площу поверхні (рис. 1.2). Вони використовуються у фільтруванні, тканинній інженерії та створенні композитів. Найпоширеніший метод їх синтезу – електроспінінг. [4]

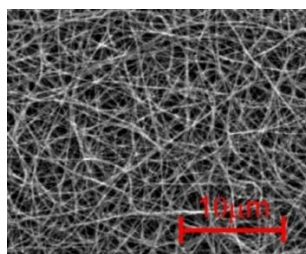


Рисунок 1.3 – Зразок плівки з вуглецевих нанотрубок під скануючим електронним мікроскопом [2]

Нанотрубки – циліндричні структури з діаметром у нанометрах. Вуглецеві нанотрубки мають високу міцність, електропровідність і теплопровідність (рис. 1.3). Їх застосовують у композитах, гнучкій електроніці, суперконденсаторах і біомедичних пристроях.

Таким чином, наноматеріали є ключовими елементами сучасних технологій завдяки своїм унікальним властивостям і широкому спектру застосувань у науці й техніці.

1.1.2 Класифікація за формою

Форма наноматеріалів впливає на їхні фізико-хімічні властивості та ефективність у різних сферах.

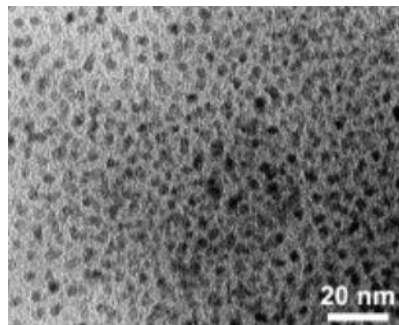


Рисунок 1.4 – Наночастинки ZrO_2 мають сферичну форму [4]

Сферичні наноматеріали (рис. 1.4) мають симетричну поверхню, що забезпечує високу реакційну здатність і ефективність в адсорбції та каталізі. Вони застосовуються у фармацевтиці як носії ліків, а також у екологічному секторі для очищення води та повітря. Наприклад, наночастинки срібла використовуються в антимікробних покриттях, а оксиди металів – у фільтрувальних системах.

Циліндричні наноматеріали, зокрема нанотрубки, мають довгу структуру, що забезпечує унікальні механічні та електропровідні властивості. Вуглецеві нанотрубки вирізняються високою міцністю та гнучкістю, що робить їх придатними для створення легких і міцних композитних матеріалів. Завдяки

циліндричній формі вони ефективно проводять струм і зберігають заряд, що дозволяє їх використовувати в акумуляторах, суперконденсаторах та електронних пристроях. [5]

Плоскі наноматеріали, такі як наноплівки, мають двовимірну структуру та застосовуються для захисних покриттів, які надають поверхням корозійну стійкість і механічну стабільність. У оптичних і електронних пристроях наноплівки використовуються як оптичні фільтри та сенсори. Наприклад, наноплівки діоксиду титану демонструють чудові фотокаталітичні властивості, що дозволяє їх використовувати для створення самоочисних поверхонь.

Крім того, існують наноматеріали складних форм, таких як кубічні, тетраедричні або гексагональні. Вони проявляють унікальні оптичні та електричні ефекти завдяки анізотропії та знаходять застосування у фотоніці й біомедицині, зокрема в діагностичних сенсорах і для лікування захворювань.

1.1.3 Класифікація за властивостями

Наноматеріали класифікуються за фізичними й хімічними властивостями на провідні, оптичні, магнітні та каталітичні наноматеріали.

Нанопровідники – одновимірні наноструктури з діаметром до десятків нанометрів і довжиною до кількох мікрометрів. Вони мають унікальні квантові ефекти та властивості переносу заряду.

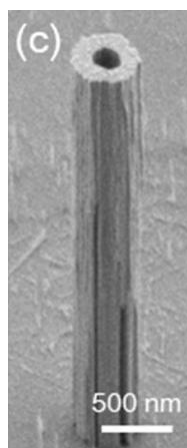


Рисунок 1.5 – Мікроскопічне зображення нанодротів [4]

Застосовуються в транзисторах, сенсорах, сонячних елементах. Наприклад, кремнієві нанодропи (SiNWs) є альтернативою звичайним транзисторам, а GaAs та InP використовуються в лазерах, світлодіодах та фотодетекторах. ZnO нанодропи (рис. 1.5) – для газових сенсорів, а вуглецеві нанодропи – у системах зберігання енергії. Методи синтезу: CVD, VLS, електрохімічне осадження.

Оптичні наноматеріали характеризуються унікальними властивостями, зумовленими квантовими ефектами, що впливають на взаємодію зі світловими хвилями. Наприклад, квантові точки здатні випромінювати яскраве світло з високою точністю передачі кольорів, що широко використовується в сучасних дисплеях для створення енергоефективних і компактних світлодіодних екранів із широкою кольоровою гамою. У лазерних технологіях вони забезпечують високоякісне випромінювання, мініатюризацію пристроїв і можливість налаштування довжини хвилі, що важливо для медицини, телекомунікацій і промисловості. У біосенсорах оптичні наноматеріали дозволяють виявляти біомолекули з високою чутливістю, що значно покращує діагностику. У медичній візуалізації вони застосовуються для покращення методів, таких як оптична томографія, забезпечуючи високу чутливість і точність. [6]

Магнітні наноматеріали мають унікальні магнітні властивості, що робить їх важливими у багатьох галузях. У магнітно-резонансній томографії (МРТ) вони слугують контрастними речовинами, покращуючи якість зображення тканин і дозволяючи точніше діагностувати патології. У жорстких дисках магнітні наночастинки забезпечують високу щільність запису, що дозволяє зберігати більше даних у меншому просторі. У доставці ліків ці наноматеріали дозволяють цільове транспортування медикаментів до певних клітин чи тканин за допомогою магнітного поля, зменшуючи побічні ефекти та підвищуючи ефективність лікування.

Каталітичні наноматеріали завдяки великій активній поверхні суттєво прискорюють хімічні реакції. Вони ефективно застосовуються для очищення повітря і води, наприклад, розщеплюючи токсичні речовини до безпечних компонентів. У промислових процесах такі матеріали зменшують потребу в

реагентах і підвищують ефективність реакцій, що сприяє економії ресурсів і скороченню витрат. У технологіях «зеленого» виробництва каталітичні наноматеріали допомагають перетворювати вуглекислий газ на метанол чи синтетичне паливо, сприяючи зменшенню викидів парникових газів та покращенню екологічної ситуації. [7]

1.1.4 Класифікація за структурними ознаками

Наноматеріали є важливими елементами сучасної науки та технологій завдяки їхнім унікальним властивостям, які значною мірою залежать від їхньої структури. Класифікація наноматеріалів за структурними ознаками дозволяє систематизувати різноманіття цих матеріалів та визначити їхні властивості для подальшого застосування. Залежно від особливостей будови, наноматеріали поділяються на наночастинки та наноструктурні матеріали, кожна з яких має свої унікальні характеристики та підкатегорії.

Наночастинки є однією з основних форм наноматеріалів. Вони характеризуються розміром, що не перевищує кількох десятків нанометрів, і різноманіттю форм, які впливають на їхні фізико-хімічні властивості. До найпоширеніших типів наночастинок належать нанокластери, нанокристали, фулерени, нанотрубки, супермолекули та біомолекули. Нанокластери представляють собою групи атомів або молекул, які мають специфічні властивості, зумовлені їхнім малим розміром. Нанокристали, зі свого боку, є твердими частинками з кристалічною структурою, які демонструють унікальні оптичні та електронні властивості. Фулерени, що складаються з атомів вуглецю у вигляді сферичних або еліпсоїдних структур, відзначаються високою стабільністю та електропровідністю. Нанотрубки, створені переважно з вуглецю, мають надзвичайно високу механічну міцність і електропровідність, що робить їх незамінними у багатьох галузях техніки.

До наночастинок також належать міцели, ліпосоми та інші біомолекули, які знаходять широке застосування у фармакології та біомедицині. Окрему групу

складають полімерні, керамічні, металічні, карбонові та інші наночастинки, кожна з яких має свої унікальні сфери застосування. Крім того, різноманіття геометричних форм, таких як наносфери, наноплівки, нанострічки, розширює можливості використання наночастинок у промисловості.

Наноструктурні матеріали утворюються шляхом об'єднання наночастинок у більш складні системи, що надає їм специфічних властивостей. Вони поділяються на консолідовані наноматеріали та нанодисперсії. Консолідовані наноматеріали включають нанокристалічні матеріали, фулерити, фотонні кристали та шарові нанокompозити. Ці матеріали характеризуються високою стабільністю, специфічними оптичними властивостями та широкими можливостями для використання в оптиці, електроніці та енергетиці.

Нанодисперсії, такі як нанопорошки, наносуспензії, наноемульсії та наноаерозолі, знаходять застосування у створенні покриттів, фармацевтичних препаратів, косметики та інших галузях. Особливе значення мають матричні нанокompозити, які утворюються шляхом поєднання наночастинок із матричними матеріалами для досягнення специфічних властивостей. Нанопористі матеріали, відомі своєю великою питомою поверхнею та високою пористістю, широко використовуються у фільтраційних системах, каталізаторах та енергетичних пристроях.



Рисунок 1.6 – Схема класифікації наноматеріалів за структурними ознаками [7]

На рисунку 1.6 наведено детальну схему класифікації наноматеріалів за структурними ознаками. Вона ілюструє основні категорії наноматеріалів, їх підкатегорії та взаємозв'язки між ними.

Узагальнюючи, класифікація наноматеріалів за структурними ознаками є основою для їх подальшого дослідження та впровадження у практичні застосування. Вона сприяє кращому розумінню властивостей матеріалів та дозволяє обирати найбільш відповідні рішення для різних галузей науки та техніки.

1.2 Властивості наноструктурних матеріалів

1.2.1 Фізичні властивості

Наноструктурні матеріали мають унікальні фізичні властивості, що суттєво відрізняються від макроскопічних матеріалів. Зменшення розміру частинок до нанорозмірів, які зазвичай становлять 1–100 нанометрів, призводить до змін у поведінці матеріалів на атомному рівні.

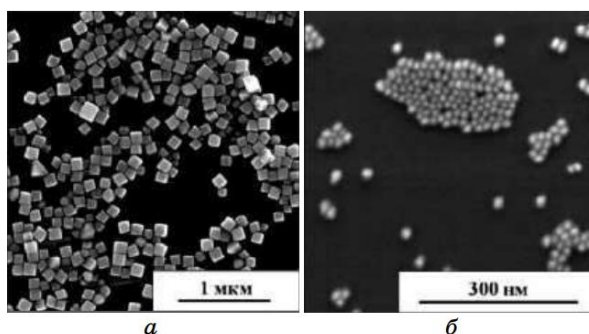


Рисунок 1.7 – СЕМ-зображення наночастинок срібла (а) і золота (б) [8]

Однією з ключових характеристик наноструктур є значне збільшення відношення площі поверхні до об'єму. Наприклад, у наночастинок золота це відношення може досягати $10 \text{ м}^2/\text{г}$, що суттєво підвищує їхню реакційну здатність. Завдяки цій властивості наночастинки золота та срібла (рис. 1.7) широко використовуються в каталітичних процесах і медичній техніці. Зокрема, у медицині

наночастинки срібла демонструють ефективність як антибактеріальний засіб, тоді як наночастинки золота використовуються у фототермальній терапії раку.

Вуглецеві нанотрубки мають виняткову міцність, яка становить до 100 разів більше за міцність сталі, при цьому їхня густина є значно меншою. Такі характеристики роблять їх незамінними в аерокосмічній промисловості та при створенні електронних компонентів. Крім того, їхній коефіцієнт теплопровідності може перевищувати 3000 Вт/(м·К), що значно вище за звичайні матеріали, такі як мідь (400 Вт/(м·К)).

Термоелектричні властивості наноматеріалів дозволяють створювати високоефективні термоелектричні перетворювачі. Наприклад, наноструктуровані термоелектричні матеріали мають коефіцієнт теплової ефективності $ZT > 2$, що є значно вищим за традиційні матеріали ($ZT \approx 1$).

Змінюючи форму, розмір і спосіб розподілу частинок у матриці, можна створювати матеріали з унікальними властивостями для застосування в електроніці, енергетиці та медицині. Наприклад, нанокompозити з оксидом цинку з розміром частинок 50–70 нм демонструють підвищену чутливість у сенсорах газу, що дозволяє визначати концентрацію газів на рівні ppm (parts per million).

Дослідження цих матеріалів відкриває перспективи для технологічних інновацій у різних галузях науки та промисловості. [8]

1.2.2 Хімічні властивості

Хімічні властивості наноструктурних матеріалів визначаються їх здатністю до хімічних реакцій, яка суттєво відрізняється від макроскопічних матеріалів через високе співвідношення поверхні до об'єму. Це співвідношення може досягати значень у 100–1000 м²/г залежно від типу наноматеріалу, що значно перевищує показники для звичайних матеріалів. Завдяки цьому наноматеріали проявляють підвищену чутливість до змін середовища та високу активність у хімічних реакціях. [9]

Завдяки великій площі поверхні наноматеріали, зокрема наночастинки металів, таких як золото чи платина, широко застосовуються як каталізатори. Наприклад, наночастинки платини демонструють каталітичну активність у реакціях окислення метанолу з ефективністю 90–95%, що перевищує аналогічні показники для традиційних каталізаторів. [9] Використання таких наноматеріалів дозволяє знизити енергетичні витрати процесу окислення або відновлення на 30–50% у порівнянні з традиційними методами.



Рисунок 1.8 – Вуглецеві нанотрубки [9]

Хімічні властивості наноструктурних матеріалів значною мірою залежать від їх структури, розміру та форми. Наприклад, вуглецеві нанотрубки (рис. 1.8) мають діаметр у межах 1–20 нм і довжину, що може сягати кількох мікрометрів. Це забезпечує їм унікальні властивості, такі як висока електропровідність ($\geq 10^6$ С/м) і міцність (до 100 ГПа), що перевищує аналогічні показники для сталі. Ці характеристики обумовлюють їх широке застосування в електроніці та композитних матеріалах. [9]

Стабільність наноматеріалів є важливим аспектом їх ефективного використання. Наприклад, наночастинки срібла, які часто застосовуються в медицині та системах очищення, мають тенденцію до агрегації при зберіганні у водних розчинах. Швидкість агрегації може зростати до 50% через 48 годин, що значно знижує їх активність. Окислення також є проблемою для багатьох металевих наночастинок. Зокрема, наночастинки заліза окислюються при контакті

з повітрям за час менше 24 годин, що обмежує їх застосування без додаткових стабілізаторів.

Завдяки унікальним хімічним властивостям наноструктурні матеріали стають основою для нових технологій. Наприклад, наносенсиори на основі вуглецевих нанотрубок дозволяють визначати концентрацію газів, таких як метан або аміак, із чутливістю до 1 ppm. Це значення на 50–70% краще, ніж у традиційних сенсорів. У системах очищення наноматеріали, такі як оксид титану (TiO_2), використовуються для фотокаталітичного розкладання органічних забруднень з ефективністю до 99%.

Крім того, у медицині наноматеріали відкривають нові можливості в лікуванні онкологічних захворювань. Наприклад, наночастинки золота розміром 5–20 нм використовуються у фототермічній терапії для нагрівання пухлин до температури 42–45 °C з ефективністю до 85%, що забезпечує мінімальний вплив на здорові тканини.

1.2.3 Оптичні властивості

Наноструктурні матеріали мають унікальні оптичні властивості, які суттєво відрізняються від властивостей макроскопічних матеріалів. Така варіація властивостей зумовлена малим розміром наночастинок та їхньою великою відносною площею поверхні, що впливає на їхню взаємодію з електромагнітними хвилями.

Однією з важливих особливостей оптичних властивостей наноструктур є їхня здатність поглинати і розсіювати світло. Наприклад, золото в нанорозмірному стані має яскравий колір, який залежить від розміру та форми частинок. Це пов'язано з явищем, яке називається локалізованим поверхневим плазмонним резонансом, що виникає внаслідок взаємодії електронів на поверхні наночастинок з електромагнітним полем. Це явище широко використовується в біомедицині, зокрема, при розробці сенсорів та діагностики.

Крім того, оптичні властивості наноструктурних матеріалів включають фотолюмінесценцію, яка важлива для створення нових матеріалів для освітлення та дисплеїв. Наприклад, напівпровідникові наночастинки, такі як сульфід кадмію, можуть випромінювати світло різних кольорів залежно від розміру частинок, що є перспективним для застосування у фотовольтаїці та світлодіодних технологіях.

Іншим важливим аспектом є те, що оптичні властивості наноматеріалів можна модифікувати, змінюючи їхню структуру або додаючи інші елементи. Це відкриває нові можливості для створення матеріалів з бажаними властивостями для конкретних застосувань, таких як фотоніка, оптоелектроніка та медичні технології.

[10]

РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

2.1 Вплив наноструктурних матеріалів на електронні пристрої

У сучасному світі електроніки наноструктуровані матеріали відіграють важливу роль у вдосконаленні різних електронних пристроїв. Завдяки своїм унікальним властивостям, що виникають на мікро- і нанорівні, ці матеріали відкривають нові можливості для підвищення ефективності, зменшення розмірів компонентів і зниження енергоспоживання.

Однією з основних характеристик наноструктур є їхня здатність покращувати електропровідність. Наприклад, наночастинки металів, вуглецеві нанотрубки та графен демонструють значно вищу провідність, ніж звичайні матеріали. Це дає можливість створювати транзистори з меншими розмірами, що не тільки збільшує швидкість обробки даних, але й зменшує енергоспоживання. У звичайних електронних пристроях, таких як мікропроцесори, використання наноструктур призводить до значного зменшення втрат енергії, що дуже важливо в сучасних умовах енергозбереження. [10]

Наноструктури також використовуються у виробництві сенсорів зі значно покращеною чутливістю та часом відгуку. Ці властивості дозволяють створювати газові сенсори, біосенсори та інші системи моніторингу навколишнього середовища. Наприклад, наночастинки можуть взаємодіяти з молекулами при дуже низьких концентраціях, що робить їх ідеальними для використання в екологічному моніторингу та медицині. Використання наноматеріалів у сенсорах відкриває нові можливості для створення точних і швидких вимірювальних пристроїв, здатних швидко реагувати на зміни навколишнього середовища.

Крім того, наноструктуровані матеріали можна використовувати в пристроях, що працюють в екстремальних умовах. Наприклад, композитні матеріали на основі вуглецевих нанотрубок мають високу стійкість до механічних і термічних навантажень. Це робить їх ідеальними для використання в аерокосмічній галузі, де важливі як легкі, так і високоміцні матеріали.

Наноструктуровані матеріали також мають значний вплив на сонячні панелі. Коли наноматеріали включаються у фотоелектричні системи, їх ефективність зростає завдяки покращеному поглинанню світла. Це не тільки збільшує потужність, але й зменшує витрати на енергію, роблячи сонячні технології більш доступними. Дослідження показують, що використання наноструктур призводить до значного покращення продуктивності сонячних панелей.

Таким чином, наноструктурні матеріали не тільки вдосконалюють існуючі технології, але й відкривають нові горизонти для розробки інноваційних електронних пристроїв. Наноструктурні матеріали є основою для майбутніх технологічних рішень, що забезпечують ефективність, надійність та екологічну стійкість у сучасному світі. Зі зростанням вимог до енергоефективності та продуктивності наноструктуровані матеріали набувають все більшого значення і потребують подальших досліджень у цій галузі.

2.2 Нові захисні керамічні наноматеріали

Керамічні матеріали використовуються у понад 150 різних галузях, як у конструкційних цілях, так і у вигляді покриттів для валів, підшипників, пропелерів, телескопічних перископів та інших об'єктів. Нанокераміка, порівняно із традиційною керамікою, має підвищену твердість і часто застосовується в ситуаціях, де важливі водонепроникність та захист від корозії. Наприклад, наноструктури на основі карбиду кремнію можуть суттєво збільшити твердість матеріалів у порівнянні зі стандартним SiC. Покриття NanoTuf™ для прозорих полімерних поверхонь здатне значно підвищити міцність пластику. Під час нанесення такого покриття на пластикові поверхні утворюється надміцна плівка, яка забезпечує захист не лише від біологічних і хімічних факторів, але й від концентрованих ударів, таких як кулеві.

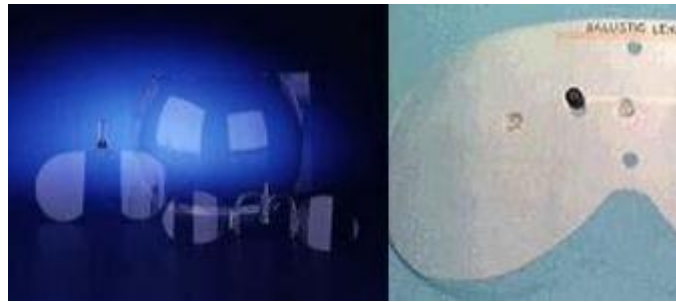


Рисунок 2.1 – Куленепробивний пластик, оброблений NanoTuf™ [11]

На рисунку 2.1 зображено приклад випробувань захисного скла на шоломі, обробленого NanoTuf™, у яке були випущені кілька куль.

Було розроблено спеціальне покриття з «електромеханічною фарбою», яке дозволяє виробам змінювати колір подібно до хамелеона, одночасно забезпечуючи антикорозійний захист та здатність усувати дрібні пошкодження на поверхні. Це покриття включає безліч наномеханізмів, що дозволяють реалізувати такі функції. Крім того, завдяки системі оптичних матриць, які є окремими наномашинами в складі фарби, можна досягти ефекту невидимості для об'єктів, таких як автомобілі чи літаки. Маленькі камери фіксують зображення з одного боку об'єкта і передають його на фотоелементи з іншого боку, створюючи ілюзію фону перед виробом. [11]

2.3 Нанотрубки-металлурги

Дослідження показали, що нанотрубки здатні обробляти метали та інші матеріали нетиповими методами. Зокрема, нанотрубки можуть використовуватися для обробки нанометрових порцій металу за технологією холодного пресування, виконуючи функцію мікроскопічного об'ємного преса. Наприклад, багат шарова вуглецева нанотрубка, всередині якої знаходиться метал (такий як залізо, карбід заліза або кобальт), під впливом високоенергетичного електронного променя здатна витягувати з металів наноструни.

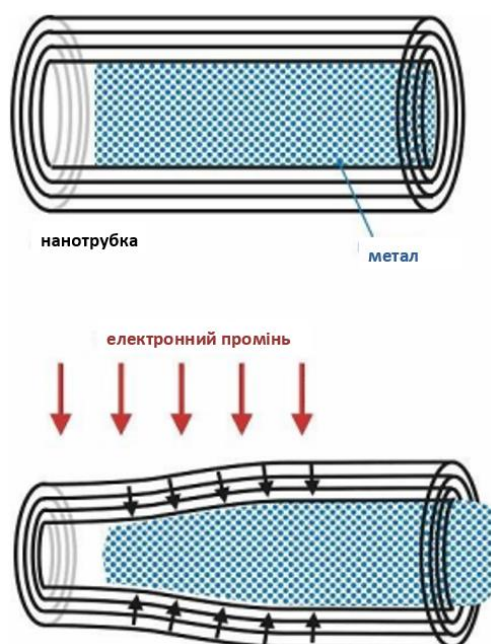


Рисунок 2.2 – Структурна схема деформації нанотрубки [12]

Це стає можливим завдяки зміні морфології нанотрубки під дією електронного променя (рис. 2.2). [12]

Високоенергетичні електрони можуть вибивати атоми вуглецю з нанотрубки, внаслідок чого вона поступово звужується, що призводить до деформації матеріалу, який знаходиться всередині. Зміна кристалічної структури нанотрубки має настільки сильний вплив, що дозволяє обробляти тверді матеріали, такі як кобальт або карбід заліза.

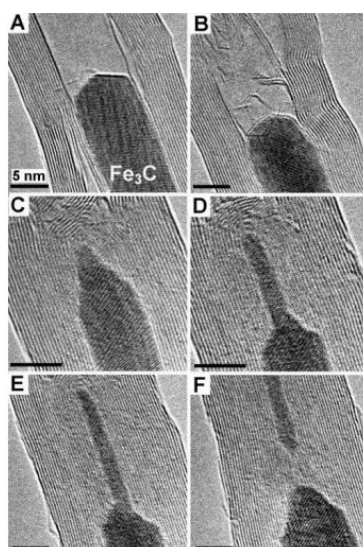


Рисунок 2.3 – Мікрофотографія видавлювання металів з нанотрубки [12]

Використання електронного променя для зміни морфології нанотрубки призвело до створення нанометрового екструдера, який може виштовхувати внутрішній матеріал з більшою силою (рис. 2.3).

Як показали виміру, наноекструдер працює із зусиллям близько 40 ГПа в осьовому напрямку нанотрубки. Це дуже більша величина для нанорозмірного діапазону.

2.4 Мікро- і наноелектромеханічні системи

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) поєднують механічні компоненти, датчики та електроніку на кремнієвих підкладках. МЕМС мають розміри від 1 до 100 мкм, і використовуються в мікрооптоелектронно-механічних системах (МОЕМС), які інтегрують оптику, електроніку та механіку. Мікросистеми підкоряються законам класичної фізики, хоча їх розміри значно впливають на фізичні властивості матеріалів. [13]

Наноелектромеханічні системи (НЕМС) мають розміри від кількох сотень нанометрів до одиниць нанометрів і набувають нових фізичних властивостей. Вони орієнтовані на зменшення розмірів МЕМС і створення нових молекулярних двигунів та електромеханічних пристроїв. НЕМС активно використовуються в скануючих зондових мікроскопах і для створення наноагів і наносенсорів.

До МЕМС відносяться:

- мініатюрні деталі (гідравлічні та пневмоклапани, струменеві сопла принтерів);
- мікроінструменти (скальпелі, пінцети для роботи з мікрооб'єктами);
- мікромашини (мотори, насоси, турбіни);
- мікророботи;
- мікродатчики і виконавчі пристрої.

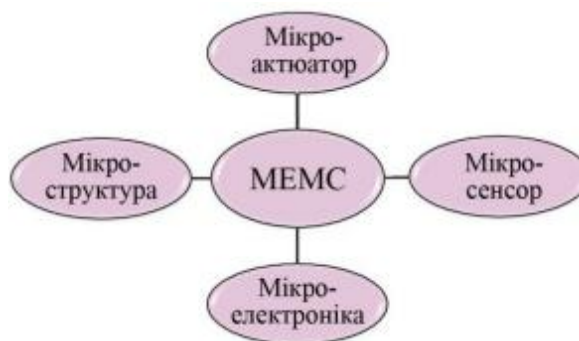


Рисунок 2.4 – Складові елементи МЕМС [14]

МЕМС складаються з механічних мікроструктур, мікросенсорів і мікроелектроніки, що інтегруються на одному кристалі кремнію (рис. 2.4).

МЕМС поділяються на сенсори (вимірювальні пристрої) і актюатори (виконавчі пристрої). Актюатори використовуються в робототехніці, космічній техніці, біомедицині та інших галузях. [15]

Основні методи активації актюаторів: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. П'єзоелектричні та гідравлічні методи є найбільш перспективними. Одним із напрямків є створення актюаторів на основі ефекту пам'яті форми, здатних працювати на субмікронному рівні.



Рисунок 2.5 – Формування нових галузей внаслідок поєднання оптики, електроніки та механіки [15]

Проектування МЕМС є складним через малі розміри елементів, що викликає проблеми, такі як сухе тертя. Для зменшення тертя використовуються молекулярні мастильні плівки (рис. 2.5).

2.4.1 Застосування MEMS технологій

Мікросистемні пристрої, такі як мікрофони, акселерометри, гіроскопи, використовуються в автомобільній, медичній, телекомунікаційній, промисловій та портативній електроніці. У MEMS датчиках для вимірювання тиску та руху (акселерометри, гіроскопи) процеси моделюються через мікромеханічні структури. Вони не мають рухомих частин, що взаємодіють з вимірюваним об'єктом, і є безконтактними. Ці пристрої працюють в різних умовах, гарантуючи високу надійність навіть за температурних коливань, вібрацій, ударів, вологості та електромагнітних впливів. Їх точність забезпечується як в статичних, так і в динамічних умовах. [7]

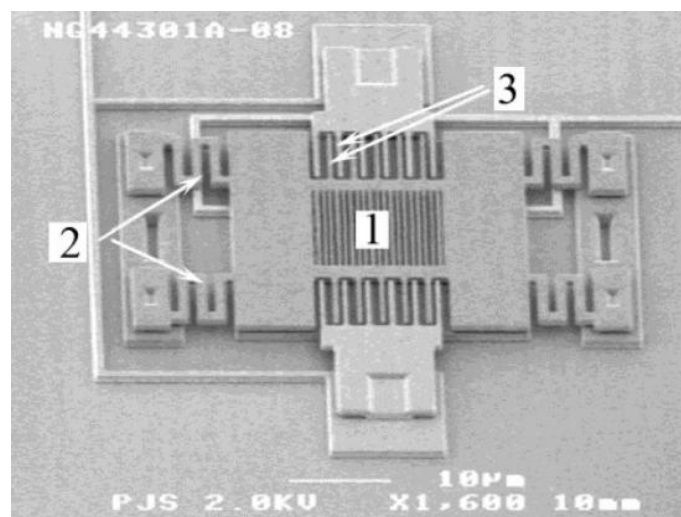


Рисунок 2.6 – Мініатюрний MEMS-акселерометр фірми Sandia Labs: 1 – вантаж; 2 – кріплення вантажу; 3 – обкладки конденсатора [16]

Одним із популярних типів MEMS датчиків є конденсаторні акселерометри (рис. 2.6), де зміщення вантажу змінює ємність між конденсаторними обкладками, що дозволяє виміряти прискорення.

Існують також п'єзоелектричні MEMS акселерометри, в яких зміщення вантажу генерує електричний струм для визначення прискорення.

Іншим прикладом є мікрофони, що складаються з двох мембран, одна з яких змінює своє положення під впливом звукових хвиль, змінюючи ємність між мембранами (рис. 2.6). [16]

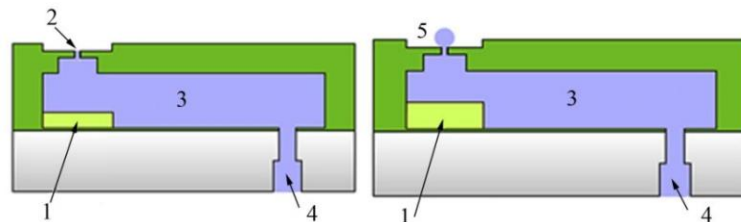


Рисунок 2.7 – Розпилення чорнил п'єзоелектричною голівкою: 1 – п'єзоелемент; 2 – дюза (сопло); 3 – ємність з чорнилами; 4 – отвір для подачі фарби; 5 – крапля чорнила [17]

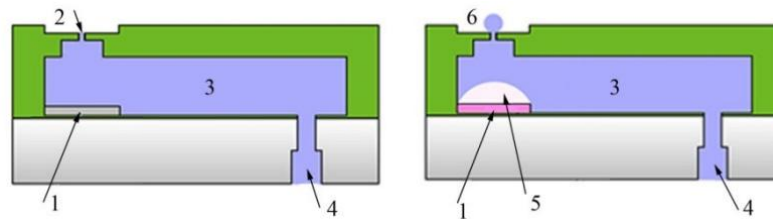


Рисунок 2.8 – Принцип роботи термоструменної принтерної голівки: 1 – нагрівальний елемент; 2 – дюза; 3 – ємність з чорнилами; 4 – отвір для подачі чорнил; 5 – бульбашка; 6 – крапля чорнил [17]

MEMS технології використовуються також в струменевих принтерах, де застосовуються п'єзоелектричний (рис. 2.7) і метод газових пухирців (рис. 2.8). У першому методі п'єзоелемент розпилює чорнило через сопло, а в другому — газова бульбашка витискає чорнило.

Мікроробототехніка, частина MEMS, включає розробку мікророботів для різних застосувань, у тому числі військових, із використанням п'єзоелектричних, електромеханічних і електромагнітних двигунів. Для медичних застосувань використовуються MEMS технології, зокрема в п'єзоелектричних мікроактуаторах для хірургічного обладнання.

2.4.2 Нанобіоелектроніка

Нанобіоелектроніка охоплює дослідження взаємодії об'єктів розміром в нанометри з біологічними системами і використання цих знань для розвитку наномедицини, що фокусується на моніторингу, корекції та управлінні біологічними процесами за допомогою нанопристроїв. [18]

До напрямків нанобіотехнологій у біомедицині належать:

- Інженерія живих тканин та регенеративна медицина;
- Створення біологічних наноструктур;
- Інкапсуляція та адресна доставка ліків;
- Молекулярна візуалізація;
- Біофотоніка;
- Біосумісні імплантати;
- Біоаналітичні мембрани;
- Молекулярні біосенсори;
- Біочіпи і лабораторії на чіпі.

Нанороботи, створені з атомарною точністю, можуть коригувати молекулярні процеси в організмі, наприклад, контроль рівня глюкози. Типові медичні нанороботи виготовляються з міцних матеріалів, таких як вуглець, і використовують енергію глюкози та амінокислот. Вони можуть включати мікрофагоцити (для боротьби з інфекціями), респіроцити (для транспортування кисню), клотоцити (для зупинки кровотеч) та вазкулоїди (протези для кровоносної системи).

ВіоMEMS орієнтовані на діагностику та виявлення ДНК, вірусів і білків в біологічних зразках, зокрема на реальному часі аналізу клітин.

Наномедичні розробки, такі як доставка ліків безпосередньо в уражені клітини, мають великий потенціал. В якості транспортних засобів використовуються полімери, дендримери, біологічні молекули та металеві наночастинки. [19]

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОЧУТЛИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ВОДНЮ

3.1 Матеріали та методика досліджень

Для отримання мікрокристалічного матеріалу $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ (0,15 мас.% Sb) було застосовано метод співосадження. Гідроксиди олова (IV) та сурми (III) осаджувалися аміаком з розчинів їх хлоридів у воді, де концентрація Sb_2O_3 становила 0,15 мас.%. Після осадження осад було фільтровано, промито водою для видалення хлорид-іонів, висушено при температурі 120 °C і спечено в програмованій печі в діапазоні температур від 25 до 580 °C, що призвело до отримання жовтого дрібнокристалічного матеріалу. Нанорозмірний діоксид олова отримано за допомогою зольгель-технології. Для цього 1,5 г пентагідрату олова (IV) і SbCl_3 (з концентрацією 0,15 мас.% в перерахунку на Sb_2O_3) розчиняли в 15 мл етиленгліколю при нагріванні до 80 °C з постійним перемішуванням. Отриманий розчин переносили в керамічну чашку та витримували на піщаній бані при температурі 120 °C до випаровування 80% розчинника. Після цього утворювався темно-бурий в'язкий гель, який залишали для старіння на повітрі протягом 30 хвилин, а потім прогрівали при температурі 150 °C у сушильній шафі протягом двох днів, що призвело до утворення коричневого ксерогелю. Після цього ксерогель піддавали термічній обробці в умовах обмеженого доступу повітря при температурі від 25 до 600 °C, в результаті чого отримано світло-жовтий порошкоподібний матеріал. Обидва матеріали просочувалися розчином CoCl_2 , після чого сушили при 90 °C і знову спікали на повітрі при температурі 590 °C.

Для виготовлення сенсора було використано планарний керамічний адсорбційно-напівпровідниковий сенсор розмірами $2,2 \times 2,2 \times 0,3$ мм, конструкція якого була визначена в попередніх дослідженнях.

Чутливість сенсора досліджувалася за допомогою спеціалізованого електричного стенду із використанням газових сумішей, що містять водень, в

концентраційному діапазоні 40–1145 ppm. Мірою чутливості сенсора була величина (γ), яка розраховувалась як відношення опору сенсора в чистому повітрі (R_0) до опору в присутності водню (R_g) при концентрації 40 ppm H_2 . Потужність нагрівача сенсора використовувалась як аналог температури газочутливого шару сенсора. Для оцінки динамічних характеристик сенсора було виміряно часи швидкодії та релаксації при подачі газу зі швидкістю 0,4 л/хв. Швидкодія визначалась часом, за який сигнал сенсора досягає 70 % або 90 % від сталого значення під час подачі газу. Релаксація оцінювалась за часом, за який сигнал сенсора зменшується на 90 % від його сталого значення при переході до повітря. Сигнали сенсора фіксували за допомогою інтегратора.

Мікрофотографії матеріалу були отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM). Для дослідження структури наноматеріалу використовувався метод трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) при прискорювальній напрузі 100 кВ.

Фазовий склад матеріалу визначено за допомогою рентгенофазового аналізу, використовуючи рентгенівський дифрактометр з випромінюванням $CuK\alpha$. Аналіз рентгенограм проводили за положенням дифракційних піків і значеннями міжплощинних відстаней, які розраховували за допомогою рівняння Вульфа – Брега.

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

де n – порядок дифракції (ціле число),

λ – довжина хвилі рентгенівських променів,

d – відстань між кристалічними площинами (міжплощинна відстань),

θ – кут між падаючими променями і площиною кристалічної решітки (кут Брега).

Ідентифікація фаз проводилась за найбільш інтенсивними рефlekсами, що відповідають відповідним фазам, порівнюючи експериментальні міжплощинні відстані з літературними даними. [20]

3.2 Результати дослідження

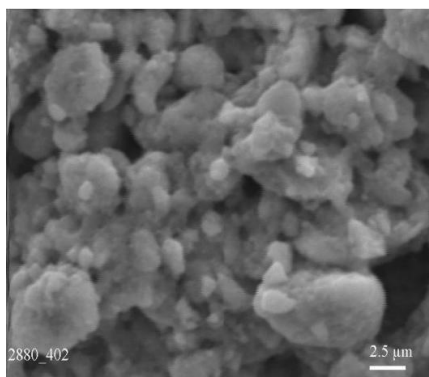


Рисунок 3.1 – СЕМ зображення поверхневого шару сенсора на основі мікрокристалічного $\text{Co/SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ [20]

Аналіз морфології мікрокристалічного матеріалу $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$, отриманого за допомогою методу співосадження за допомогою СЕМ, виявляє наявність частинок розміром від 1 до 30 мкм (рис. 3.1).

Результати дослідження морфології напівпровідникового наноматеріалу $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$, отриманого методом золь-гель, за допомогою ТЕМ показали, що матеріал складається з наночастинок сферичної форми (рис. 3.2(а)). Розмір частинок варіюється в межах від 5 до 25 нм, при цьому середній розмір становить 12 нм. Присутність кільцевої електронोगрама вказує на нанорозмірну структуру отриманого матеріалу (рис. 3.2(б)). Порівняння кільцевої електронोगрама з літературними даними [20] дозволяє визначити, що нанорозмірний діоксид олова має тетрагональну структуру, що відповідає каситериту.

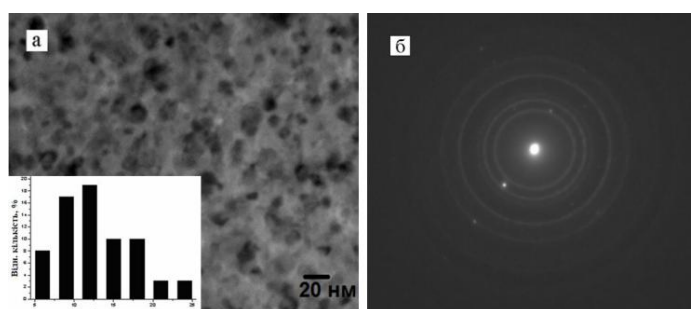


Рисунок 3.2 – ТЕМ мікрофотографія отриманого наноматеріалу $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ (а); кільцева електронोगрама $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ (б) [20]

Результати електронографічного дослідження нанорозмірного матеріалу SnO₂/Sb₂O₅ (рис. 3.2(б)) збігаються з даними рентгенофазового аналізу. Рентгенограми зразків обох матеріалів показали лише рефлекси, що відповідають тетрагональній (a≠c) модифікації SnO₂ каситериту. Фаза оксиду сурми (V) не була виявлена в мікрокристалічному та нанорозмірному матеріалах SnO₂/Sb₂O₅, ймовірно, через низький вміст Sb₂O₅ у цих матеріалах. У таблиці 3.1 подано результати чутливості сенсорів до водню, де газочутливий шар створений на основі мікрокристалічних і нанорозмірних матеріалів, з урахуванням різних температур їх роботи.

Таблиця 3.1 – Залежність величини чутливості сенсора (R₀/R_r) від концентрації водню у воднево-повітряній суміші (ppm) за потужностей нагрівача сенсора 0,25 Вт і 0,35 Вт

Концентрація H ₂ , (ppm)	Метод співосадження	Золь-гель метод
	Чутливість сенсорів (R ₀ /R _r)	
Потужність – 0,25 Вт		
45	1,39	3,1
116	1,8	4,5
296	2,4	6,8
540	3,3	8,7
1145	3,7	11,7
Потужність – 0,35 Вт		
45	2,4	3,9
116	3,4	6
296	5	9,9
540	6,2	13,9
1145	8	19,4

Згідно з отриманими результатами, сенсори, виготовлені з матеріалу, отриманого золь-гель методом при потужності нагрівача 0,25 Вт та 0,35 Вт, показують більшу зміну сигналу при підвищенні концентрації водню в порівнянні з сенсорами, створеними на основі матеріалу, отриманого методом співосадження. Це, ймовірно, пов'язано з більшою поверхневою площею наноматеріалу, що підтверджується даними ТЕМ, які вказують на менший розмір наночастинок у матеріалі, виготовленому золь-гель методом, порівняно з матеріалом, отриманим методом співосадження. Підтвердженням цьому є також результати вимірювання питомої поверхні, які показують, що для наноматеріалу ця величина майже вдвічі більша ($S_{\text{пит}} = 32 \text{ м}^2/\text{г}$), ніж для мікророзмірного матеріалу ($S_{\text{пит}} = 15 \text{ м}^2/\text{г}$).

Швидкодія є важливим параметром для оцінки практичної придатності сенсора. Порівняння цього показника для сенсорів проводили при різних значеннях потужності нагрівача (0,25 Вт і 0,35 Вт). У таблиці 3.2 наведено дані щодо динамічних характеристик, зокрема часу відгуку ($t_{0,7}$ і $t_{0,9}$) та часу релаксації (t_r). Виявлено, що для сенсора на основі нанорозмірного $\text{Co}/\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ ці параметри значно кращі, ніж для сенсора на основі мікророзмірного матеріалу, причому за більшої потужності нагрівача час швидкодії та релаксації для сенсорів на основі як нанорозмірного, так і мікророзмірного матеріалів зменшується.

Таблиця 3.2 – Швидкодія сенсорів на основі мікрокристалічного та нанорозмірного $\text{Co}/\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$ в атмосфері 40 ppm H_2 за різних потужностей нагрівача сенсора

Мікрокристалічний $\text{Co}/\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$			Нанорозмірний $\text{Co}/\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$		
$t_{0,7}$, с	$t_{0,9}$, с	t_p , с	$t_{0,7}$, с	$t_{0,9}$, с	t_p , с
Потужність нагрівача сенсора, N = 0,25 Вт					
7,2	24	60	3,6	14	43
Потужність нагрівача сенсора, N = 0,35 Вт					
2	4	35	1,3	2,5	21

Отримані результати можна пояснити різницею в енергетичній неоднорідності поверхні мікрокристалічного та наноматеріалу, використаних у газочутливому шарі сенсорів. Зокрема, згідно з даними ТЕМ, наноматеріал характеризується більш однорідною поверхнею порівняно з мікрокристалічним матеріалом. Значення $t_{0,7}$ і $t_{0,9}$ обумовлені часом встановлення динамічної рівноваги в процесі окиснення водню (H_2) на поверхні сенсора, тоді як t_p залежить від часу десорбції продуктів окиснення (H_2O) з поверхні. Для однорідної поверхні значення $t_{0,7}$, $t_{0,9}$ і t_p є меншими порівняно з неоднорідною. Саме тому сенсори на основі наноматеріалу демонструють зменшені значення цих параметрів порівняно з сенсорами з мікрокристалічного матеріалу.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проведено всебічне дослідження властивостей і застосувань наноструктурних матеріалів у сучасних електронних приладах та сенсорних системах.

1. Показано, що наноструктурні матеріали мають унікальні фізичні, хімічні та оптичні властивості, які зумовлені високим співвідношенням поверхні до об'єму (до $1000 \text{ м}^2/\text{г}$). Це забезпечує їх високу чутливість до змін середовища, що робить їх придатними для застосування в електроніці та сенсорних системах.

2. Досліджено експериментальні дані, які свідчать, що матеріали на основі $\text{SnO}_2/\text{Sb}_2\text{O}_5$, виготовлені золь-гель методом, мають середній розмір частинок 12 нм та питому поверхню $32 \text{ м}^2/\text{г}$. Ці матеріали показали чутливість до водню (R_0/R_g) до 19,4 при концентрації H_2 1145 ppm та потужності нагрівача 0,35 Вт, що перевищує показники для мікрокристалічного матеріалу.

3. Установлено, що сенсори на основі наноматеріалів забезпечують коротший час відгуку ($t_{0,7} = 1,3 \text{ с}$, $t_{0,9} = 2,5 \text{ с}$) порівняно з мікрокристалічними матеріалами ($t_{0,7} = 2 \text{ с}$, $t_{0,9} = 4 \text{ с}$) при потужності нагрівача 0,35 Вт. Це підтверджує переваги наноматеріалів у швидкодії сенсорів.

4. Показано, що використання наноструктурних матеріалів у сенсорах дозволяє досягти високої точності виявлення концентрацій водню навіть при низьких температурах. Це відкриває перспективи їх використання у промислових системах моніторингу та безпеки.

5. Установлено, що застосування технологій створення наноматеріалів дозволяє інтегрувати їх у наноелектромеханічні системи (НЕМС) та біомедичні пристрої. Це створює нові можливості для розробки високоточних сенсорів та систем доставки лікарських препаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Properties and Applications of Nanostructured Materials. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2021.
2. Khan Y., Zafar A. Nanostructured Materials: Properties and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2021
3. Park J., Park H. Nanostructured Materials for Electronics: Properties and Applications. *Nanotechnology Reviews*, 2018, 7(5), p. 619-631.
4. Кузнецов В. А., Шевченко В. М. "Сучасні наноструктурні матеріали для електроніки." *Науковий вісник НУПС*, 2019, № 2, с. 102-107.
5. Song Y., Lee S. Nanomaterials for Electronics: Advances and Future Directions. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4(1), p. 39-59.
6. Huang Y., Zhang L. Optical and Electronic Properties of Nanostructured Materials. *Advanced Functional Materials*, 31(45), 2021.
7. Chen X., Yang H. Nanostructured Materials for Electronic Devices: A Review. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(1), p. 1-15.
8. Гонтар Т. О., Гонтар О. В. "Наноструктурні матеріали та їх застосування в електроніці." *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, 2021, № 1, с. 45-50.
9. Tseng C. H., Wu C. H. Properties of Nanostructured Materials for Photonics Applications. *Journal of Nanophotonics*, 12(2), 2018.
10. Alshahrani A. M., Alharthi M. M. Nanostructured Materials in Electronic Applications. *Materials Today: Proceedings*, 17, 2019.
11. Nanostructured Materials: A Review of Their Properties and Applications. *Review on Advanced Materials Science*. 2021.
12. Recent Advances in Nanostructured Materials for Electronics and Energy Applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022.
13. Nanostructured Materials in Electronics: A Review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2020.

14. Sulabha K. Kulkarni. Nanotechnology: Principles and Practices. 3rd ed. 2020. 402 p.
15. Edelstein A., Cammaratra R. Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications. 2022.
16. Савченко І. О. Нанохімія та нанотехнології : Підручник. Київ : Київ. університет, 2019. 447 с.
17. Проценко І. Ю., Шумакова Н. І. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці : Підручник. 2-ге вид. Суми : Сумський державний університет, 2024. 170 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/95197/1/Protsenko.pdf>.
18. Ткач О. П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні. Суми : Сум. держ. ун-т, 2014. 127 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/38270/1/nanomateriali.pdf>.
19. Дробот В. П., Лазарєв В. М. Оптичні властивості наноструктурних матеріалів. Київ : Наук. світ, 2020.
20. Кушнір Т. М., Копитко Г. В. "Властивості та застосування наноматеріалів в електронних пристроях." Наукові записки ТНТУ, 2020, № 1, с. 76-81.