

Міністерство освіти і науки України  
Бердянський державний педагогічний університет

Ігор Богданов

Яна Сичікова

Олена Кривильова

Сергій Ковачов

Курс лекцій

Наноматеріалознавство

Бердянськ 2024

Україна

**УДК: 620.3(075.8)**

**Б34**

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Бердянського державного педагогічного університету  
(протокол № 9 від 28.12.2023)

**Богданов І., Сичікова Я., Кривильова О., Ковачов С.**

Б34 Наноматеріалознавство. Курс лекцій. – К.: ФОП Самченко А. М.,  
2024. – 180 с.

**ISBN 978-617-8413-08-8**

"Курс лекцій: Наноматеріалознавство" призначений для здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців, які спеціалізуються у галузі наноматеріалів та нанотехнологій. Курс охоплює широкий спектр тем, починаючи від введення в науку про наноматеріали, методів синтезу та характеристики, і закінчуючи комплексними питаннями управління якістю та етичними аспектами. Особлива увага приділяється функціональному моделюванню процесів синтезу наноструктур з заданим рівнем якості. Книга містить приклади, питання для самоперевірки та теми для самостійного опрацювання, що робить її корисним ресурсом для поглибленого вивчення дисципліни.

**Рецензенти:**

**Анатолій І. ПОПОВ** – старший науковий співробітник Інституту фізики твердого тіла Латвійського університету, доктор фізико-математичних наук, професор

**Вікторія ЖИГІРЬ** - Декан факультету фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти Бердянського державного педагогічного університету, доктор педагогічних наук, професор

**Ярослав ЖИДАЧЕВСЬКИЙ** - професор кафедри фізики та методики навчання фізики Бердянського державного педагогічного університету, старший науковий співробітник Інституту фізики Польської академії наук, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**УДК: 620.3(075.8)**

**ISBN 978-617-8413-08-8**

© Богданов І., Сичікова Я., Кривильова О., Ковачов С., 2024

## ЗМІСТ

### **Лекція 1. Вступ у наноматеріалознавство – с. 5**

- 1.1 Явища на нанорозмірі
  - 1.2 Сфери застосування наноматеріалів
  - 1.3 Етика та питання безпеки наноматеріалів
  - 1.4 Нормативно-правова база і стратегії управління ризиками
  - 1.5 Історичний екскурс
  - 1.6 Унікальні властивості на нанорозмірі
  - 1.7 Мультидисциплінарний характер науки про наноматеріали
  - 1.8 Перспективи на майбутнє
  - 1.9 Огляд дисципліни та структура курсу
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних і рекомендованих джерел

### **Лекція 2. Підходи до класифікації наноструктур та опису процесів структуроутворення - с. 49**

- 2.1 Класифікація наноструктур
  - 2.2 Методи отримання наноструктурованих шарів на поверхні напівпровідників
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних та рекомендованих джерел

### **Лекція 3. Нормативне регулювання в галузі наноматеріалознавства - с. 72**

- 3.1 Передумови нормативного регулювання нанотехнологій
  - 3.2 Загальні принципи Кодексу ЄС з відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки і нанотехнологій
  - 3.3 Напрями діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі
  - 3.4 Стандарти ISO в галузі нанотехнологій
  - 3.5 Основні агентства в галузі стандартизації наноматеріалів
  - 3.6 Стандарти ISO 9000 та зони їх застосування у виробничому процесі
  - 3.7 Стандартизація наноматеріалів в Україні
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних та рекомендованих джерел

### **Лекція 4. Методи синтезу наноструктур і застосування напівпровідникових наноструктур для систем накопичення та зберігання енергії - с. 88**

- 4.1 Підходи «знизу вгору»

- 4.2 Підходи «зверху вниз»
  - 4.3 Гібридні підходи
  - 4.4 Методи на основі шаблонів
  - 4.5 Хімічні й електрохімічні методи
  - 4.6 Ізотропне і анізотропне травлення кристалів
  - 4.7 Застосування напівпровідникових наноструктур для систем накопичення та зберігання енергії
  - 4.8 Проблеми низької конкурентоспроможності промислової нанотехнологічної продукції
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних та рекомендованих джерел

## **Лекція 5. Методи та підходи оцінювання якості нанотехнологічної продукції - с. 137**

- 5.1 TQM (Total Quality Management)
  - 5.2 Математично-статистичні методи оцінювання якості наноматеріалів
  - 5.3 Підходи та технології, що сприяють підвищенню рівня якості наноматеріалів
  - 5.4 Підходи до оцінювання якості наноматеріалів
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних та рекомендованих джерел

## **Лекція 6. Функціональне моделювання процесу синтезу наноструктур заданого рівня якості - с. 155**

- 6.1 Якість наноматеріалів та зв'язок з якістю технологічних процесів
  - 6.2 Нотація IDEF0
  - 6.3 Побудова функціональної моделі за допомогою нотації IDEF0
  - 6.4 Визначення критеріїв якості наноструктур
  - 6.5 Системний підхід до управління якістю наноструктур
- Перелік питань для самоперевірки  
Теми для самостійного опрацювання  
Список використаних та рекомендованих джерел

# Лекція 1

## Вступ у наноматеріалознавство

### Зміст

- 1.1 Явища на нанорозмірі
  - 1.2 Сфери застосування наноматеріалів
  - 1.3 Етика та питання безпеки наноматеріалів
  - 1.4 Нормативно-правова база і стратегії управління ризиками
  - 1.5 Історичний екскурс
  - 1.6 Унікальні властивості на нанорозмірі
  - 1.7 Мультидисциплінарний характер науки про наноматеріали
  - 1.8 Перспективи на майбутнє
  - 1.9 Огляд дисципліни та структура курсу
- Перелік питань для самоперевірки
- Теми для самостійного опрацювання
- Список використаних і рекомендованих джерел

### 1.1 Явища на нанорозмірі

Наноматеріалознавство – це багатодисциплінарна галузь, яка об'єднує принципи фізики, хімії, біології та інженерії. Це фундаментально пов'язано з проектуванням, синтезом, характеристиками та застосуванням матеріалів, які володіють властивостями або розмірами на нанорозмірі, як правило, від 1 до 100 нанометрів. Властивості наноматеріалів, які часто ґрунтуються на квантовій механіці та високому співвідношенні поверхні та об'єму, стали каталізатором трансформаційних досягнень у широкому спектрі застосувань.

Нанорозмірний режим є перехідною зоною між класичною фізикою та квантовою механікою. Саме в цій області матеріали починають проявляти унікальні механічні, оптичні та електричні

властивості, які не спостерігаються в їх об'ємних аналогах. Наприклад, наночастинки золота виглядають червоними в розчині через поверхневий плазмонний резонанс, квантово-механічне явище. Подібним чином вуглецеві нанотрубки мають чудову механічну міцність завдяки своїй молекулярній структурі та ефектам нанорозмірності.

## **1.2 Сфери застосування наноматеріалів**

Чудові властивості наноматеріалів проклали шлях для безлічі застосувань у різних областях. Нижче наведено неповний перелік.

### *Медицина*

- Цільова доставка ліків

У медицині, застосування нанотехнологій відкриває нові можливості для цільової доставки ліків, особливо у боротьбі з такими захворюваннями, як рак. Наночастинки можуть бути розроблені зі специфічними поверхневими лігандами або покриттями, що дозволяють їм вибірково зв'язуватися з певними клітинами-мішенями, наприклад, з раковими клітинами.

Цей підхід дозволяє доставляти терапевтичні агенти безпосередньо до місця ураження, значно підвищуючи ефективність лікування та мінімізуючи системний вплив на організм. Така точна доставка ліків має потенціал знижувати побічні ефекти, які часто пов'язані з традиційними методами лікування, такими як хіміотерапія, де лікарські препарати впливають не тільки на патологічні, але й на здорові клітини.

Крім того, використання наночастинок у цільовій доставці ліків може поліпшити здатність лікарських засобів проникати в

клітини, дозволяючи досягти вищих концентрацій лікувальних агентів усередині патологічних клітин.

Таким чином, використання нанотехнологій у цільовій доставці ліків є однією з найбільш обнадійливих областей сучасної медицини, яка відкриває шлях до більш ефективних, безпечних та індивідуалізованих методів лікування.

## Targeted Drug Delivery System

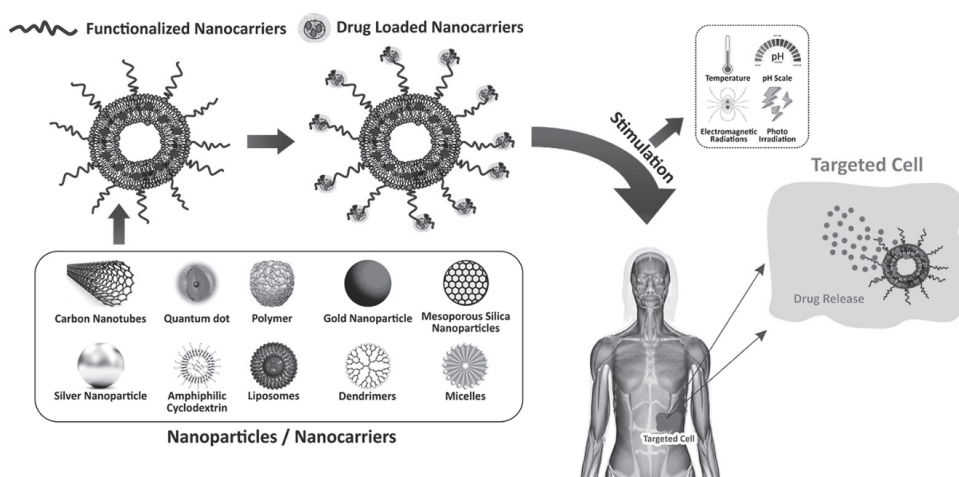


Рис. 1.1 Наноматеріали та цільова доставка ліків

[Shah, A., Aftab, S., Nisar, J., Ashiq, M. N., & Iftikhar, F. J. (2021). Nanocarriers for targeted drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 62, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102426>]

- **Діагностична візуалізація**

Наночастинки з оптичними або магнітними властивостями все частіше використовуються в таких методах візуалізації, як магнітно-резонансна томографія (МРТ) і флуоресцентна томографія. Їхня велика площа поверхні дозволяє завантажувати декілька агентів візуалізації, забезпечуючи більш точну та повну діагностику.

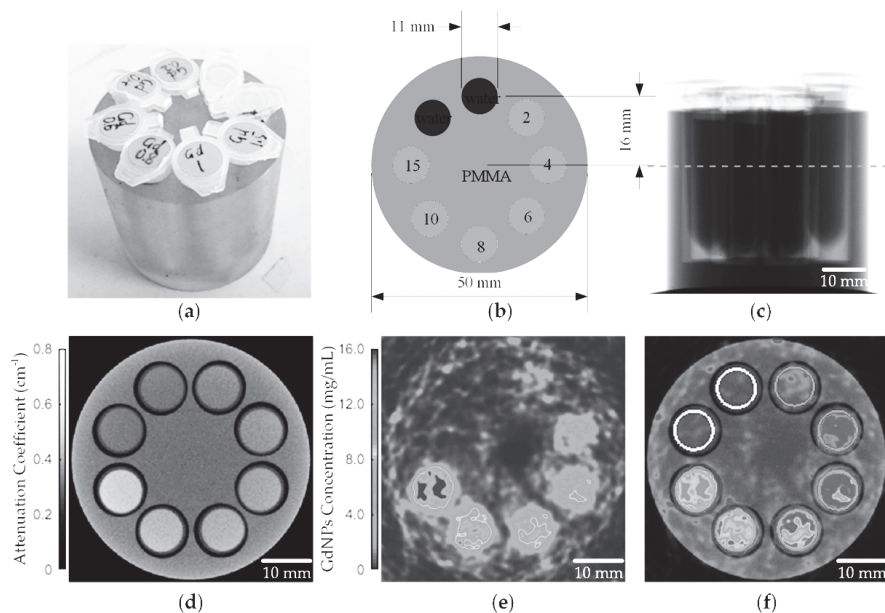


Рис. 1.2 (а) Фантом, який використовується для калібрування концентрації; (б) Концентрація гадолінію (Gd) (мг/мл) кожної вставки; (с) рентгенівське зображення фантома; (д) реконструйоване зображення трансмісійної комп'ютерної томографії (КТ); (е) Реконструйоване зображення XFCT; (ф) Об'єднане зображення СТ і XFCT

[Zhang, S., Li, L., Chen, J., Chen, Z., Zhang, W., & Lu, H. (2019). Quantitative Imaging of Gd Nanoparticles in Mice Using Benchtop Cone-Beam X-ray Fluorescence Computed Tomography System. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2315. <https://doi.org/10.3390/ijms20092315>]

- Антимікробні засоби

Металеві наночастинки, такі як срібло та золото, показали сильну антимікробну дію. Ці наночастинки можуть бути включені в ранові пов'язки або покриття для запобігання бактеріальній інфекції.

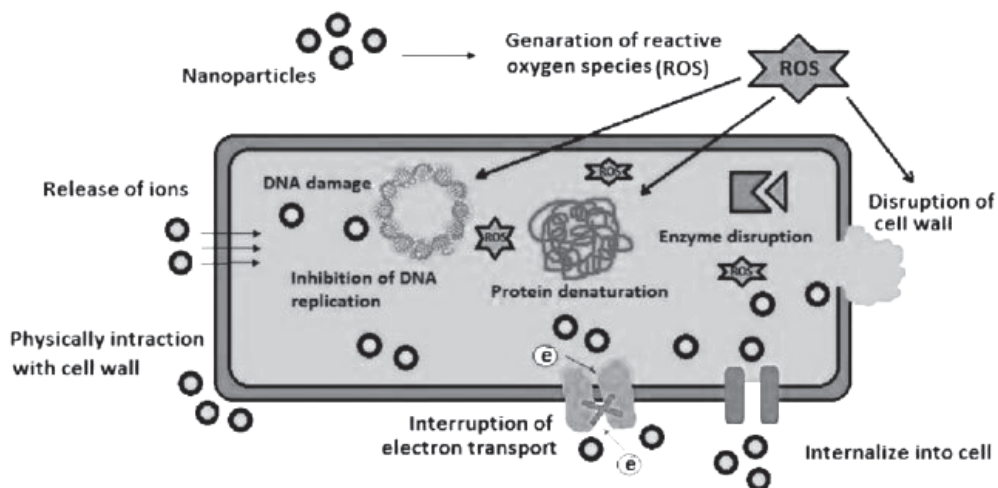


Рис. 1.3 Різні механізми антимікробної дії наночастинок металів [Dizaj, S. M., Lotfipour, F., Barzegar-Jalali, M., Zarrintan, M. H., & Adibkia, K. (2014). Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, 44, 278-284]

Хоча медичне застосування наноматеріалів є багатообіцяючим, необхідно ретельно вирішувати такі проблеми, як біосумісність, довгострокова стабільність і потенційна токсичність. Тривають дослідження для розуміння фармакокінетики та довгострокових ефектів наноматеріалів у біологічних системах.

### *Електроніка*

- Мініатюризація

Поява наноматеріалів значною мірою сприяла мініатюризації електронних компонентів. Ця мініатюризація має велике значення для створення більш компактних та портативних електронних пристроїв. Наприклад, у смартфонах, де кожен міліметр простору є важливим, використання наноматеріалів дозволяє інтегрувати більшу кількість функцій у менший об'єм. Слід також зауважити, що це стосується не тільки основних компонентів, таких як мікропроцесори і пам'ять, але й допоміжних елементів, таких як

датчики та антени.

Крім портативних пристроїв, мініатюризація відіграє важливу роль у розвитку портативних пристроїв та інтернету речей. Наноматеріали дозволяють розробляти дрібні, ефективні сенсори та пристрої, які можна інтегрувати у одяг, аксесуари та повсякденні предмети, роблячи їх "розумними".

Також варто згадати про вплив мініатюризації на медичну електроніку. Мініатюризовані діагностичні пристрої, імпланти та системи доставки ліків відкривають нові можливості для лікування та моніторингу здоров'я.

Таким чином, вплив наноматеріалів на мініатюризацію електронних компонентів є фундаментальним і визначає напрямок розвитку сучасної електроніки.

- Високоєфективні транзистори

Такі матеріали, як графен і дихалькогеніди перехідних металів, досліджуються як альтернативи кремнію в транзисторах завдяки їхній високій мобільності електронів, що потенційно може призвести до більш ефективних пристроїв. Графен, двовимірний матеріал, складається з єдиного шару вуглецевих атомів, утворених у вигляді гексагональної решітки. Він славиться своєю надзвичайною електронною мобільністю, механічною міцністю та теплопровідністю. Ці властивості роблять графен ідеальним кандидатом для створення транзисторів нового покоління.

Дихалькогеніди перехідних металів, які включають матеріали на кшталт  $\text{MoS}_2$  (дисульфід молібдену), також приваблюють увагу завдяки їх електронним властивостям. Ці матеріали можуть мати одношарову або багатшарову структуру, де кожен шар складається

з двох шарів халькогенідів, розділених шаром перехідного металу. Їхня унікальна структура і напівпровідникові властивості роблять їх привабливими для застосування в транзисторах.

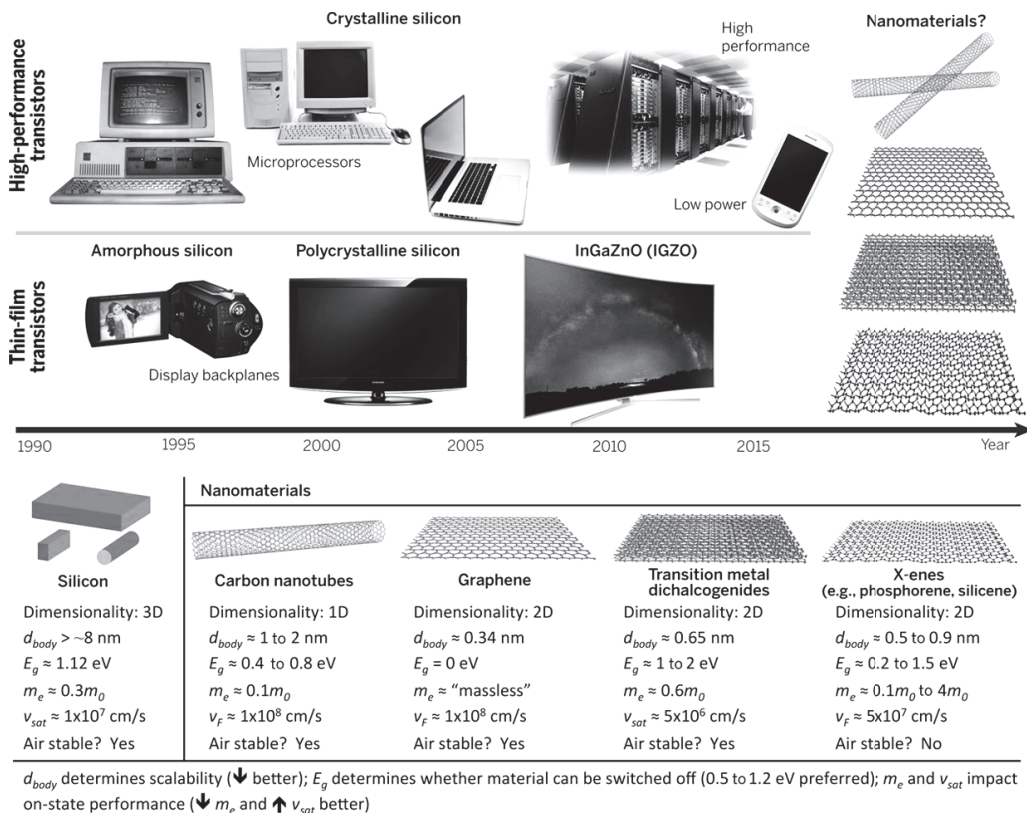


Рис. 1.4. Наноматеріали в транзисторах: від високопродуктивних до тонкоплівкових застосувань

[Franklin, A. D. (2015). Nanomaterials in transistors: From high-performance to thin-film applications. Science, 349(6249), aab2750. <https://doi.org/10.1126/science.aab2750>]

Використання графену та дихалькогенідів перехідних металів у транзисторах може принести кілька переваг порівняно з традиційними кремнієвими транзисторами. Зокрема, збільшення швидкості обробки даних і зменшення енергоспоживання. Це стає можливим завдяки вищій мобільності електронів у цих матеріалах, що дозволяє створювати транзистори, які працюють на значно

вищих частотах, ніж їх кремнієві аналоги. Також, ці матеріали можуть сприяти зменшенню розміру транзисторів, що є критично важливим для подальшої мініатюризації електронних пристроїв.

Враховуючи ці переваги, можна стверджувати, що використання графену та дихалькогенідів перехідних металів у транзисторах відіграє ключову роль у розвитку наступного покоління електронних пристроїв, що відкриває нові можливості у цифрових технологіях та електроніці.

- Гнучка електроніка

Механічна гнучкість деяких наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки та графен, робить їх ідеальними для інтеграції в портативну електроніку, яка потребує стійкості до механічних деформацій.

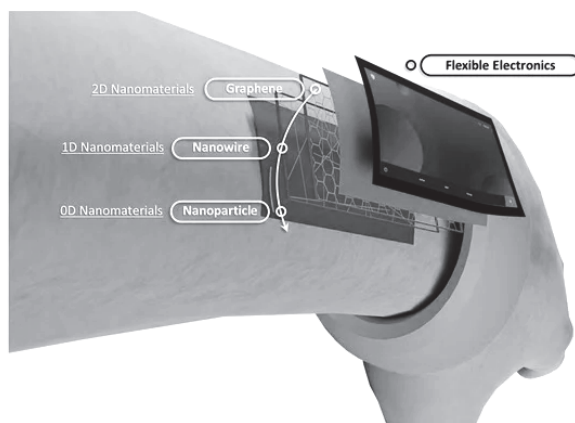


Рис. 1.5 Наноматеріали для гнучкої електроніки

[Lu, Q., Zhao, Y., Huang, L., An, J., Zheng, Y., & Yap, E. H. (2023). Low-Dimensional-Materials-Based Flexible Artificial Synapse: Materials, Devices, and Systems. *Nanomaterials*, 13(3), 373. <https://doi.org/10.3390/nano13030373>]

У контексті гнучкої електроніки, важливим аспектом використання наноматеріалів є їхня механічна гнучкість та

стійкість до деформацій.

Вуглецеві нанотрубки є відмінними прикладами наноматеріалів, які мають ці властивості. Вуглецеві нанотрубки, з їх винятковою механічною міцністю та еластичністю, можуть витримувати значні деформації без втрати своїх електричних властивостей.

Графен, з іншого боку, є одним з найміцніших відомих матеріалів при своїй майже прозорій та дуже гнучкій структурі. Ці властивості роблять його вкрай привабливим для інтеграції в гнучкі дисплеї, сенсорні панелі та інші пристрої.

Використання вуглецевих нанотрубок та графену в гнучкій електроніці може відкрити шлях для створення нових типів пристроїв, таких як гнучкі смартфони, сенсори для моніторингу здоров'я, а також інноваційні текстильні електронні пристрої. Ці матеріали забезпечують не тільки механічну гнучкість, але й високу провідність та сумісність з різними поверхнями.

- Зберігання даних

Магнітні наночастинки, завдяки своїм унікальним магнітним властивостям, можуть бути використані для створення магнітних доменів значно меншого розміру, ніж ті, що використовуються у сучасних жорстких дисках. Це дозволяє значно збільшити щільність зберігання даних, зберігаючи при цьому стабільність і надійність запису.

Основною перевагою магнітних наночастинок є їх здатність до магнітного наддоменного упорядкування, яке дозволяє збільшити кількість даних, що можуть бути збережені на одиницю площі. Це відкриває шлях для створення більш компактних та ефективних

носіїв даних.

Крім того, магнітні наночастинки можуть бути виготовлені з використанням різноманітних матеріалів, таких як оксид заліза, кобальт та нікель, кожен з яких має свої специфічні магнітні властивості. Це дозволяє науковцям оптимізувати властивості наночастинок для конкретних застосувань у зберіганні даних.

Таким чином, використання магнітних наночастинок у системах зберігання даних пропонує обіцяючий шлях для розробки майбутнього покоління носіїв даних, здатних зберігати значні обсяги інформації на невеликому фізичному просторі, що має велике значення для розвитку технологій зберігання даних.

### *Зберігання енергії*

- Покращені електрохімічні властивості

Такі наноматеріали, як графен і металооксидні композити, демонструють чудові електрохімічні властивості, включаючи високу електропровідність і площу поверхні, які є корисними для додатків зберігання енергії.

Графен, з його надзвичайною електропровідністю та великою площею поверхні, є одним з найбільш обіцяючих матеріалів для електрохімічних застосувань. Ці властивості дозволяють графену ефективно накопичувати і передавати електричний заряд, що є ключовим для високоефективних систем зберігання енергії, таких як суперконденсатори та літій-іонні акумулятори. Графен може бути використаний як анодний матеріал у літій-іонних акумуляторах, де він сприяє підвищенню ємності та тривалості життєвого циклу батарей.

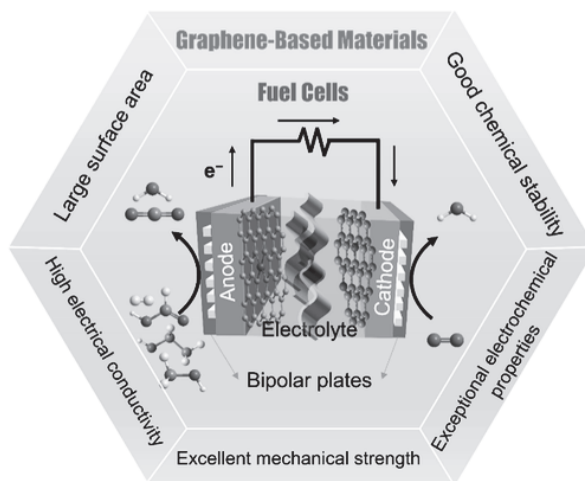


Рис. 1.6 Схема паливного елемента, кожен компонент якого містить матеріали на основі графену

[Su, H., & Hu, Y. H. (2020). Recent advances in graphene-based materials for fuel cell applications. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.833>]

Металооксидні композити також виявляють чудові електрохімічні властивості, особливо у вигляді наноструктурованих матеріалів. Ці композити можуть бути синтезовані з використанням різноманітних металів, таких як марганець, кобальт або залізо, часто у комбінації з іншими елементами для підвищення їх електрохімічної активності. Вони знаходять застосування у виготовленні електродів для суперконденсаторів, де вони сприяють збільшенню ємності зберігання та швидкості зарядки.

Особливість металооксидних композитів полягає у їх здатності до формування пористих структур з високою питомою площею поверхні, що значно підвищує кількість активних сайтів для електрохімічних реакцій. Це покращує їхні енергетичні характеристики та циклічну стабільність.

- Батареї

Наноматеріали використовуються в анодних і катодних матеріалах літій-іонних акумуляторів для покращення швидкості заряджання та розряджання, а також загального терміну служби акумулятора.

Анодні матеріали у літій-іонних акумуляторах часто виготовляються з використанням наноматеріалів, які забезпечують високу електропровідність та велику площу поверхні. Наприклад, наночастинки графену або вуглецевих нанотрубок можуть бути використані для покращення електричної провідності анодів та збільшення їх здатності до швидкого заряджання. Ці наноматеріали дозволяють також підвищити ємність аноду та знизити шкідливий вплив високих температур на ефективність акумулятора.

Що стосується катодних матеріалів, то тут наноматеріали також знаходять широке застосування. Наприклад, наночастинки або нанокompозити, що містять металооксиди (наприклад,  $\text{LiCoO}_2$  або  $\text{LiFePO}_4$ ), використовуються для підвищення енергетичної щільності та стабільності катодів. Це дозволяє покращити циклічну стабільність акумуляторів, що призводить до збільшення їхнього терміну служби.

Ключовою перевагою використання наноматеріалів в анодних і катодних матеріалах є збільшення кількості циклів заряджання/розряджання, які акумулятор може витримати без значного погіршення своїх характеристик. Це особливо важливо для розвитку та комерціалізації технологій, які вимагають надійних та довговічних джерел енергії, таких як електромобілі та портативна електроніка.

Таким чином, інтеграція наноматеріалів у літій-іонні акумулятори відкриває нові можливості для створення більш потужних, швидких у заряджанні та стійких до зносу енергетичних систем.

- Суперконденсатори

Велика площа поверхні та пориста структура деяких наноматеріалів роблять їх ідеальними для суперконденсаторів, які пропонують швидкі цикли заряду та розряду порівняно з традиційними конденсаторами. Суперконденсатори, також відомі як електричні подвійні шарові конденсатори (EDLC), є передовою технологією в сфері зберігання енергії, що відрізняється високою швидкістю заряду та розряду. Вони використовуються у широкому спектрі застосувань, від мобільних пристроїв до електротранспорту. Наноматеріали відіграють ключову роль у підвищенні ефективності суперконденсаторів завдяки їх унікальним властивостям.

Графен є одним з найбільш перспективних наноматеріалів для суперконденсаторів завдяки його високій електропровідності та екстраординарній площі поверхні. Ці характеристики дозволяють графену зберігати велику кількість енергії на одиницю маси або об'єму, що забезпечує високу енергетичну щільність для суперконденсаторів.

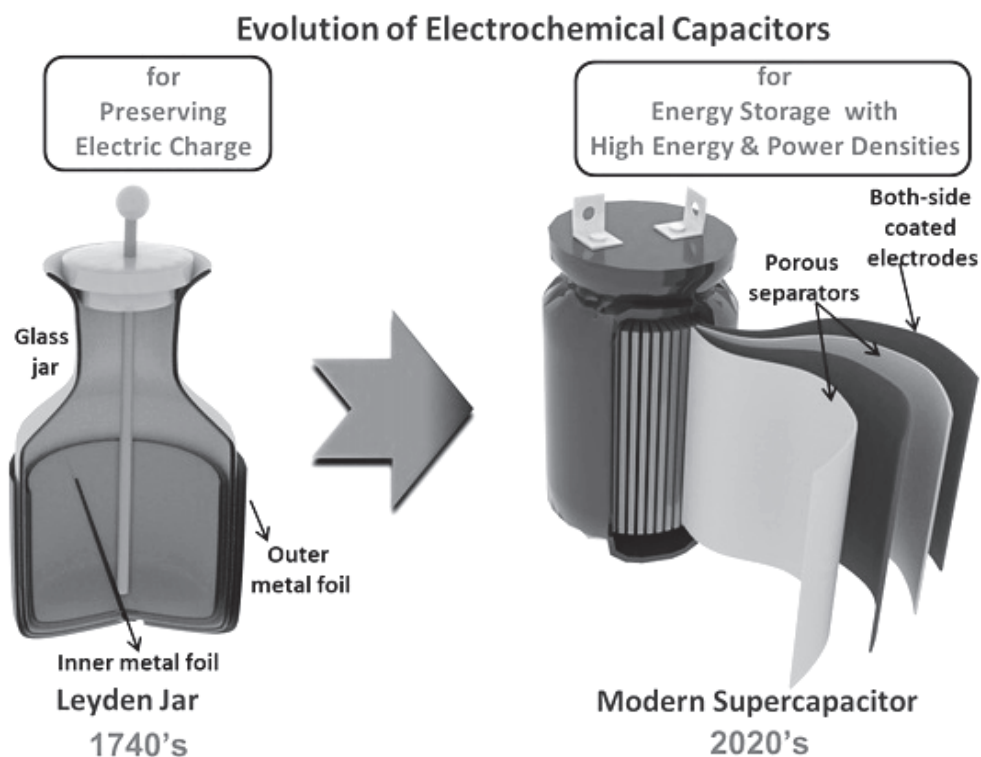


Рис. 1.7 Еволюція електрохімічних суперконденсаторів

[Lakshmi, K. C. S., & Vedhanarayanan, B. (2023). High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices. *Batteries*, 9(4), 202. <https://doi.org/10.3390/batteries9040202>]

Крім графену, інші види вуглецевих наноматеріалів, таких як активоване вугілля та вуглецеві нанотрубки, також знаходять застосування у суперконденсаторах. Ці матеріали мають високу пористість, що забезпечує значну площу поверхні для накопичення заряду.

Крім того, досліджуються й інші види наноструктурованих матеріалів, включаючи металооксиди та провідні полімери, які можуть використовуватися як електродні матеріали в суперконденсаторах. Ці матеріали можуть сприяти збільшенню

енергетичної щільності та поліпшенню довговічності суперконденсаторів.

Використання наноматеріалів в суперконденсаторах є важливим кроком у розвитку енергетичних технологій, що дозволяє створити швидкозаряджувальні, високопродуктивні системи зберігання енергії. Це відкриває нові можливості для покращення енергетичної ефективності та розвитку сталих енергетичних рішень.

- Інтеграція відновлюваних джерел енергії

Використання наноматеріалів у системах накопичення енергії життєво важливе для ефективної інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонце та вітер, в енергетичну мережу, дозволяючи більш ефективно зберігати та вивільняти енергію. Інтеграція наноматеріалів у системи накопичення енергії відіграє ключову роль у підвищенні ефективності використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Ці джерела енергії мають потенціал революціонізувати енергетичний сектор, проте вони стикаються з викликами, пов'язаними з нестабільністю та обмеженістю у часі генерації енергії.

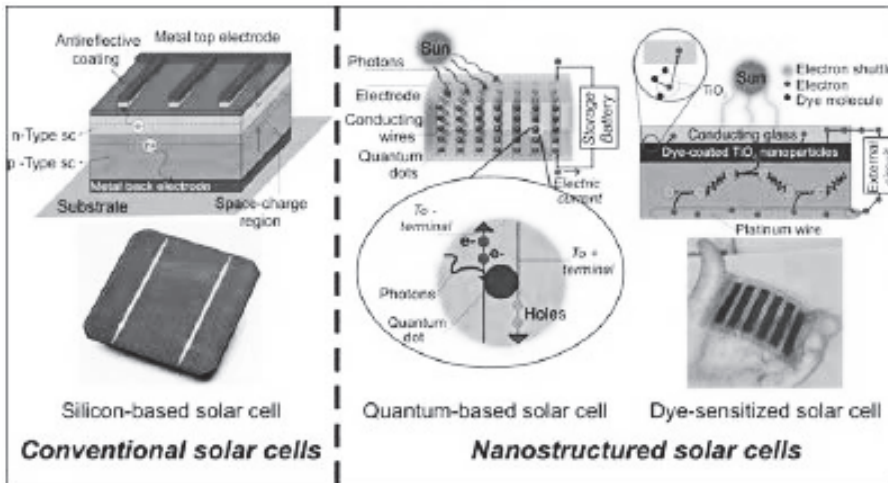


Рис. 1.8. Еволюція фотоелектричної технології: від звичайних (сонячні батареї на основі кремнію) до наноструктурованих сонячних елементів (сонячні батареї на квантовій основі та чутливі до барвників)

[Nanotechnology for a Brighter and More Sustainable Future <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2610>]

### *Оздоровлення навколишнього середовища*

- Очищення води

Наночастинки можуть бути сконструйовані для вибіркової адсорбції та видалення забруднень, таких як важкі метали та органічні забруднювачі, з води, таким чином пропонуючи рішення для очищення води. Наночастинки можуть бути спеціально розроблені для вибіркової адсорбції різних забруднювачів, включаючи важкі метали та органічні речовини.

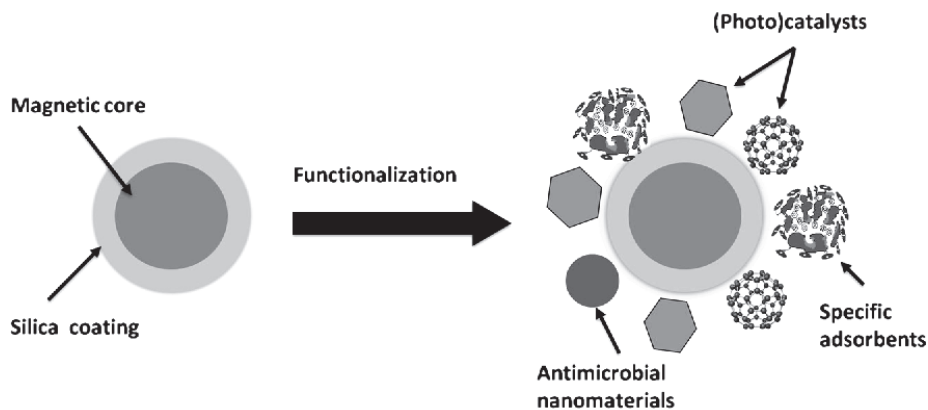


Рис. 1.8. Багатофункціональні магнітні наночастинки

[Qu, X., Alvarez, P.J., & Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water research*, 47 12, 3931-46]

Наночастинки можуть бути використані для створення фільтрів, які здатні відділяти та утримувати забруднювачі, забезпечуючи більш чисту та безпечну воду. Ці фільтри можуть бути особливо корисними в районах, де доступ до чистої питної води обмежений або де вода забруднена промисловими відходами. Крім того, використання нанотехнологій в очищенні води може сприяти зниженню вартості та підвищенню ефективності традиційних методів очищення, дозволяючи більш широко застосовувати ці технології у різних регіонах світу.

- Поводження з відходами

Нанокаталізатори, завдяки своїй високій площі поверхні та реакційній здатності, досліджуються для розщеплення небезпечних відходів, включаючи органічні розчинники та промислові побічні продукти. Ця технологія відіграє важливу роль у мінімізації екологічного впливу промислових відходів, які можуть бути шкідливими для довкілля та здоров'я людей.

Використання нанокаталізаторів у цьому контексті ґрунтується на їх здатності каталізувати хімічні реакції, що розкладають шкідливі хімічні сполуки на менш токсичні або нешкідливі компоненти. Це може включати окиснення органічних сполук до безпечних газів, таких як вуглекислий газ та водяна пара, або перетворення важких металів на стабільніші форми, які легше видалити або переробити.

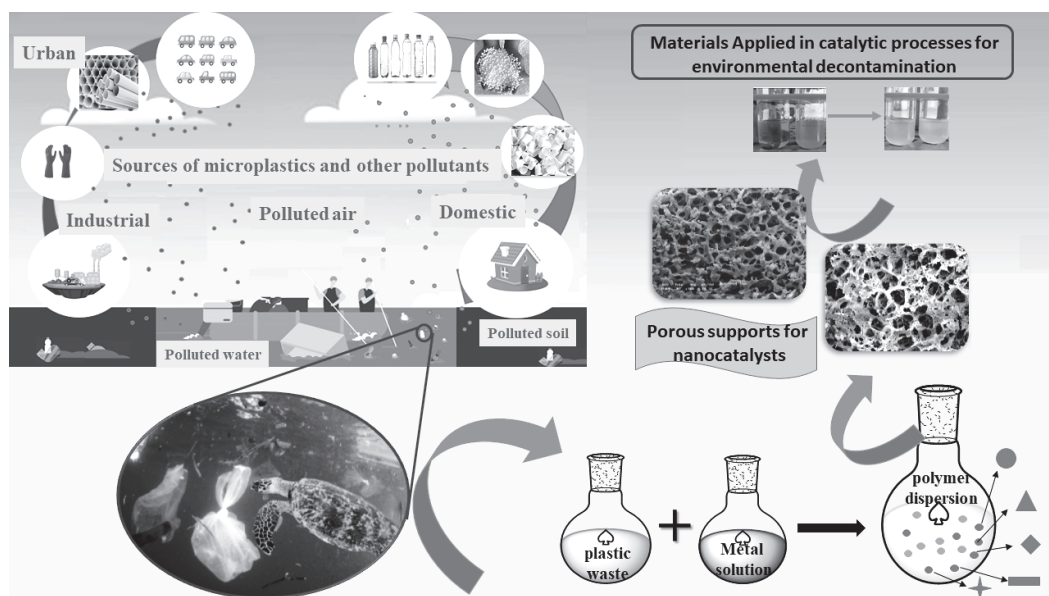


Рис. 1.9 Перетворення пластикових відходів на носії для наноструктурованих гетерогенних каталізаторів

[de Assis, G. C., de Jesus, R. A., da Silva, W. T. A., Ferreira, L. F. R., Figueiredo, R. T., & de Oliveira, R. J. (2021). Conversion of Plastic Waste into Supports for Nanostructured Heterogeneous Catalysts: Application in Environmental Remediation. *Surfaces*, 5(1), 35–66. <https://doi.org/10.3390/surfaces5010002>]

Однією з переваг нанокаталізаторів є їхній високий ступінь ефективності, який дозволяє обробляти великі об'єми відходів з відносно малим використанням матеріалу. Це не лише знижує вартість обробки відходів, але й зменшує потребу у великих

промислових установках. Крім того, розвиток цих технологій може сприяти створенню більш сталих та екологічно безпечних методів управління відходами, що має велике значення для збереження довкілля та забезпечення стійкого майбутнього.

- Якість повітря

Наноматеріали, вбудовані у фільтри, можуть ефективно вловлювати та нейтралізувати забруднювачі повітря, включаючи леткі органічні сполуки та тверді частинки.

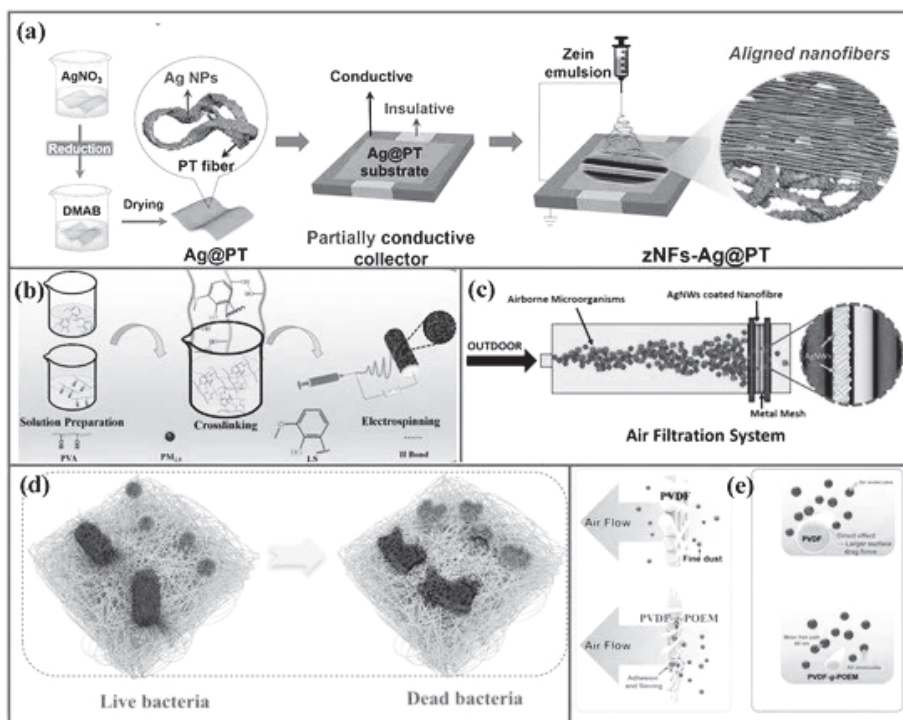


Рис. 1.10 Наноматеріали для очищення повітря

[Zhou, Y., Liu, Y., Zhang, M., Feng, Z., Yu, D.-G., & Wang, K. (2022). Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials*, 12(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/nano12071077>]

Ця технологія відіграє важливу роль у боротьбі з повітряним

забрудненням, яке є серйозною проблемою у багатьох міських та промислових районах по всьому світу.

Наноматеріали в повітряних фільтрах можуть мати різноманітні форми, включаючи нановолокна, наночастинки або нанокомпозити, які забезпечують високу площу поверхні для адсорбції забруднювачів. Ці матеріали спеціально розроблені для забезпечення високої ефективності фільтрації, затримуючи навіть дуже дрібні частинки, що звичайні фільтри не можуть вловити. Крім того, деякі наноматеріали можуть не просто вловлювати, але й хімічно перетворювати забруднювачі, ефективно знищуючи їх або перетворюючи на менш шкідливі сполуки.

Застосування нанотехнологій у повітряних фільтрах відкриває нові можливості для створення чистіших, здоровіших житлових та робочих просторів, особливо у регіонах з високим рівнем промислового та транспортного забруднення. Це також може мати важливі наслідки для громадського здоров'я, оскільки зниження рівня забруднення повітря сприяє зменшенню ризику респіраторних захворювань та інших проблем зі здоров'ям. В кінцевому рахунку, інтеграція наноматеріалів у системи очищення повітря є ключовим кроком до підвищення якості життя в сучасних містах.

- Проблеми сталого розвитку

Хоча наноматеріали пропонують переконливі рішення для відновлення навколишнього середовища, важливо оцінити їхній власний вплив на навколишнє середовище, включаючи потенційну токсичність і довгострокову стабільність.

Заглиблюючись у ці додатки, можна отримати всебічне розуміння трансформаційного потенціалу наноматеріалів у різних

секторах, хоча й із супутніми проблемами, які вимагають ретельного дослідження та етичних міркувань.

### **1.3 Етика та питання безпеки наноматеріалів**

Хоча перспективи нанотехнологій справді багатообіцяючі, не можна нехтувати міркуваннями етики та безпеки. Потенційна токсичність наноматеріалів як для навколишнього середовища, так і для біологічних систем є областю активних досліджень. Нормативно-правова база розвивається для управління ризиками, пов'язаними з виробництвом і застосуванням наноматеріалів. Хоча наноматеріали пропонують широкий спектр інноваційних рішень для вирішення проблем сталого розвитку, їх власний вплив на навколишнє середовище та потенційна токсичність вимагають ретельного вивчення та оцінки. Це особливо важливо, оскільки розширення застосування наноматеріалів може мати непередбачувані наслідки для довкілля та здоров'я людини.

Одним з ключових питань є потенційна токсичність наноматеріалів. Через їхній дрібний розмір та високу реакційну здатність наночастинки можуть легко проникати в живі організми, включаючи людину, що може призвести до небажаних біохімічних реакцій. Також існують побоювання щодо їх стійкості та здатності накопичуватися в екосистемах, що може мати довгострокові наслідки для довкілля.

Крім того, важливим аспектом є екологічний слід, пов'язаний з виробництвом наноматеріалів. Виробничі процеси, які використовуються для створення наноматеріалів, можуть вимагати значних обсягів енергії, хімічних реагентів, а також можуть призводити до утворення небезпечних відходів. Це ставить під

сумнів сталість таких технологій і вимагає розробки екологічно безпечних та ефективних методів виробництва.

В цілому, розвиток наноматеріалів для вирішення глобальних проблем сталого розвитку повинен враховувати баланс між потенційними перевагами та можливими ризиками. Важливо проводити всеосяжні дослідження та оцінки їх екологічного впливу, щоб забезпечити, що ці технології будуть використовуватися відповідально та безпечно.

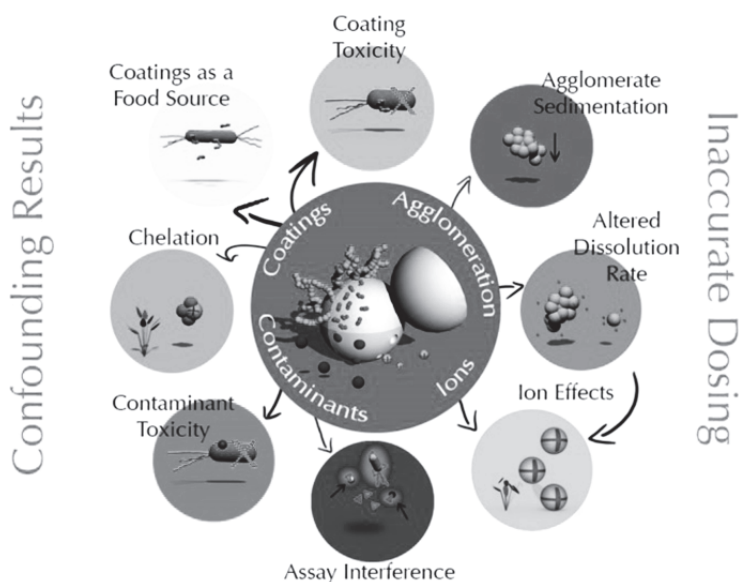


Рис. 1.11 Токсичність наноматеріалів

[Ramanathan, A. Toxicity of nanoparticles\_ challenges and opportunities. Appl. Microsc. 49, 2 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42649-019-0004-6>]

### *Токсикологічні проблеми*

- Вплив на навколишнє середовище

Токсикологічні проблеми, пов'язані з використанням наноматеріалів, становлять значну занепокоєність у контексті їх впливу на навколишнє середовище. Ці матеріали, які

характеризуються високим співвідношенням площі до об'єму та реакційною здатністю, можуть взаємодіяти з екосистемами способами, які ще не повністю зрозумілі, потенційно призводячи до негативних наслідків.

Одним з основних побоювань є вплив наночастинок на ґрунт та водні системи. Вони можуть проникати у ґрунтові шари або водойми, взаємодіючи з мікроорганізмами та рослинами. Це може впливати на їх ріст, репродуктивну функцію та загальне здоров'я, а також змінювати хімічний склад та фізичні властивості середовища, в якому вони знаходяться. Наприклад, наночастинки можуть впливати на доступність поживних речовин у ґрунті або змінювати прозорість води в екосистемах, що впливає на фотосинтез рослин.

Крім того, потенційна мобільність наночастинок означає, що вони можуть переміщатися між різними частинами екосистеми, включаючи поверхневі води, ґрунтові води та наземні середовища. Це створює додаткові виклики для оцінки та контролю їхнього розповсюдження та впливу.

У зв'язку з цим важливо проводити ретельні дослідження та моніторинг впливу наноматеріалів на різні екосистеми. Враховуючи потенційну токсичність та невизначеність у поведінці наночастинок в довкіллі, необхідно розробляти стратегії для мінімізації їх впливу та забезпечення безпечного та відповідального використання в промисловості та дослідженнях.

- Біологічні системи

Біологічні системи стикаються з певними ризиками, пов'язаними з використанням наноматеріалів, через їхній

невеликий розмір та високу реакційну здатність. Наночастинки, завдяки своїм мікроскопічним розмірам, здатні перетинати біологічні мембрани та проникати у внутрішні органи і тканини, що може призвести до непередбачуваних і потенційно шкідливих біологічних реакцій.

Одним з основних питань є здатність наночастинок накопичуватися у різних частинах організму. Наприклад, вони можуть накопичуватися в легенях, печінці або нирках, де можуть викликати запальні реакції або інші шкідливі ефекти. Ця властивість робить їх потенційно небезпечними, особливо при тривалому впливі або високих концентраціях.

Додатковою проблемою є те, що наночастинки можуть взаємодіяти з клітинними компонентами, такими як білки, ліпіди та нуклеїнові кислоти. Це може призвести до зміни клітинних функцій, пошкодження ДНК або індукції оксидативного стресу. Оксидативний стрес, зокрема, є значним фактором ризику, оскільки він може призводити до клітинних пошкоджень, запалення та навіть онкологічних захворювань.

Тому дуже важливо проводити системні дослідження та оцінювати безпечність наноматеріалів перед їх широкомасштабним використанням. Оцінка ризиків, пов'язаних з наноматеріалами, повинна включати не тільки їх вплив на здоров'я людини, але й на більш широкі біологічні системи, у яких вони можуть знаходитися. Це забезпечить збалансоване використання нанотехнологій з урахуванням їх потенційних переваг та ризиків.

#### **1.4. Нормативно-правова база і стратегії управління ризиками**

##### *Нормативно-правова база*

Регуляторні органи, такі як Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) і Європейське агентство з лікарських засобів (EMA), знаходяться в процесі розробки вказівок щодо безпечного використання та утилізації наноматеріалів. Ці рамки є динамічними та розвиваються у відповідь на нові наукові дані.

Ведуться роботи зі стандартизації методів оцінки безпеки наноматеріалів. Така стандартизація має вирішальне значення для порівняльної оцінки ризиків і для розробки універсальних протоколів безпеки.

Хоча єдиної комплексної міжнародної чи національної законодавчої бази спеціально для нанотехнологій не існує, існуючі рамки для хімікатів, харчових продуктів, ліків і косметики часто адаптовані для вирішення унікальних аспектів наноматеріалів. Це призводить до появи різноманітних нормативних актів у різних секторах, що створює проблеми для послідовного та ефективного управління ризиками.

##### *Основні сфери регулювання:*

Існуючі рамки, такі як REACH (ЄС) і TSCA (США), вимагають реєстрації та оцінки хімічних речовин, у тому числі наноматеріалів. Крім того, спеціалізовані агентства, такі як FDA та EPA, контролюють безпеку продуктів харчування, ліків і вплив нанотехнологій на навколишнє середовище.

Міжнародні конвенції, такі як Базельський і Лондонський

протоколи, регулюють транскордонне переміщення та утилізацію небезпечних матеріалів, включаючи деякі наноматеріали.

Такі організації, як OSHA та ILO, встановлюють рекомендації щодо впливу наноматеріалів на робочому місці, забезпечуючи безпеку працівників.

Патентне право захищає винаходи та інновації в нанотехнологіях, заохочуючи продовження досліджень і розробок. WTO забезпечує справедливу та недискримінаційну торговельну практику, включно з нанотехнологічними продуктами.

Однак, незважаючи на існуючі рамки, є кілька невирішених проблем:

- мозаїка нормативних актів може призвести до плутанини, неузгодженості та труднощів із застосуванням;
- обмеженість даних про потенційні ризики різних наноматеріалів ускладнює ефективне регулювання;
- відсутність міжнародної гармонізації в нормативних актах створює перешкоди для торгівлі та перешкоджає глобальним інноваціям;
- забезпечення дотримання нормативних актів потребує ефективних механізмів забезпечення виконання та ресурсів.

Крім того, кілька нових областей потребують особливої уваги:

- шляхи регулювання наномедицини потребують ретельного розгляду безпеки, ефективності та етичних наслідків.
- потенційні екологічні ризики нанопестицидів вимагають жорсткого регулювання та моніторингу.

- утилізація та обробка нановідходів потребують інноваційних та стійких рішень для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Наразі реалізується кілька ініціатив для вирішення регуляторних проблем:

- робоча група ОЕСР з нанотехнологій сприяє міжнародному співробітництву з питань безпеки нанотехнологій і обміну передовим досвідом.
- технічний комітет ISO 229 розробляє міжнародні стандарти для нанотехнологій, спрямовані на глобальну гармонізацію та послідовність.
- багато країн інвестують у дослідження та розробки, щоб усунути нормативні прогалини та підтримати розвиток безпечних нанотехнологій.

Нормативно-правовий ландшафт навколо нанотехнологій швидко розвивається. Хоча існуючі рамки забезпечують основу для управління ризиками, необхідні постійні зусилля для вирішення нових викликів, сприяння гармонізації та забезпечення відповідального розвитку цієї трансформаційної технології. Постійні дослідження, міжнародна співпраця та інноваційні підходи мають вирішальне значення для забезпечення безпечного та ефективного застосування нанотехнологій для покращення суспільства.

### *Стратегії управління ризиками*

Комплексний аналіз життєвого циклу наноматеріалів, від синтезу до утилізації, має важливе значення для розуміння їх довгострокового впливу як на довкілля, так і на здоров'я людини.

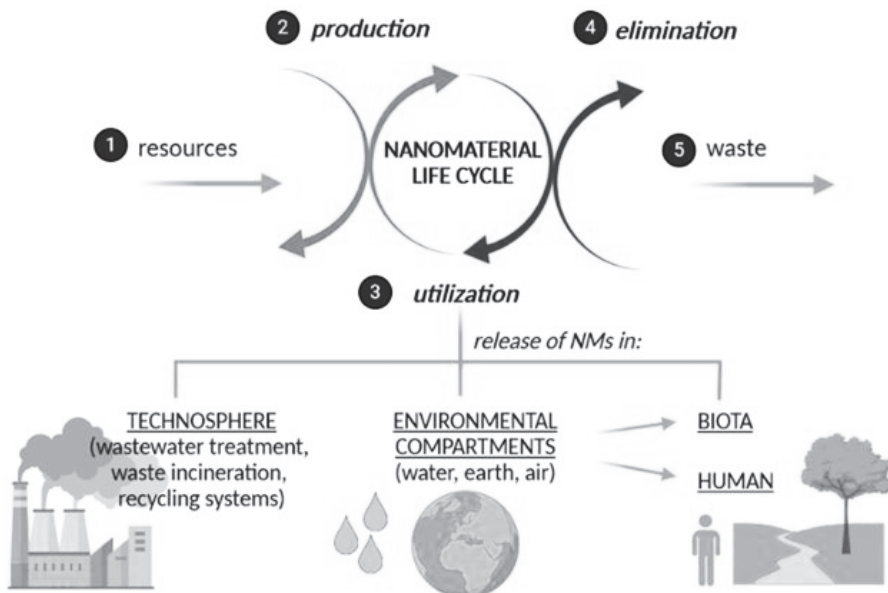


Рис. 1.12 Життєвий цикл наноматеріалів

[Zielińska, A., Costa, B., Ferreira, M. V., Miguéis, D., Louros, J. M. S., Durazzo, A., Lucarini, M., Eder, P., V. Chaud, M., Morsink, M., Willemen, N., Severino, P., Santini, A., & Souto, E. B. (2020). Nanotoxicology and Nanosafety: Safety-by-Design and Testing at a Glance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4657. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134657>]

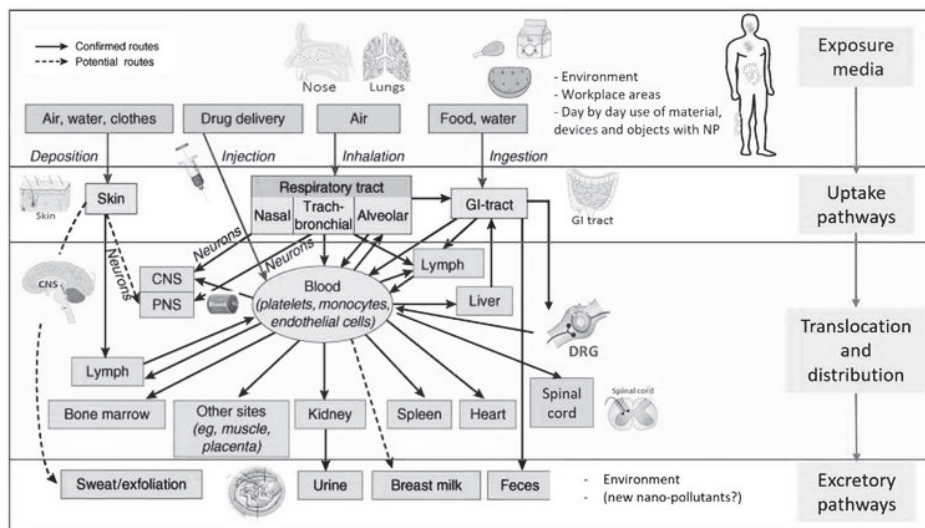


Рис. 1.13 Ризики використання наноматеріалів

[Lenz e Silva, G., Viana, C., Domingues, D., & Vieira, F. (2020). Risk Assessment and Health, Safety, and Environmental Management of Carbon Nanomaterials. In *Nanomaterials - Toxicity, Human Health and Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85485>]

Громадський діалог і освіта є незамінними для вирішення суспільних та етичних наслідків нанотехнологій. Прозоре спілкування між науковцями, політиками та громадськістю може сприяти прийняттю обґрунтованих рішень.

Поточні дослідження спрямовані на розробку наноматеріалів, які є не тільки ефективними, але й екологічно безпечними та біосумісними. Інтеграція етичних міркувань у процес досліджень і розробок є не просто додатком, а фундаментальною вимогою для відповідального розвитку нанотехнологій.

Таким чином, хоча перспективи нанотехнологій є надзвичайно багатообіцяючими, вони пов'язані зі складним набором етичних міркувань і міркувань безпеки, які вимагають прискіпливої уваги. Мультидисциплінарний підхід із залученням науковців, етиків, політиків і громадськості має вирішальне значення для орієнтування в етичному ландшафті цієї галузі.

### **1.5. Історичний екскурс**

Ідею маніпулювання матерією на нанорозмірі можна простежити до основоположної доповіді фізика Річарда Фейнмана під назвою «На дні є багато місця», виголошеної в 1959 році. Однак це відбулося лише до появи потужних методів визначення характеристик, таких як трансмісія. Електронна мікроскопія (ТЕМ) і скануюча тунельна мікроскопія (STM) наприкінці 20 століття, що поле справді почало об'єднуватися.

Після основоположної доповіді Фейнмана фізики-теоретики та хіміки почали розглядати наслідки квантової механіки для зменшених розмірів. Публікації наступних десятиліть почали досліджувати теоретичні основи явищ, які пізніше будуть

спостерігатися в реальних наноматеріалах.

Наприкінці 20 століття розвиток трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) надав вченим можливість спостерігати за матеріалами з атомною роздільною здатністю. Це була важлива віха, оскільки вона дозволила емпірично перевірити теорії та моделі щодо нанорозмірних явищ.

Винахід скануючої тунельної мікроскопії (СТМ) у 1981 році Гердом Біннігом і Генріхом Рорером став ще одним ключовим моментом. СТМ не тільки дозволив отримати зображення поверхонь з високою роздільною здатністю на атомному рівні, але й дозволив маніпулювати окремими атомами, тим самим зробивши бачення Фейнмана відчутною реальністю.

Такі методи, як хімічне осадження з парової фази (CVD), були адаптовані та вдосконалені для полегшення контрольованого синтезу наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки та графен.

Золь-гель процеси були розроблені для синтезу наночастинок і нанокompatитів, пропонуючи відносно простий, але універсальний шлях для створення складних наноструктур.

Наприкінці 20-го та на початку 21-го століть відбулося зближення фізики, хімії, біології та техніки в пошуках розуміння та застосування наноматеріалів. Цей міждисциплінарний підхід став відмінною рисою галузі, прискорюючи як фундаментальні дослідження, так і технологічні програми.

Відкриття C<sub>60</sub>, також відомого як бакмінстерфуллерен або просто «бакіболс», у 1985 році стало важливою віхою, яка продемонструвала унікальні властивості та потенційне застосування нанорозмірних вуглецевих структур.

Виділення моношарового графену в 2004 році Андре Геймом і Костянтином Новосоловим, що згодом призвело до Нобелівської премії, ознаменувало ще один епохальний момент, що викликало інтенсивне дослідження двовимірних матеріалів.

Таким чином, наука про наноматеріали пройшла довгий шлях після прозорливої лекції Фейнмана. Від розробки найсучасніших методів визначення характеристик до синтезу нових наноматеріалів і злиття різних наукових дисциплін, історична траєкторія галузі демонструє досвід інтелектуальних пошуків і технологічних досягнень. Коли ми рухаємося вперед, історичний екскурс слугує лінзою для оцінки як подоланих викликів, так і величезних можливостей, які відкриються попереду.

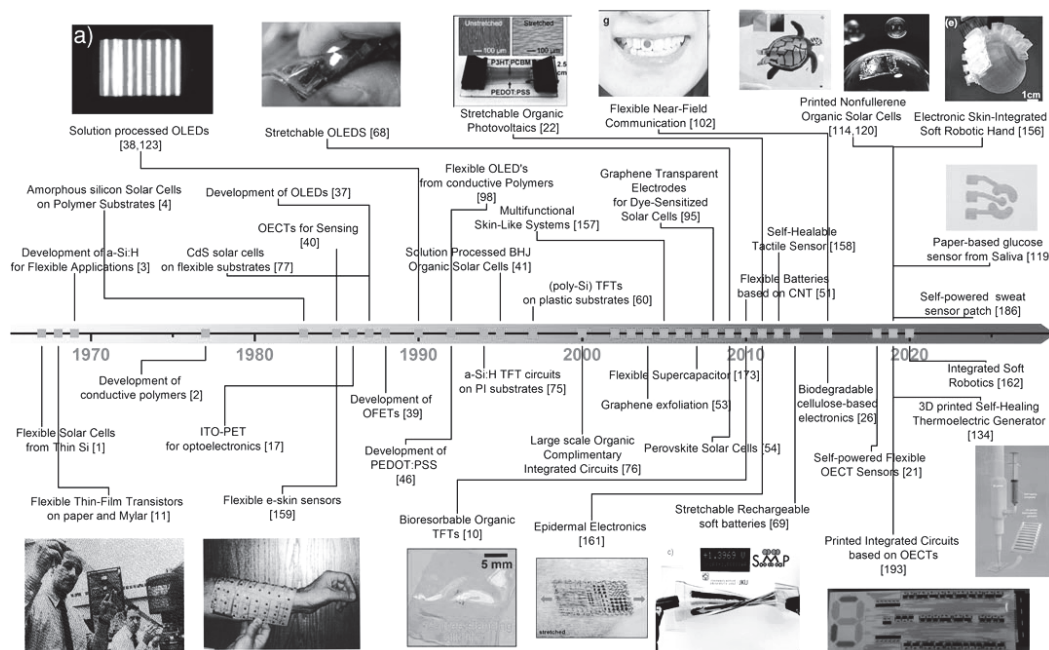


Рис. 1.14 Віхи розвитку нанотехнологій

[Corzo, D., Tostado-Blázquez, G., & Baran, D. (2020). Flexible Electronics: Status, Challenges and Opportunities. *Frontiers in Electronics*, 1. <https://doi.org/10.3389/felec.2020.594003>]

## 1.6. Унікальні властивості на нанорозмірі

### *Квантові ефекти*

Оскільки розміри матеріалу зменшуються до нанорозміру, квантово-механічні ефекти стають дедалі помітнішими, що призводить до безлічі унікальних явищ, які не спостерігаються в об'ємному матеріалі. Нижче ми пояснюємо, як квантові ефекти істотно впливають на різні властивості:

- Електронні властивості

Утримання електронів у зменшених розмірах призводить до квантованих рівнів енергії. Це квантування проявляється в дискретних електронних станах, які можуть суттєво змінювати електричну провідність та структуру електронної зони.

- Оптичні властивості

Квантове обмеження також впливає на оптичні властивості наноматеріалів. Наприклад, напівпровідникові квантові точки демонструють залежну від розміру флуоресценцію, коли колір випромінюваного світла можна налаштувати, просто змінюючи розмір квантових точок.

- Квантове тунелювання

Іншим цікавим квантовим явищем є квантове тунелювання, коли частинки рухаються через енергетичні бар'єри, які були б нездоланні в класичній механіці. Це використовується в таких пристроях, як тунельні діоди та скануючі тунельні мікроскопи (STM).

- Спінтроніка

Квантові ефекти також поширюються на спін електронів, відкриваючи двері для спінтроніки, яка має на меті використовувати спін електронів на додаток до заряду для обробки та зберігання інформації.

*Співвідношення поверхні до об'єму*

Однією з визначальних характеристик наноматеріалів є їхнє високе співвідношення поверхні до об'єму. Цей геометричний аспект забезпечує унікальні властивості, описані нижче:

- Хімічна реакційна здатність

Збільшена площа поверхні, доступна для хімічної взаємодії, робить наноматеріали високоактивними. Це особливо корисно в каталізі, де поверхня матеріалу є активним центром хімічних реакцій.

- Механічна міцність

Покращене співвідношення поверхні до об'єму також може призвести до підвищення механічної міцності. Наприклад, вуглецеві нанотрубки мають виняткову міцність на розрив завдяки своїм нанорозмірам і розташуванню атомів вуглецю.

- Теплові властивості

Високе співвідношення площі до об'єму також може вплинути на теплові властивості. Наприклад, нанодроти та нанотрубки часто демонструють суттєво різну теплопровідність порівняно з їх масивними аналогами.

- Адсорбційна здатність

Велика площа поверхні забезпечує більшу здатність до адсорбції, що є перевагою в таких застосуваннях, як зондування, де зв'язування молекул із поверхнею може призвести до вимірних змін електричних або оптичних властивостей.

Таким чином, нанорозмірність наділяє матеріали надзвичайними властивостями, керованими квантовою механікою та геометричними міркуваннями. Ці унікальні властивості не тільки кидають виклик нашому фундаментальному розумінню матеріалознавства, але й пропонують безпрецедентні можливості для застосування в багатьох дисциплінах.

### **1.7. Мультидисциплінарний характер науки про наноматеріали**

Наука про наноматеріали втілює злиття багатьох наукових дисциплін, кожна з яких вносить унікальні перспективи та методології, які збагачують наше розуміння та використання матеріалів у нанорозмірі. Нижче ми розглянемо внесок різних дисциплін у цю багатогранну сферу.

#### *Фізика*

Фізика забезпечує теоретичні основи, такі як квантова механіка та фізика твердого тіла, необхідні для розуміння електронних властивостей наноматеріалів. Ці теорії допомагають передбачати та пояснювати такі явища, як заборонена зона, електронна мобільність і квантовий розмір.

Принципи оптики та фотоніки у фізиці мають вирішальне значення для розуміння взаємодії світла та матерії на наномасштабі, як-от поверхневий плазмонний резонанс у металевих наночастинках або фотолюмінесценція в напівпровідникових квантових точках.

### *Хімія*

Хімія робить значний внесок у галузь завдяки різноманітним методам синтезу, таким як хімічне осадження з парової фази (CVD), золь-гель процеси та колоїдний синтез. Ці методи дозволяють контролювати виробництво наноматеріалів із бажаними властивостями.

Маніпуляції та функціональність поверхонь наноматеріалів часто керуються принципами хімії поверхні. Це життєво важливо для таких застосувань, як каталіз і доставка ліків, де поверхневі взаємодії відіграють ключову роль.

### *Біологія*

Перетин науки про наноматеріали з біологією призвів до новаторських біомедичних застосувань, від цільових систем доставки ліків до агентів біозображення. Принципи клітинної біології та фармакології використовуються для оптимізації біовзаємодій наноматеріалів.

Біологія також пропонує натхнення для розробки нових наноматеріалів, таких як імітація ієрархічних структур природних матеріалів для створення міцніших і пружніших синтетичних матеріалів.

## *Інженерія*

Інженерні принципи є незамінними для перетворення унікальних властивостей наноматеріалів у функціональні пристрої. Це включає проектування та виготовлення нанорозмірних транзисторів, фотонних пристроїв і систем зберігання енергії.

Інженерія також сприяє розширенню процесів виробництва наноматеріалів і комерціалізації продуктів на основі нанотехнологій, подолаючи розрив між лабораторними дослідженнями та промисловим застосуванням.

По суті, міждисциплінарний характер науки про наноматеріали є не просто особливістю, а необхідністю, оскільки складні проблеми та можливості, які відкривають нанорозмірні матеріали, вимагають цілісного міждисциплінарного підходу як для фундаментального розуміння, так і для практичного застосування. Ця інтегративна перспектива збагачує галузь, роблячи її квінтесенцією прикладу спільних наукових зусиль.

### **1.8. Перспективи на майбутнє**

Майбутній ландшафт науки про наноматеріали готовий до трансформаційних досягнень, каталізованих синергією нових технологій і міждисциплінарних досліджень. У цьому розділі висвітлюються перспективні тенденції та напрямки досліджень, які, ймовірно, сформують сферу в найближчі роки.

### *Інтеграція машинного навчання*

Алгоритми машинного навчання можуть просіювати величезні набори даних, щоб ідентифікувати закономірності чи кореляції, які можуть бути неінтуїтивно зрозумілими або громіздкими для людського аналізу. Це прискорює відкриття нових матеріалів шляхом прогнозування властивостей і поведінки на основі наявних даних.

Машинне навчання також можна використовувати для оптимізації умов для синтезу матеріалів, завдяки чому досягаються бажані властивості з вищою ефективністю та меншим споживанням ресурсів.

Розширені моделі машинного навчання можуть передбачати результати складних фізичних або хімічних процесів на нанорозмірі, полегшуючи розробку та розгортання наноматеріалів у конкретних програмах.

### *Поява квантових обчислень*

Квантові обчислення мають потенціал для моделювання квантових явищ із безпрецедентною точністю, пропонуючи глибше розуміння поведінки матеріалів на нанорозмірі. Це може призвести до відкриття матеріалів з новими квантовими властивостями.

Квантові алгоритми надзвичайно ефективні у вирішенні складних проблем оптимізації та пошуку, які є поширеними в дизайні та застосуванні матеріалів. Це може значно прискорити цикл розробки нових наноматеріалів.

### *Конвергенція дисциплін*

Ймовірно, майбутнє стане свідком ще більшої інтеграції фізики, хімії, біології та інженерії в цілісний підхід до проектування матеріалів, використовуючи сильні сторони кожної дисципліни для комплексних рішень.

Зближення науки про наноматеріали з геномікою та персоналізованою медициною може призвести до індивідуальних планів лікування, у яких наночастинки створюються відповідно до генетичного складу кожного пацієнта.

У міру розвитку сфери етичні та нормативні рамки повинні розвиватися одночасно, щоб управляти виникаючими ризиками та етичними дилемами, забезпечуючи відповідальний розвиток і впровадження нанотехнологій.

Таким чином, майбутнє науки про наноматеріали є не тільки багатообіцяючим, але й викликом, пропонуючи безліч можливостей для новаторських досліджень і трансформаційних застосувань. Інтеграція нових технологій, таких як машинне навчання та квантові обчислення, має намір прискорити темпи відкриттів, а постійна співпраця між кількома науковими дисциплінами збагатить глибину та широту галузі. Коли ми вирушаємо в це майбутнє, вкрай важливо орієнтуватися в ньому зі збалансованою перспективою, яка поєднує в собі наукову цікавість, технологічні інновації та етичну відповідальність.

### **1.9. Огляд дисципліни та структура курсу**

#### *Мета дисципліни*

Курс «Наноматеріалознавство» має на меті забезпечити

всебічне розуміння матеріалів на нанорозмірі, зосереджуючись на їх синтезі, характеристиках, властивостях і застосуванні. Основна мета полягає в тому, щоб озброїти здобувачів вищої освіти фундаментальними знаннями та практичними навичками, необхідними для сприяння цій галузі.

### *Зв'язок з іншими дисциплінами*

Наноматеріалознавство за своєю суттю є міждисциплінарним, що включає принципи з:

*Фізика:* для розуміння електронної структури та квантових явищ.

*Хімія:* для синтезу матеріалів і функціональності поверхні.

*Біологія:* для біомедичних застосувань і біонаноматеріалів.

*Інженерія:* для виготовлення пристроїв і процесів масштабування.

Крім того, дисципліна також перетинається з такими сферами, як обчислювальна наука, етика та регуляторна політика, що робить її багатогранною сферою вивчення та дослідження.

### *Структура курсу*

Курс побудований таким чином, щоб забезпечити збалансоване поєднання теоретичних концепцій і практичних застосувань. Ця лекція служить вступним оглядом і готує основу для наступних лекцій, які забезпечать більш глибоке розуміння різних підкласів наноматеріалів, методів синтезу, методів визначення характеристик і застосувань. Нижче наведено короткий огляд наступних лекцій, включених до цього курсу.

*Лекція 2:* Підходи до класифікації наноструктур та опису процесів структуроутворення

У цій лекції будуть розглянуті різні методи класифікації наноструктур на основі їх розмірності, складу та функціональності. Крім того, будуть розглянуті механізми, що лежать в основі формування цих структур, такі як самозбірка та шаблонне зростання.

*Лекція 3:* Нормативне регулювання у сфері наноматеріалознавства

Враховуючи потенційні ризики, пов'язані з наноматеріалами, ця лекція буде зосереджена на існуючій нормативній базі та етичних міркуваннях.

*Лекція 4:* Методи синтезу наноструктур

Ця лекція має на меті забезпечити поглиблене розуміння різних методів синтезу, включаючи хімічне осадження з парової фази, золь-гель процеси та електрохімічні методи. Переваги та обмеження кожного методу будуть обговорені.

*Лекція 5:* Методи та підходи до оцінки якості нанотехнологічної продукції

Контроль якості має першорядне значення у сфері наноматеріалів. Ця лекція познайомить здобувачів вищої освіти підходами та технологіями, які спрямовано на підвищення рівня якості нанотехнологічної продукції, а також з кваліметричними методами оцінювання наноматеріалів

*Лекція 6.* Функціональне моделювання процесу синтезу наноструктур заданого рівня якості

Підсумкова лекція буде присвячена системі забезпечення якості наноструктур через управління процесом синтезу

наноструктур. Синтез наноструктур будемо розглядати як процес здійснення діяльності, що реалізується в певному часовому проміжку та в певній послідовності відповідно до заданих стадій та етапів. Тобто тут і далі будемо вважати, що «управління якістю» та «забезпечення якості» є синонімами, так як забезпечити якість наноструктур можливо тільки через управління цього процесу.

На завершення цей курс має на меті забезпечити надійну та всебічну освітню основу для розуміння науки про наноматеріали.

### **Перелік питань для самоперевірки**

Яка основна мета дисципліни «Наноматеріалознавство»?

Перелічіть принаймні три галузі, де наноматеріали мають трансформаційний потенціал.

Назвіть чотири наукові дисципліни, які внесли значний внесок у науку про наноматеріали.

Як фізика сприяє нашому розумінню наноматеріалів?

Опишіть роль біології в галузі науки про наноматеріали.

Чому наука про наноматеріали вважається міждисциплінарною галуззю?

Обговоріть важливість етичних міркувань у галузі науки про наноматеріали.

Як високе співвідношення поверхні та об'єму наноматеріалів впливає на їхні властивості?

Які унікальні електронні та оптичні властивості виникають завдяки квантовим ефектам у наноматеріалах?

Коротко поясніть, як машинне навчання може прискорити відкриття матеріалів у галузі науки про наноматеріали.

### **Теми для самостійного опрацювання**

**Явища на нанорозмірі (розділ 1.1):** зосередьте увагу на унікальних фізичних та хімічних процесах, які відбуваються на нанорозмірному рівні, та їх відмінностях від явищ у більших масштабах.

**Сфери застосування наноматеріалів (розділ 1.3):** проаналізуйте, як наноматеріали використовуються у різноманітних галузях і які проблеми вони допомагають вирішувати.

**Нормативно-правова база, етичні та безпекові міркування (розділ 1.4):** дослідіть, яким чином законодавство та етичні норми впливають на розвиток та застосування наноматеріалів.

**Історична ретроспектива наноматеріалознавства (розділ 1.5):** дослідіть ключові історичні віхи в розвитку наноматеріалознавства та їхній вплив на сучасні дослідження.

**Унікальні властивості на нанорозмірі (розділ 1.6):** оцініть, яким чином нанорозмірність впливає на властивості матеріалів і чому це має значення.

**Мультидисциплінарний характер науки про наноматеріали (розділ 1.7):** поясніть, як наноматеріалознавство об'єднує різні наукові області та сприяє міждисциплінарному підходу.

**Перспективи наноматеріалознавства на майбутнє (розділ 1.8):** сформулюйте, які інновації та напрямки розвитку можуть відкритися в галузі наноматеріалів у найближчому майбутньому.

### **Список використаних і рекомендованих джерел**

1. Fazira, I., & Mawardi, M. (2023). Development of textbooks to support merdeka curriculum learning on nanotechnology material for Phase E. *Jurnal Pijar Mipa*, 18(4), 508-516.

2. Hudson-Smith, N. V., Alvarez-Reyes, W., Yao, X., He, J., Rodriguez, R. S., Mitchell, S., ... & Haynes, C. L. (2023). NanoAdventure: Development of a Text-Based Adventure Game in English, Spanish, and Chinese for Communicating about Nanotechnology and the Nanoscale. *Journal of Chemical Education*, 100(6), 2269-2280.
3. Meng, X., Fan, K., & Yan, X. (2019). Nanozymes: an emerging field bridging nanotechnology and enzymology. *Science China Life Sciences*, 62, 1543-1546.
4. Murty, B. S., Shankar, P., Raj, B., Rath, B. B., & Murday, J. (2013). *Textbook of nanoscience and nanotechnology*. Springer Science & Business Media.
5. Pradeep, T. (2012). *Textbook of nanoscience and nanotechnology*. McGraw-Hill Education.
6. Kishen, A. (2016). *Nanotechnology in endodontics* (pp. 121-138). Cham, Switzerland: Springer.
7. Nikalje, A. P. (2015). *Nanotechnology and its applications in medicine*. *Med chem*, 5(2), 081-089.
8. Hornyak, G. L., Moore, J. J., Tibbals, H. F., & Dutta, J. (2018). *Fundamentals of nanotechnology*. CRC press.
10. Shah, A., Aftab, S., Nisar, J., Ashiq, M. N., & Iftikhar, F. J. (2021). Nanocarriers for targeted drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 62, 102426. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102426>
11. Zhang, S., Li, L., Chen, J., Chen, Z., Zhang, W., & Lu, H. (2019). Quantitative Imaging of Gd Nanoparticles in Mice Using Benchtop Cone-Beam X-ray Fluorescence Computed Tomography System. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(9), 2315. <https://doi.org/10.3390/ijms20092315>
12. Dizaj, S. M., Lotfipour, F., Barzegar-Jalali, M., Zarrintan, M. H., & Adibkia, K. (2014). Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, 44, 278-284.
13. Corzo, D., Tostado-Blázquez, G., & Baran, D. (2020). Flexible Electronics: Status, Challenges and Opportunities. *Frontiers in Electronics*, 1. <https://doi.org/10.3389/felec.2020.594003>
14. Franklin, A. D. (2015). Nanomaterials in transistors: From high-performance to thin-film applications. *Science*, 349(6249), aab2750. <https://doi.org/10.1126/science.aab2750>
15. Lu, Q., Zhao, Y., Huang, L., An, J., Zheng, Y., & Yap, E. H. (2023). Low-Dimensional-Materials-Based Flexible Artificial Synapse: Materials, Devices, and Systems. *Nanomaterials*, 13(3), 373. <https://doi.org/10.3390/nano13030373>
16. Su, H., & Hu, Y. H. (2020). Recent advances in graphene-based materials for fuel cell applications. *Energy Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1002/ese3.833>
17. Lakshmi, K. C. S., & Vedhanarayanan, B. (2023). High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices. *Batteries*, 9(4), 202. <https://doi.org/10.3390/batteries9040202>
18. Qu, X., Alvarez, P.J., & Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water research*, 47 12, 3931-46.

19. de Assis, G. C., de Jesus, R. A., da Silva, W. T. A., Ferreira, L. F. R., Figueiredo, R. T., & de Oliveira, R. J. (2021). Conversion of Plastic Waste into Supports for Nanostructured Heterogeneous Catalysts: Application in Environmental Remediation. *Surfaces*, 5(1), 35–66. <https://doi.org/10.3390/surfaces5010002>
20. Zhou, Y., Liu, Y., Zhang, M., Feng, Z., Yu, D.-G., & Wang, K. (2022). Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials*, 12(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/nano12071077>
21. Ramanathan, A. Toxicity of nanoparticles\_ challenges and opportunities. *Appl. Microsc.* 49, 2 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42649-019-0004-6>
22. Zielińska, A., Costa, B., Ferreira, M. V., Miguéis, D., Louros, J. M. S., Durazzo, A., Lucarini, M., Eder, P., V. Chaud, M., Morsink, M., Willemen, N., Severino, P., Santini, A., & Souto, E. B. (2020). Nanotoxicology and Nanosafety: Safety-by-Design and Testing at a Glance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4657. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134657>
23. Проценко, І. Ю., & Шумакова, Н. І. (2017). Наноматеріали і нанотехнології в електроніці.

## Лекція 2

### Підходи до класифікації наноструктур та опису процесів структуроутворення

Зміст:

2.1 Класифікація наноструктур

2.2. Методи отримання наноструктурованих шарів на поверхні

напівпровідників

Перелік питань для самоперевірки

Теми для самостійного опрацювання

Список використаних та рекомендованих джерел

#### 2.1 Класифікація наноструктур

Наноструктуровані напівпровідники становлять інтерес завдяки можливості застосування в фотоніці та мікроелектроніці. У наш час широко застосовуються тонкі плівки, нановіскери, квантові цяпки, нанозерна тощо. Різноманіття форм та видів наноструктур породжує проблему встановлення єдиного підходу до їх класифікації та визначення критеріїв, за якими слід оцінювати наноматеріали. Одним з перспективних напрямків є наноструктурування напівпровідникової поверхні з метою формування поруватого шару. Поруваті структури отримують на поверхні фосфіду індію, фосфіду галію, арсеніду галію, кремнію, германію тощо. Наноструктури, сформовані на поверхні цих напівпровідників, демонструють різноманіття форм, розмірів та кількості нанооб'єктів. З одного боку, це розширює межі застосування, з іншого – призводить до труднощів, пов'язаних з розробкою критеріального апарату оцінки показників якості наноструктур. Інтерес до цих структур викликаний, у першу чергу,

збільшенням площі ефективної поверхні. Це дозволяє використовувати ці структури як матеріал для створення фотоелектричних перетворювачів енергії. Актуальним є пошук шляхів уніфікації підходів до визначення морфологічних показників поруватих структур, який дозволить стандартизувати вимоги до наноматеріалів. Крім того, у поруватих структурах простежується наявність квантоворозмірних ефектів. Ця властивість зумовлює зсув піків фотолюмінесценції в короткохвильову частину спектру. Такий ефект стає корисним для застосувань поруватих шарів у лазерній технології. Однак до сьогодні не визначено загальний механізм утворення пор на поверхні напівпровідників. Недостатньо також досліджено вплив чинників, які зумовлюють мікроморфологію поверхні отримуваних структур.

Згідно з офіційною статистикою сьогодні вже зареєстровано 7497 промислових продуктів, які містять наноструктури. Таке широке застосування зумовлено різноманіттям наявних наноструктур, яких налічується більше 40 видів. Умовно ці види можна класифікувати за розмірністю наноструктур.

Під розмірністю структури розуміється кількість декартових вісей координат, необхідних для опису лінійних розмірів. Для визначення нанооб'єктів існує домовленість про те, що розміри цього об'єкта хоча б у одному з просторових напрямів повинні знаходитись у діапазоні (0,1–100) нм – такі об'єкти називають низькорозмірними. Низькорозмірні об'єкти поділяють на:

- нульвимірні / квазінульвимірні;
- одновимірні / квазіодновимірні;
- двовимірні / квазідвовимірні;

– тривимірні / квазітривимірні.

Також особливе місце займають структури з дробовою розмірністю  $D$ :  $1 < D < 2$  або  $2 < D < 3$  (гетероструктури, квазіґратки тощо). Відповідний підхід застосовується також до наноструктур, тільки в цьому випадку говорять про структурні елементи. Узагальнено згідно цієї класифікації можна виділити чотири типи розмірності нанооб'єктів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Класифікація нанооб'єктів за розмірністю

Розмірність	Назва	Тип наноструктури
0D	квазінульвимірні	квантові цятки, кластери
1D	квазіодновимірні	нанолапці, нанострічки, нановолокна, нанонитки
2D	квазідвовимірні	наноплівки, нанопласти
3D	квазітривимірні	нанозерна, наноконструкції, надґратки, нанопори

Існує підхід до класифікації наноструктур за розміром, запропонований авторами роботи, згідно якої виділяють чотири типи наноматеріалів.

Перший тип містить тверді наноматеріали, розміри яких у одному, двох або трьох вимірах не перевищують 100 нм. До них традиційно відносять частинки (нанопорошки), нанодропи, нановолокна, тонкі плівки (товщиною менше 100 нм), нанотрубки тощо. Такі матеріали можуть містити від одного структурного елементу до декількох шарів. У зв'язку з цим цю категорію

класифікують як наноматеріали із малим числом структурних елементів або наноматеріали у вигляді нановиробів.

Друга категорія містить матеріали у вигляді малорозмірних виробів з характерним розміром у діапазоні від 1 мкм до 1 мм. До них належать дроти, нанострічки, нанофольги. Такі матеріали мають значне число структурних елементів. Їх прийнято класифікувати як наноматеріали з великим числом структурних елементів.

До третьої категорії відносять об'ємні наноматеріали з розмірами виробів у макродіапазоні (більше декількох мм). Такі матеріали складаються з дуже великого числа нанорозмірних елементів (кристалітів) і фактично є полікристалічними матеріалами з розміром зерна (1 – 100) нм.

До четвертої категорії належать композиційні матеріали, що містять в своєму складі компоненти з наноматеріалів. Узагальнено цю класифікацію наведено на рис. 2.1.

Одним з найпоширеніших підходів до класифікації наноструктур вважається класифікація за Глейтером (рис. 2.2).

Класифікація наноструктур за нанобазисом відображає різні походження наноструктур, а напрямок за топологією розділяє наноструктури по безперервності (табл. 2.2).

Зважаючи на вищевикладене виділимо ті підходи, які стосуються морфологічних властивостей наноструктур. Такі підходи дозволяють класифікувати наноб'єкти, синтезовані одним методом майже за однакових умов.

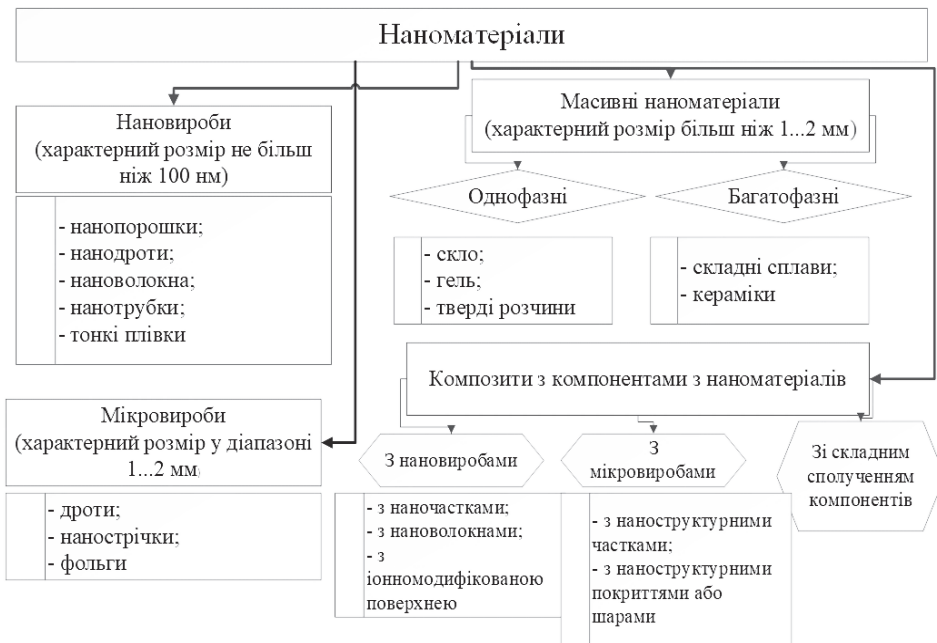


Рисунок 2.1 – Класифікація наноматеріалів

Форма	Склад і розподіл			
	Однофазний	Багатофазний		
		Статистичний		Матричний
Ідентичні межі	Неідентичні межі			
Пластиначата				
Стовпчата				
Рівноосьова				

Рисунок 2.2 – Класифікація наноматеріалів за Г. Глейтером

Таблиця 2.2 – Класифікація наноструктур за нанобазисом та топологією

За нанобазисом		
<i>Твердотільні НРС</i>	<i>Синтетичні НРС</i>	<i>Нанорозмірні біоструктури</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• наночастки;</li> <li>• нанотрубки;</li> <li>• діелектричні тонкі плівки;</li> <li>• квазіодномірні провідники;</li> <li>• квазінульмірні об'єкти;</li> <li>• нанокристали тощо</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• нанополімери;</li> <li>• синтетичні нановолокна;</li> <li>• синтетичні тонкі плівки;</li> <li>• наноколлоїди;</li> <li>• нанокристали</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• біомолекулярні комплекси;</li> <li>• модифіковані віруси;</li> <li>• органічні наноструктури</li> </ul>
За топологією		
<i>Безперервні, квазібезперервні НРС</i>	<i>Дискретні, квазінульмірні НРС</i>	<i>Комбіновані НРС</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• квазітрьохвимірні (багатошарові, з нанорозмірними дислокаціями, надграти, нанокластери);</li> <li>• квазідвухвимірні (тонкоплівкові);</li> <li>• квазіодновимірні (нанопровідники, нанотрубки)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• наночастинки;</li> <li>• квантові точки;</li> <li>• квантові ями;</li> <li>• нанорозмірні точкові дефекти;</li> <li>• елементи періодичних структур</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гетерогенні структури;</li> <li>• періодичні багатокомпонентні структури;</li> <li>• багатооб'єктні складні структури (фрактальні)</li> </ul>

Рис. 2.3 демонструє морфологічні підходи до класифікації наноструктур. Кожен з цих підходів характеризує наноструктури за однією з ключових морфологічних властивостей структур. Крім того, можна проводити класифікацію за хімічним складом, за фізичними характеристиками, за фазовим станом тощо.

Класифікація наноструктур за розміром є доволі умовною, однак загальноживаною. Згідно із класифікацією Міжнародного союзу теоретичної і прикладної хімії (IUPAC) мікроструктурами

вважаються об'єкти, один із розмір яких не перевищує 2 нм; мезоструктурами – розміри в діапазоні від 2 до 200 нм; макроструктури – більш ніж 200 нм.

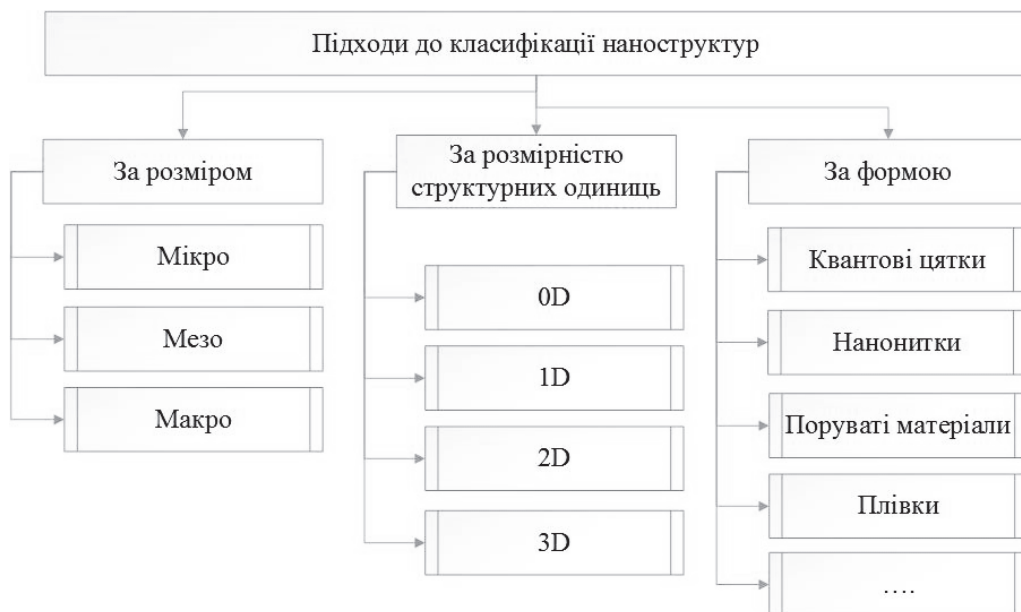


Рисунок 2.3 – Класифікації наноструктур за морфологічними ознаками

Представлені класифікації наноструктур не претендують на всеосяжність та повноту, існує ще безліч різних концепцій та узагальнень. Така ситуація складається через велике різноманіття типів наноструктур, що наразі проектуються та синтезуються дослідниками.

Значна кількість синтезованих наноструктур розширює галузі їх застосування. Через це виникають труднощі у встановленні єдиного підходу до управління виробництвом наноматеріалів і дослідженням їхніх властивостей. Основними причинами відсутності єдиного підходу до вимірювань параметрів і оцінки

властивостей наноструктур являються: відсутність чітких вимог і стандартів до якості наноматеріалів; відсутність стандартних зразків більшості наноматеріалів; недостатня кількість верифікованих методик вимірювань, калібрування та перевірки тощо.

## 2.2. Методи отримання наноструктурованих шарів на поверхні напівпровідників

Існує два способи синтезу наноструктур – «згори до низу» та «знизу до гори» (рис. 2.4).

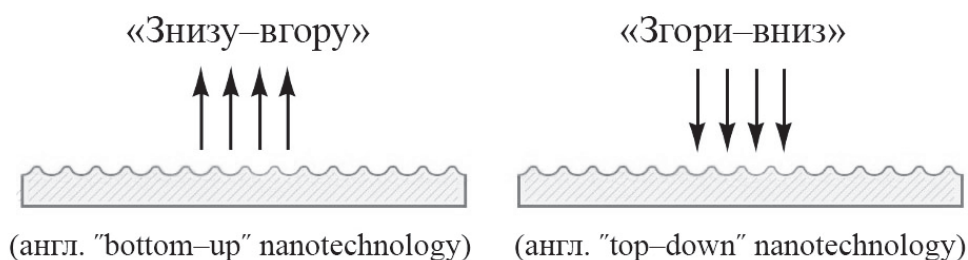


Рисунок 2.4 – Технології створення нанооб’єктів

Технологія типу «знизу-вгору» (англ. «bottom-up» nanotechnology) (рис. 2.4) – це технологія отримання наноструктурованих матеріалів, у якій реалізується отримання наночастинок з атомів і молекул, тобто досягається укрупнення вихідних елементів структури до частинок нанометрового розміру.

Технологія типу «зверху-вниз» (англ. «top-down» nanotechnology) – технологія отримання наноструктурованих матеріалів, у якій нанометровий розмір часток досягається за

допомогою подрібнення більших частинок, порошоків або зерен твердого тіла. Наразі активно розвиваються комбіновані методи.

Проте властивості та застосування наноструктур залежать від методу синтезу. Існує кілька хімічних і фізичних методів, які успішно використовуються для виготовлення наноструктур різних матеріалів. Популярними залишаються методи наплавлення на основі плазми, такі як:

- дуговий розряд;
- радіочастотне та магнетронне напилення;
- імпульсне лазерне осадження;
- модифіковані пристрої щільного плазмового фокусування (DPF) тощо.

Більшість із цих плазмових методів мають певні недоліки. Деякі з них вимагають підігріву або зміщення субстрату, надвисокого вакууму. Часто за допомогою цих методів неможливо досягти високої щільності нанокристалітів на поверхні, проте формуються значні ямки травлення та спостерігається вихід дефектів на поверхню. Більшість з цих методів мають обмеження, а саме:

- повільні темпи осадження;
- забруднюючі речовини;
- велике споживання енергії;
- необхідність у надвисокому вакуумі тощо.

Актуальним є пошук оптимального методу синтезу наноструктур на поверхні напівпровідників.

Напівпровідники, виготовлені у наномасштабі, демонструють різку зміну оптичних та електронних властивостей. Ці зміни обумовлені, насамперед, квантоворозмірними ефектами,

пов'язаними з квантуванням енергії носіїв заряду, рух яких обмежено в одному, двох або трьох напрямках. Властивості отримуваних наноструктур, у свою чергу, залежать від параметрів вихідного кристалу та методів синтезу.

Серед безлічі методів синтезу наноструктур хімічні й електрохімічні методи займають особливе місце, завдяки:

- дешевизні;
- простоті;
- малій кількості технологічних кроків;
- коротким термінам тривалості технологічного процесу тощо.

Короткочасне травлення кристалу викликає утворення фігур травлення (найчастіше ямок) і шарів розчинення на його поверхнях без втрати макроскопічних особливостей (макроморфології), у той час як тривале травлення сприяє виникненню макроскопічної форми, відмінної від початкової. Як мікро-, так і макроморфологія кристалів зумовлюються параметрами обробки. Крім того, травлення кристалів значно впливає на хімічний склад його поверхні.

Оскільки поверхня більшості напівпровідників групи *A3B5* характеризується високою щільністю поверхневих станів у забороненій зоні, то відбувається закріплення рівня Фермі. Його положення на поверхні практично не залежить від природи адсорбованих атомів. Ця обставина негативно впливає на роботу багатьох мікро- та оптоелектронних приладів, заважаючи в повній мірі розкрити високі потенціальні можливості напівпровідників.

Для стабілізації хімічних та електрохімічних властивостей наразі активно запроваджується метод хімічної пасивації. Технологія пасивації поверхні напівпровідника вирішує три

важливі технологічні задачі. По-перше, запобігає реакції напівпровідника з атмосферою протягом всього часу життя напівпровідникового приладу (хімічна пасивація). По-друге, усуває інтерфейсні стани із забороненої зони, а також попереджує їх подальше утворення (електрична пасивація). По-третє, забезпечує достатній бар'єр, щоб електрони напівпровідника не «загубилися» в пасивуючому шарі.

При хімічній пасивації з поверхні напівпровідника видаляється шар окислу, замість нього формується тонка кристалічна плівка хімічно інертного матеріалу. Така плівка може виконувати властивості надтонкого буферного шару та захищати поверхню напівпровідника від контакту з агресивними компонентами навколишнього середовища.

Однак важливим є не тільки стабілізація властивостей вже отриманих сполук, а контроль їхніх хімічних властивостей ще на етапі створення. Це дозволить значно покращити роботу приладів, які створюються на основі цих наноструктур. Основною проблемою при цьому є забезпечення відтворюваності експерименту для можливості подальшого серійного виробництва синтезованих структур. Для цього слід застосовувати показники, що базуються на основі статистичних методів. Тому аналіз властивостей поруватих наноструктур і встановлення якості випробувань є актуальною науково-прикладною задачею.

Необхідним є врахування комплексу чинників і дослідження кореляції їх з морфологічними властивостями наноструктур. Кожний з параметрів поруватої структури (розмір пори, товщина поруватого шару тощо) може бути результатом впливу не одного чинника, а їх сукупності. І навпаки, один чинник може корелювати

відразу із декількома параметрами наноструктури. Також невіршеними залишаються питання – які саме умови травлення впливають на морфологічні властивості отримуваних поруватих структур. Досі недостатньо досліджено закономірності, що зумовлюють розмір пори та поверхневу поруватість наноструктур. Виявлені суперечності й невіршені питання обумовлені:

- великою кількістю модифікацій методів електрохімічного травлення;

- різноманітністю напівпровідників та їхніх вихідних параметрів, що використовуються для формування поруватого шару;

- широким діапазоном умов, що забезпечують пороутворення на поверхні кристалу;

- відсутністю комплексного підходу до оцінки кореляцій між умовами травлення та морфологічними властивостями наноструктур.

При потенціостатичних умовах травлення, морфологія протравлених зразків сильно залежить від прикладеної напруги. Було виявлено, що анодування при (5 – 7) В, призводить до утворення високопоруватих шарів з механічно стабільних скелетів, які проявляють перколяції. У той же час переважне утворення нанодротів спостерігалось при збільшенні прикладеної напруги до 15 В. Механізми, що протікають на межі розділу «напівпровідник – електроліт», було досліджено в роботах.

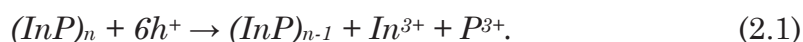
Сьогодні невіршеними залишаються питання критеріального апарату якості поруватих напівпровідників, регульованості їхніх властивостей та встановлення режимів, за яких можливим стає синтез структур із нормованими характеристиками. Недостатність

визначення кореляцій між умовами травлення та морфологічними характеристиками наноструктур породжує проблеми у створенні матеріалів із регульованими властивостями. Це зумовлює необхідність проведення досліджень у напрямку контролю якості наноструктурованих матеріалів у процесі синтезу.

Так, наприклад, цікаво дослідити технологічні особливості синтезу поруватих поверхонь на монокристалічній підкладці фосфіду індію  $n$ -і  $p$ -типу. Поруваті шари  $InP$  формуються за технологією електрохімічного травлення. При цьому використовують електроліти на основі кислот, етанолу та солей галогенів. Підтримання постійної температури при електрохімічному травленні забезпечують за допомогою циркуляції електроліту через термостат. Перед електрохімічним травленням з оборотної сторони пластини, як правило, наносять омичний контакт за допомогою вакуумного пристрою ВУП. Насправді процес утворення пор під час травлення є можливим у різних складах травника в широких інтервалах щільності струму та часу травлення. Так, дослідниками було отримано поруваті шари на поверхні фосфіду індію  $p$ -типу. У напівпровіднику  $InP$   $p$ -типу дірки є основними носіями. Було встановлено, що при анодній обробці зразків дірки рухаються до межі напівпровідник/електроліт суцільним фронтом та забезпечують реакційну здатність для всіх атомів на поверхні напівпровідника. За цих умов відбувається електрополірування поверхні. Для того, щоб відбувалося локальне розчинення атомів (для отримання поруватої структури), необхідно зменшити концентрацію дірок.

Для зменшення концентрації дірок у поверхневій області фосфіду індію було запропоновано освітлення зразків

поглинаючим світлом. При поглинанні світла напівпровідником *InP* *p*-типу в приповерхневій області утворюються електрони та дірки. Через викривлення зонної діаграми на межі розділу напівпровідник/електроліт дірки йдуть вглиб напівпровідника, поверхнева концентрація дірок зменшується. При цьому дисоціація атому фосфіду індію на поверхні на позитивно заряджені іони фосфору й індію відбувається за участі 6 дірок:



У результаті утворені іони індію та фосфору йдуть в розчин, завдяки цьому на мікропоглибленнях та дефектах формуються отвори – пори. Представлений механізм добре пояснює формування поруватої поверхні на монокристалі фосфіду індію діркового типу провідності, однак не дозволяє узагальнити ці результати на більш широке коло напівпровідників. Крім того, отриманих даних недостатньо для того, щоб зрозуміти механізми, за якими стає можливим формування поруватих напівпровідників з нормованими, заздалегідь заданими властивостями. Тому існує необхідність у встановленні кореляцій між технологічними чинниками синтезу наноструктур та їхніми набутими властивостями, а також виділення показників якості, за якими стає можливим оцінювання синтезованих наноструктур.

Також було досліджено вплив параметрів кристалу (кристаліграфічна орієнтація зразків, рівень легування) на процеси пороутворення в монокристалах *InP*. Процес травлення фосфіду індію відбувається з різною швидкістю по різних

кристалографічних площинах. Форма пор залежить від орієнтації поверхні (рис. 2.5).

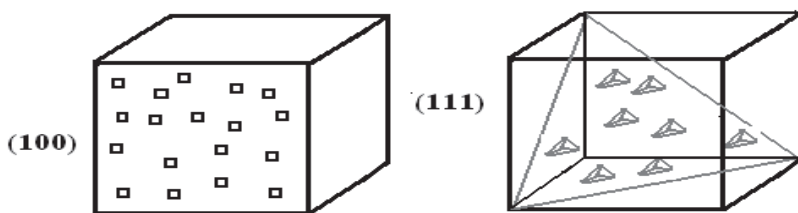


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення фігур травлення кристалів з орієнтацією поверхні (100) та (111)

Масиви трикутних пор формуються на монокристалах  $n$ -InP з орієнтацією поверхні (111) у водно-фторидному розчині. У кристалах з орієнтацією поверхні (100) ямки травлення мають форму, близьку до квадратної. Процес розтравлювання стінок між порами ускладнюється тим, що відбувається в напрямках, які характеризуються меншою швидкістю реакції. Одночасно з цим відбувається збільшення вхідних отворів пор. Тонкі стінки пор, які утворюються при цьому, стають стійкими до розчинення. Це призводить до локалізації процесу травлення на дні пор. Внаслідок цього утворюються глибокі довгі канали пор.

На мікроморфологію поруватого шару впливає концентрація неосновних носіїв заряду – з ростом легування кристалу ефективний діаметр пори зменшується, а їх концентрація лінійно росте.

На властивості синтезованих структур значним чином впливають також дефекти поверхні. Точкові поверхневі дефекти є місцями утворення первинних ямок травлення. Дислокації зумовлюють кількість пор та їхню концентрацію на одиницю площі

Методом селективного електрохімічного травлення в розчинах плавикової кислоти досліджують сегрегаційну неоднорідність розподілу компонентів домішки (сірки)  $InP$ , що виникає в процесі росту кристалу. У результаті на поверхні зразка утворюються концентричні кільця шириною 100 мкм, що є місцями скупчення пор (рис. 2.6). Показано, що більш щільне скупчення пор у центральних лініях сегрегації по відношенню до периферійних свідчить про збільшення концентрації сірки в напрямку від центру до периферії кристалу фосфіду індію.

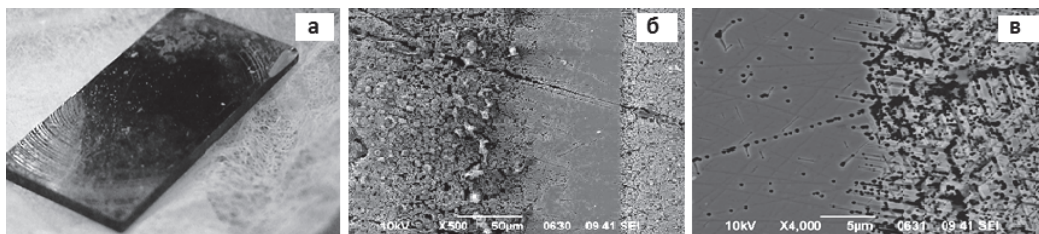


Рисунок 2.6 – Смуги, що з'явилися на поверхні кристалу  $InP$  ( $111$ )  $n$ -типу після селективного травлення в розчині  $Hf:C_2H_5OH:H_2O$  (1:2:1)

Розчинення кристалу в розчині є гетерогенним каталітичним процесом. Тому процес розчинення повинен містити послідовні етапи (рис. 2.7).

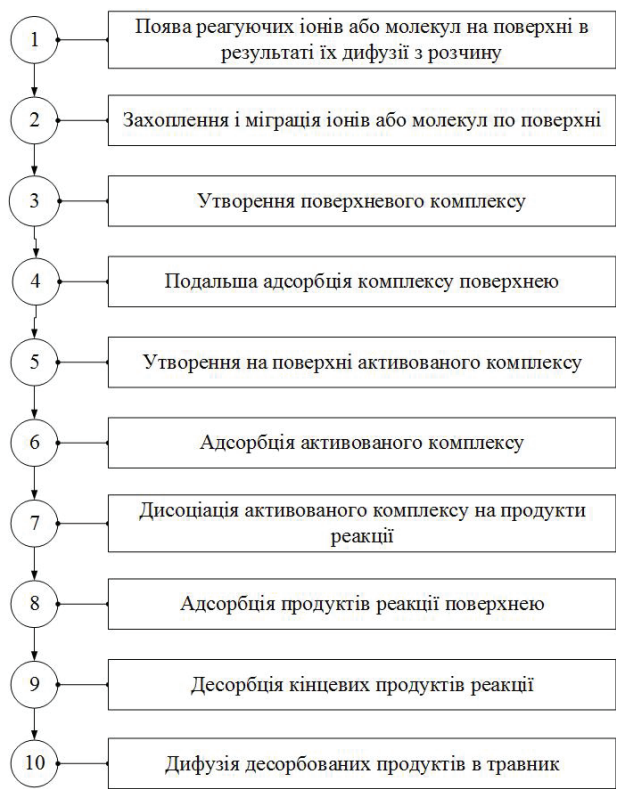


Рисунок 2.7 – Етапи розчинення кристалу під час електрохімічної обробки

Будь-який із цих етапів може стримувати процес травлення. Етапи 1 і 10 перенесення реагуючих речовин і продуктів реакції визначаються дифузійною кінетикою, тоді як всі інші етапи обмежуються швидкістю реакції між кристалом і травником, міграцією реагуючих і прореагувавших речовин по поверхні, а також поверхневими реакціями, включаючи адсорбцію. Деякі з етапів розчинення можуть бути важливими в певних системах, тоді як інші не відіграють вирішальної ролі в процесі травлення.

Ізотропне травлення кристалів характеризується тим, що видалення матеріалу відбувається по всім кристалографічним

площинам з однаковою швидкістю. Таке травлення застосовують, як правило, для зменшення шорсткості поверхні, тобто для хімічного або електрохімічного полірування напівпровідника. Як правило, використовуваний електроліт повинен містити азотну кислоту (як ізотропного травника) та фтористоводневу кислоту (як комплексоутворювача). Для сповільнення швидкості травлення застосовують оцтову кислоту.

Анізотропне травлення має велике значення для структурування напівпровідників і в основному пов'язано із різноманіттям швидкості травлення низькоіндексованих поверхонь кристалів. Для анізотропного травлення геометричні властивості кристалічної ґратки відіграють вирішальну роль.

Зазвичай досліджуються низькоіндексовані поверхні кристалу орієнтації  $\{111\}$ ,  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Кожен набір площин має свою відмінну поведінку в розчині. Однією з причин для визначення різноманітності кристалографічних площин може бути щільність атомів у цих кристалографічних площинах (висока щільність атомів відповідатиме низькій швидкості розчинення).

Експериментальні дані свідчать, що площини  $\{111\}$  розчиняються повільніше, ніж  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Це пояснюється тим, що площини  $\{111\}$  окислюються набагато швидше, тобто на них майже миттєво утворюються власний оксид, що не відбувається на поверхнях площин  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Таким чином, на поверхні кристалографічної площини  $\{111\}$  міститься пасивуючий шар, що перешкоджає анодному розчиненню кристалу. Швидкість розчинення окисного шару є меншою, ніж швидкість його наростання. Для подолання цього явища в складі травника

підвищують концентрацію комплексоутворювача (плавикової кислоти).

Величезна кількість підходів до опису процесів стуктурування під час електрохімічної обробки матеріалів породжує потребу в систематизації цих знань. Тому постає необхідність у встановлення принципів і закономірностей, на яких ґрунтується керування процесом формування пор на поверхні напівпровідників. Наноструктури, сформовані на поверхні напівпровідників демонструють різноманіття форм, розмірів та кількості нанооб'єктів. З одного боку, це розширює межі застосування, з іншого – призводить до труднощів, пов'язаних з розробкою критеріального апарату оцінки показників якості наноструктур. Актуальним є пошук шляхів уніфікації підходів до визначення морфологічних показників поруватих структур, який дозволить стандартизувати вимоги до наноматеріалів. Будь-який критеріальний апарат повинен ґрунтуватися на функціональному призначенні матеріалу. Говорити про якість наноструктур можливо лише з позицій практичного його застосування в конкретному приладі.

### **Перелік питань для самоперевірки**

Які основні чинники використовуються для класифікації наноструктур?

Назвіть принаймні три різні типи наноструктур на основі їх розмірності.

Як композиційні атрибути впливають на класифікацію наноструктур?

Яку роль відіграє функціональність у класифікації наноструктур?

Перелічіть два способи, які зазвичай використовуються для створення наноструктурованих шарів на поверхнях напівпровідників.

Чим підходи до класифікації наноструктур відрізняються від підходів до об'ємних матеріалів?

Чому важливо розуміти методи отримання наноструктурованих шарів на напівпровідниках?

Як вибір методу створення наноструктурованих шарів може вплинути на властивості кінцевого продукту?

Чи може одна наноструктура належати до кількох класифікаційних категорій? Наведіть приклад, якщо можливо.

### **Теми для самостійного опрацювання**

*Класифікація наноструктур (розділ 2.1)*

**Розмірність у наноструктурах:** зануртеся глибше в концепцію розмірності та як вона впливає на властивості та класифікацію різних наноструктур, таких як 0D (квантові точки), 1D (нанодроти) і 2D (графен).

**Функціональні класифікації:** досліджуйте різні способи класифікації наноструктур на основі їх функціональних застосувань, таких як зондування, доставка ліків або каталіз.

**Композиційні різновиди:** вивчайте вплив різних складів матеріалів на класифікацію наноструктур, включаючи сплави, композити та структури ядро-оболонка.

**Ієрархічна класифікація:** дослідіть, як наноструктури можна ієрархічно класифікувати на основі багатьох критеріїв, включаючи форму, розмір, склад і функціональність.

*Методи отримання наноструктурованих шарів на поверхні напівпровідників (розділ 2.2)*

**Хімічне осадження з парової фази (CVD):** зрозумійте механізми, переваги та обмеження використання CVD для створення наноструктурованих шарів на напівпровідниках.

**Молекулярно-променева епітаксія (МВЕ):** заглибтеся в принципи МВЕ і як її можна використовувати для отримання висококонтрольованих наноструктурованих поверхонь.

**Методи наплення:** дізнайтеся про різні методи наплення, такі як магнетронне розпилення та іонно-променевоє наплення, а також про те, як вони використовуються для створення наноструктурованих шарів.

**Методи самостійної збірки:** дослідіть роль самостійної збірки у формуванні наноструктурованих шарів і її порівняння з іншими методами з точки зору контролю та масштабованості.

### **Список використаних та рекомендованих джерел**

1. Pokropivny, V. V., & Skorokhod, V. V. (2008). New dimensionality classifications of nanostructures. *Physica E: Low-dimensional Systems and nanostructures*, 40(7), 2521-2525.
2. Pokropivny, V. V., & Skorokhod, V. V. (2007). Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. *Materials Science and Engineering: C*, 27(5-8), 990-993.
3. Nasrollahzadeh, M., Issaabadi, Z., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., & Atarod, M. (2019). Types of nanostructures. *Interface science and technology*, 28, 29-80.

4. Kustov, E. F., & Nefedov, V. I. (2008). Nanostructures: Compositions, structure, and classification. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 53(14), 2103-2170.
5. Kustov, E. F., & Nefedov, V. I. (2008). Nanostructures: Compositions, structure, and classification. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 53(14), 2103-2170.
6. Rafique, M., Tahir, M. B., Rafique, M. S., Safdar, N., & Tahir, R. (2020). Nanostructure materials and their classification by dimensionality. In *Nanotechnology and photocatalysis for environmental applications* (pp. 27-44). Elsevier.
7. Kustov, E. F. (2008). Theory and classification of nanostructure shells. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 5(3), 317-327.
8. Belenkov, E. A., & Greshnyakov, V. A. (2013). Classification schemes for carbon phases and nanostructures. *New Carbon Materials*, 28(4), 273-282.
9. Sannino, D. (2021). Types and classification of nanomaterials. *Nanotechnology: Trends and Future Applications*, 15-38.
10. Castagnola, V., Cookman, J., De Araújo, J. M., Polo, E., Cai, Q., Silveira, C. P., ... & Dawson, K. A. (2017). Towards a classification strategy for complex nanostructures. *Nanoscale Horizons*, 2(4), 187-198.
11. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I., Abdikadirova, A. A., Kenzhina, I., & Popov, A. I. (2023). Electrochemical Growth and Structural Study of the Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Nanowhisker Layer on the GaAs Surface. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5), 153. <https://doi.org/10.3390/jmmp7050153>
12. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I., Karipbaev, Z. T., Pankratov, V., & Popov, A. I. (2023). Study of the structural and morphological characteristics of the Cd<sub>x</sub>TeyO<sub>z</sub> nanocomposite obtained on the surface of the CdS/ZnO heterostructure by the SILAR method. *Applied Physics A*, 129(7). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06776-x>
13. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I., Popova, E., Moskina, A., & Popov, A. (2023). Characterization of Cd<sub>x</sub>TeyO<sub>z</sub>/CdS/ZnO Heterostructures Synthesized by the SILAR Method. *Coatings*, 13(3), 639. <https://doi.org/10.3390/coatings13030639>
14. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., & Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano

- inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (90)), 57–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118213>
15. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., & Onishchenko, S. (2017). Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (87)), 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104039>
16. Khrypunov, G., Vambol, S., Deyneko, N., & Sychikova, Y. (2016). Increasing the efficiency of film solar cells based on cadmium telluride. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (84)), 12–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85617>

## Лекція 3

### Нормативне регулювання в галузі наноматеріалознавства

Зміст:

- 3.1 Передумови нормативного регулювання нанотехнологій
  - 3.2 Загальні принципи Кодексу ЄС з відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки і нанотехнологій
  - 3.3 Напрямки діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі
  - 3.4 Стандарти ISO в галузі нанотехнологій
  - 3.5 Основні агентства в галузі стандартизації наноматеріалів
  - 3.6 Стандарти ISO 9000 та зони їх застосування у виробничому процесі
  - 3.7 Стандартизація наноматеріалів в Україні
- Перелік питань для самоперевірки
- Теми для самостійного опрацювання
- Список використаних та рекомендованих джерел

#### **3.1 Передумови нормативного регулювання нанотехнологій**

Сучасним трендом у галузі напівпровідникової технології є наноструктурування поверхні напівпровідників з метою надання нових властивостей, якими не володів вихідний матеріал. Відомо, що наноструктуровані матеріали володіють комплексом властивостей (фізичних, хімічних, біологічних, механічних тощо), які часто радикально різняться від властивостей цієї ж речовини в монокристалічній фазі. До специфічних властивостей наноматеріалів можна віднести:

- здатність до акумуляції;

- високий хімічний потенціал і, як наслідок, зміна розчинності, реакційної й каталітичної здатності;
- велика питома поверхня наноматеріалів, що призводить до підвищення значення адсорбційної ємності матеріалів;
- активні поверхневі стани;
- надмалі розміри й різноманітність типів наноматеріалів;
- висока адсорбційна активність, що є наслідком високорозвиненої поверхні наноматеріалу.

Усвідомлення зростаючої ролі наноматеріалів у різних галузях промисловості стало поштовхом до розроблення нанотехнологічних стратегій для урядів багатьох країн. Початком нормативного регулювання нанотехнологічної галузі можна вважати комюніке Єврокомісії «На шляху до європейської стратегії нанотехнологій», представлене в 2004 році в Люксембурзі. У цьому документі пропонується розробка інтегрованої системи та стратегії розвитку нанотехнологічної галузі. Продовженням цих закликів стала доповідь Європейського союзу (ЄС) «Нанонауки і нанотехнології: план дій для Європи 2005–2009 рр.» [8]. У цій доповіді представлено перелік заходів з реалізації стратегій нанотехнології. Реалізація цих стратегій знайшла своє відображення в 6-й та 7-й Рамкових програмах з наукових досліджень та технологічного розвитку ЄС. Напрямок «Нанонауки, нанотехнології, матеріали та нові виробничі технології» реалізовувався за такими векторами:

- нанонауки та нанотехнології;
- матеріали;
- нові процеси виробництва;
- інтеграція технологій для промислового використання.

Про необхідність державного та світового врегулювання наноматеріалів та їх визначення йдеться й у інших директивах та доповідях ЄС. У рекомендаціях ЄС визначено, що під «наноматеріалом» слід розуміти природний, виготовлений та супутній (побічний) матеріал, який містить частки (у вільному стані, у вигляді сукупності або агломерату), щонайменше 50% яких (у числовому розподілі за розміром) мають один або більше зовнішніх габаритів у діапазоні від 1 нм до 100 нм. В окремих випадках, коли це виправдано міркуваннями збереження довкілля, охорони здоров'я та безпеки, конкурентоспроможності, межа 50%, встановлена для розподілу за розміром, може бути замінена інтервалом від 1% до 50%.

### **3.2 Загальні принципи Кодексу ЄС з відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки і нанотехнологій**

У Кодексі ЄС з відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки і нанотехнологій містяться принципи, які є невід'ємною частиною організаційного механізму забезпечення якості досліджень та які необхідно включати в національне законодавство та процедури контролю й оцінки, здійснювані національними державними органами (рис. 3.1).

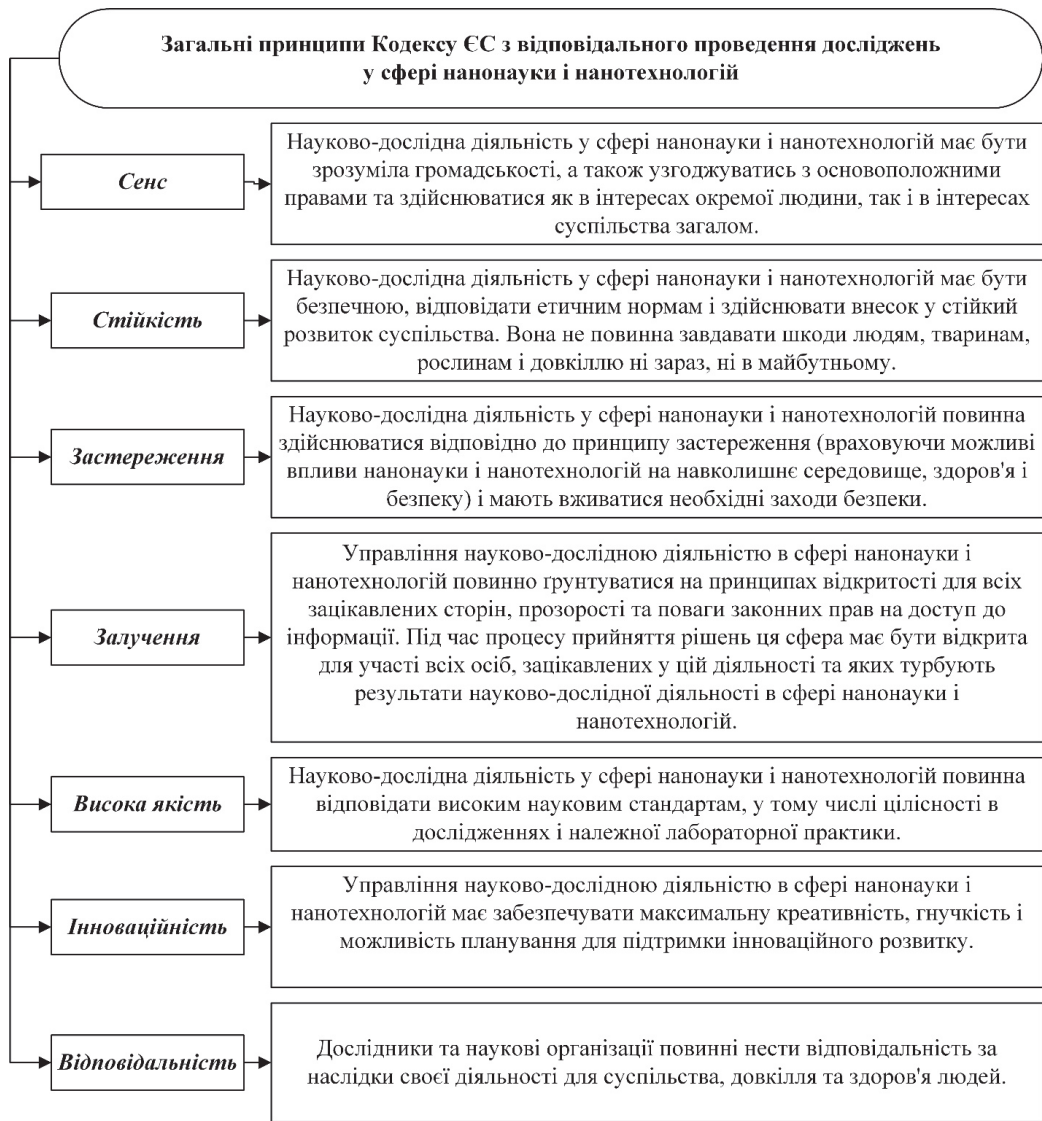


Рисунок 3.1 – Загальні принципи Кодексу ЄС з відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки і нанотехнологій

### **3.3. Напрямки діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі**

Продовженням Рамкових програм стала програма «Горизонт 2020», в якій виділено такі напрямки діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі:

1. Розробка нового покоління наноматеріалів, наноприладів та наносистем. Спрямування на фундаментально нову продукцію, що забезпечує надійні рішення в багатьох секторах.

2. Забезпечення безпечної розробки та використання нанотехнологій. Просування наукових знань про потенційний вплив нанотехнологій та наносистем на здоров'я або навколишнє середовище та забезпечення інструментів для оцінки ризиків й управління ними впродовж усього періоду експлуатації.

3. Розвиток суспільного виміру нанотехнологій. Зосередження на управлінні нанотехнологіями на користь суспільства.

4. Ефективний синтез та виготовлення наноматеріалів, компонентів і систем. Зосередження на нових операціях, розумному поєднанні нових та існуючих процесів, а також, на масштабуванні для досягнення масового виробництва продукції на універсальних установках, що забезпечує ефективну передачу інформації для створення промислових інновацій.

5. Розробка техніки, методів вимірювання та обладнання, що підвищує продуктивність, зосереджуючись на основних технологіях, які сприяють розвитку та виведенню на ринок складних наноматеріалів та наносистем.

### 3.4 Стандарти ISO

З розвитком нанотехнологій з метою їхнього впорядкування й приведення до єдиних норм було прийнято низку стандартів ISO, що стосуються як забезпечення безпеки нанотехнологій і наноматеріалів, так і методів їхнього синтезу, аналізу властивостей та визначення термінології. Організаційну роботу в цьому напрямку проводить спеціально створений Технічний комітет з нанотехнологій, що має найменування TC-229.

Спираючись на те, що нанотехнології розвиваються надшвидкими темпами, деякі з цих стандартів швидко втрачають термін дії та замінюються більш новими, деякі – ще тільки знаходяться в стадії розробки. Кількість таких стандартів становить близько 1000.

акож у розробленні знаходяться такі стандарти ISO:

– ISO/NP TS 10798 Nanotechnologies – Characterization of carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry (Нанотехнології. Характеристика вуглецевих нанотрубок за допомогою скануючої електронної мікроскопії та енергетично дисперсійної рентгенівської спектрометрії);

– ISO/DTS 16195 – Nanotechnologies – Guidance for developing representative test materials consisting of nano-objects in dry powder form (Нанотехнології. Посібник для розробки репрезентативних тестових матеріалів, що складаються з наноб'єктів у формі сухого порошку);

– ISO/NP TS 17200 – Nanotechnology – Nanoparticles in powder form – Characteristics and measurements (Нанотехнології.

Наночастинки в порошковій формі. Характеристики та вимірювання);

– ISO 19007 – Nanotechnologies – In vitro MTS assay for measuring the cytotoxic effect of nanoparticles (Нанотехнології. Аналіз in vitro МТС для вимірювання цитотоксичного впливу наночастинок);

– ISO/NP TR 19733 – Matrix of characterization and measurement methods for graphene (Матриця характеристик та методів вимірювання для графена);

– ISO/WD 19749 – Nanotechnologies – Measurements of particle size and shape distributions by scanning electron microscopy (Нанотехнології. Вимірювання розподілів розмірів і форм частинок за допомогою скануючої електронної мікроскопії) тощо.

Узагальнюючи, можна констатувати, що стандарти в галузі нанотехнологій стосуються термінів визначень та класифікації; керівництв та практик синтезу, застосування та утилізації; методів випробувань та характеристизації властивостей; забезпечення безпеки та оцінки ризиків; засобів і методів інформаційної підтримки, продукції наноіндустрії (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Класифікація стандартів у сфері нанотехнологій

### 3.5 Основні агентства в галузі стандартизації наноматеріалів

Питаннями нормативного регулювання в галузі нанотехнологій займається досить велика кількість організацій:

- Міжнародна Рада управління ризиками (International Risk Governance Council, IRGC);
- Агентство захисту навколишнього середовища США (Environmental Protection Agency - EPA);
- Агентство контролю й регулювання харчових продуктів та ліків США (Food and Drug Administration - FDA);

– Агентство по контролю за хімічною продукцією (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical Substances REACH);

– підкомітет експертів з глобальної гармонізації системи класифікації та маркування хімікатів (Sub - Committee of Experts on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals) Комітету експертів з транспортування небезпечних вантажів та по глобальній гармонізації системи класифікації та маркування хімікатів (Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals) Секретаріату ООН;

– Комісія Європейських Комітетів (Commission of the European Communities).

Цими організаціями, у свою чергу, розроблено ряд документів у галузі забезпечення безпеки наноіндустрії та її продукції:

– Recommendations for a global, coordinated approach to the governance of potential risks (Рекомендації по глобальному, скоординованому підходу до управління потенційними ризиками);

– Regulatory Aspects of nanomaterials (Регулювання в області виробництва і споживання наноматеріалів);

– Nanotechnology Safety Act of 2010 (Нанотехнологічний акт безпеки)

– Nanotechnology Law Report (Звіт по законотворчості в сфері нанотехнологій) тощо.

### 3.6 Стандарти ISO 9000 та зони їх застосування у виробничому процесі

Загальні засади управління якістю продукції визначені серією стандартів ISO 9000. Узагальнено сферу дії цих стандартів та основні зони їх застосування можна представити у вигляді схеми (рис. 3.3).

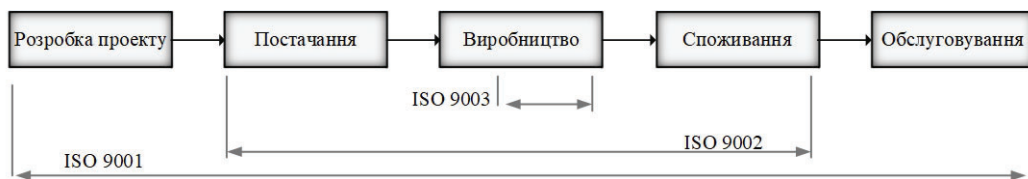


Рисунок 3.3 – Стандарти ISO 9000 та зони їх застосування у виробничому процесі: ISO 9001 – «Системи управління якістю. Вимоги»; ISO 9002 – «Системи якості. Модель для забезпечення якості при виробництві, монтажі та обслуговуванні»; ISO 9003 – «Система якості: модель забезпечення якості при остаточному контролі і випробуваннях»

Вимоги стандартів серії ISO 9000 є загальними й призначені для застосування всіма організаціями та підприємствами незалежно від їх виду, розміру й продукції. Якість – найважливіша споживча характеристика товару або послуги.

Поняття якості тісно пов'язано з сукупністю деяких властивостей та умов використання товару, які характеризують виріб з точки зору його призначення. Характерні ознаки формують також вимоги, яким повинен відповідати продукт, як на рівні проектних документів, так і в аспекті фактичних споживчих властивостей уже виготовленого товару. Стандарти серії ISO 9000

дозволяють запроваджувати системи управління якістю (СУЯ) на підприємствах.

Система управління якістю (СУЯ) відіграє роль складової частини загальної системи управління, яка забезпечує стабільність якості товару й підвищує ступінь задоволеності споживачів.

### **3.7 Стандартизація наноматеріалів в Україні**

В Україні нанотехнології включено до переліку середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2017–2021 роки. Це відображено в розділі «Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій» і містить напрямки:

1. Освоєння нових технологій отримання, оброблення і застосування композиційних та функціонально-градієнтних матеріалів.

2. Нові прогресивні матеріали та вироби з них для підприємств військово-промислового комплексу.

3. Промислове освоєння нових технологій отримання, оброблення і з'єднання конструкційних, функціональних та інструментальних матеріалів.

4. Створення індустрії нанотехнологій, наноматеріалів та виробництво продукції з них.

5. Освоєння нових технологій отримання, оброблення і застосування функціональних матеріалів у біології та медицині.

6. Створення нових матеріалів із застосуванням хімічних технологій.

7. Створення і виготовлення матеріалів для виробництва, акумуляції, збереження енергії, заміщення критичних матеріалів та охорони навколишнього природного середовища.

8. Створення матеріалів та технологій для 3D-прототипування.

Все це підтверджує, що питання синтезу наноструктур, уточнення термінології, виробничої безпеки в наноіндустрії й безпеки споживання її продукції активно досліджуються і розробляються.

### **Перелік питань для самоперевірки**

Які базові знання передбачають або вимагають, перш ніж заглиблюватися в нормативні положення в галузі науки про наноматеріали?

Які ключові принципи, викладені в Кодексі ЄС щодо відповідального проведення досліджень у сфері нанонауки та нанотехнологій?

Яким чином Кодекс ЄС спрямований на забезпечення етичної поведінки в дослідженнях у сфері нанотехнологій?

Які основні напрями діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі?

Як ці сфери взаємодіють із нормативно-правовою базою?

Яке призначення стандартів ISO у сфері нанотехнологій?

Чи можете ви назвати конкретний стандарт ISO, який широко застосовується в нанотехнологіях?

Які агентства несуть основну відповідальність за стандартизацію наноматеріалів?

## Теми для самостійного опрацювання

### *Передумови (розділ 3.1)*

**Правові рамки в науці:** ознайомтеся із загальними правовими рамками, які часто служать передумовами для розуміння нормативних положень у спеціальних галузях, таких як наука про наноматеріали.

### *Загальні принципи Кодексу ЄС (розділ 3.2)*

**Поглиблене вивчення Кодексу ЄС:** прочитайте повний текст Кодексу ЄС щодо відповідальної поведінки в галузі нанонауки та нанотехнологій, зосереджуючись на його цілях, принципах і механізмах забезпечення виконання.

**Порівняння з іншими кодексами:** порівняйте Кодекс ЄС із будь-якими подібними вказівками чи кодексами поведінки інших регіонів або міжнародних організацій.

### *Напрями діяльності щодо розвитку нанотехнологічної галузі (розділ 3.3)*

**Промислова політика та регулювання:** дізнайтеся, як уряди та міжнародні організації формують промислову політику для сприяння або регулювання галузі нанотехнологій.

**Етика в розвитку нанотехнологій:** дослідіть, як етичні міркування інтегровані в сфери діяльності для розвитку нанотехнологічної промисловості.

### *Стандарти ISO у сфері нанотехнологій (розділ 3.4)*

**Спеціальні стандарти ISO:** порівняйте спеціальні стандарти ISO, застосовні до нанотехнологій, наприклад ISO/TS 80004 (словник нанотехнологій) та ISO/TS 10797 (методи відбору зразків наночастинок).

**Роль стандартів ISO:** проаналізуйте, як стандарти ISO спрямовані на гармонізацію процесів дослідження, розробки та комерціалізації в нанотехнологіях.

*Основні агенції у сфері стандартизації наноматеріалів (розділ 3.5)*

**Агентства та їхні ролі:** складіть список основних агентств, які беруть участь у стандартизації наноматеріалів у всьому світі, і вивчіть їхні ролі та внески.

**Тематичні дослідження:** перегляньте тематичні дослідження, у яких ці агенції відіграли значну роль у стандартизації чи регулюванні.

*Стандарти ISO 9000 та їх застосування (розділ 3.6)*

**Поглиблено ISO 9000:** вивчайте сімейство стандартів ISO 9000 і те, як вони застосовуються в управлінні якістю виробництва наноматеріалів.

**Показники якості:** зрозумійте, які показники якості зазвичай використовуються в процесі виробництва наноматеріалів і як вони відповідають стандартам ISO 9000.

*Стандартизація наноматеріалів в Україні (Розділ 3.7)*

**Українські нормативні акти:** досліджуйте особливості стандартизації наноматеріалів в Україні, включаючи національні рекомендації, залучені агенції, а також те, як вони узгоджуються або відрізняються від міжнародних стандартів.

**Регуляторні виклики:** визначте проблеми та можливості, з якими стикається Україна під час узгодження стандартизації наноматеріалів з міжнародними нормами.

## Список використаних та рекомендованих джерел

1. Сичікова, Я. О. (2020). Стандартизація у сфері нанотехнологій: ретроспективний огляд. Стандартизація, сертифікація, якість, (3), 121.
2. Малишев, В. В., Кущевська, Н. Ф., Гладка, Т. М., & Заблоцька, О. І. (2013). Стандартизація в галузі нанотехнологій та наноматеріалів: напрямки розвитку, характеристика стандартів, термінологія. Строительные материалы и изделия, (3), 22-25.
3. Завражна, О. М., & Шевченко, Є. С. (2015). Нанотехнології: вплив на суспільство, проблеми стандартизації.
4. Пушкар, Г. О., Пахолюк, О. В., Галик, І. С., & Семак, Б. Д. (2022). Ключова роль стандартизації нанопродукції в процесі її комерціалізації в Україні. Вісник ЛТЕУ. Технічні науки, (29), 21-29.
5. Пушкар, Г. О., Галик, І. С., & Семак, Б. Д. (2021). Роль стандартизації у розвитку нанонауки, нанотехнологій і ринку нанопродукції в Україні та світі. Вісник ЛТЕУ. Технічні науки, (26), 109-115.
6. Soltani, A. M., & Pourpour, H. (2019). Standardization and regulations of nanotechnology and recent government policies across the world on nanomaterials. In *Advances in phytonanotechnology* (pp. 419-446). Academic Press.
7. Devasahayam, S. (2019). Nanotechnology and nanomedicine in market: a global perspective on regulatory issues. In *Characterization and Biology of Nanomaterials for Drug Delivery* (pp. 477-522). Elsevier.
8. Halamoda-Kenzaoui, B., Vandebriel, R. J., Howarth, A., Siccardi, M., David, C. A. W., Liptrott, N. J., ... & Caputo, F. (2021). Methodological needs in the quality and safety characterisation of nanotechnology-based health products: Priorities for method development and standardisation. *Journal of Controlled Release*, 336, 192-206.
9. Inshakova, E., & Inshakova, A. (2020). Nanomaterials and nanotechnology: prospects for technological re-equipment in the power engineering industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 709, No. 3, p. 033020). IOP Publishing.

10. Sharifi, S., Mahmoud, N. N., Voke, E., Landry, M. P., & Mahmoudi, M. (2022). Importance of standardizing analytical characterization methodology for improved reliability of the nanomedicine literature. *Nano-micro letters*, 14(1), 172.
11. He, X., Deng, H., Aker, W. G., & Hwang, H. M. (2019). Regulation and safety of nanotechnology in the food and agriculture industry. In *Food applications of nanotechnology* (pp. 525-536). CRC Press.
12. Zhu, Y., Qu, B., Andreeva, D. V., Ye, C., & Novoselov, K. S. (2021). Graphene standardization: The lesson from the East. *Materials Today*, 47, 9-15.
13. Hemmendinger, M., Wild, P., Shoman, Y., Graille, M., Bergamaschi, E., Hopf, N., & Canu, I. G. (2020). Reference ranges of oxidative stress biomarkers selected for non-invasive biological surveillance of nanotechnology workers: Study protocol and meta-analysis results for 8-OHdG in exhaled breath condensate. *Toxicology letters*, 327, 41-47.
14. Ramkumar, C., Vishwanatha, A., & Saini, R. (2019). Regulatory aspects of nanotechnology for food industry. In *Nanotechnology Applications in Dairy Science* (pp. 169-184). Apple Academic Press.

## Лекція 4

# Методи синтезу наноструктур і застосування напівпровідникових наноструктур для систем накопичення та зберігання енергії

### Зміст

- 4.1 Підходи «знизу вгору»
  - 4.2 Підходи «зверху вниз»
  - 4.3 Гібридні підходи
  - 4.4 Методи на основі шаблонів
  - 4.5 Хімічні й електрохімічні методи
  - 4.6 Ізотропне і анізотропне травлення кристалів
  - 4.7 Застосування напівпровідникових наноструктур для систем накопичення та зберігання енергії
  - 4.8 Проблеми низької конкурентоспроможності промислової нанотехнологічної продукції
- Перелік питань для самоперевірки
- Теми для самостійного опрацювання
- Список використаних та рекомендованих джерел

### 4.1 Підходи «знизу вгору»

У стратегіях «знизу вгору» наноструктури збираються з атомних або молекулярних компонентів за допомогою хімічних реакцій або механізмів самоскладання. Підходи "знизу вгору" в нанотехнології відіграють ключову роль у створенні наноструктур та наноматеріалів. Ця стратегія полягає в збиранні наноструктур з більш дрібних атомних або молекулярних компонентів. Такий процес часто включає хімічні реакції або механізми самозбірки, де компоненти природним чином організуються у більш складні структури.

Одним з прикладів є синтез наночастинок за допомогою хімічних реакцій, де атоми поєднуються, формуючи нанорозмірні кластери з визначеними фізичними та хімічними властивостями. Інший приклад - самоскладання молекул у визначені структури, як-от міцелі або кристалічні решітки, які можуть використовуватися в різних застосуваннях, від медицини до електроніки.

Цей підхід має декілька переваг. По-перше, він дозволяє створювати наноструктури з високим ступенем контролю над їх розміром, формою та функціональністю. По-друге, процеси "знизу вгору" часто вимагають менше енергії та матеріалів порівняно з традиційними методами. І, нарешті, вони дозволяють створювати складні структури, які були б важко або неможливо виготовити з використанням традиційних технологій.

Ці підходи "знизу вгору" відкривають широкі можливості у розвитку нових матеріалів та технологій, що можуть мати вирішальне значення для наукового прогресу та інновацій в різних галузях.

### *Хімічне осадження з парової фази (CVD)*

Хімічне осадження з парової фази (Chemical Vapor Deposition, CVD) є одним із ключових методів у виробництві тонких плівок та наноструктур. У процесі CVD гази-попередники вводяться в реакційну камеру, де вони реагують або розкладаються на поверхні підкладки (субстрату), що призводить до утворення тонкої плівки потрібного матеріалу.

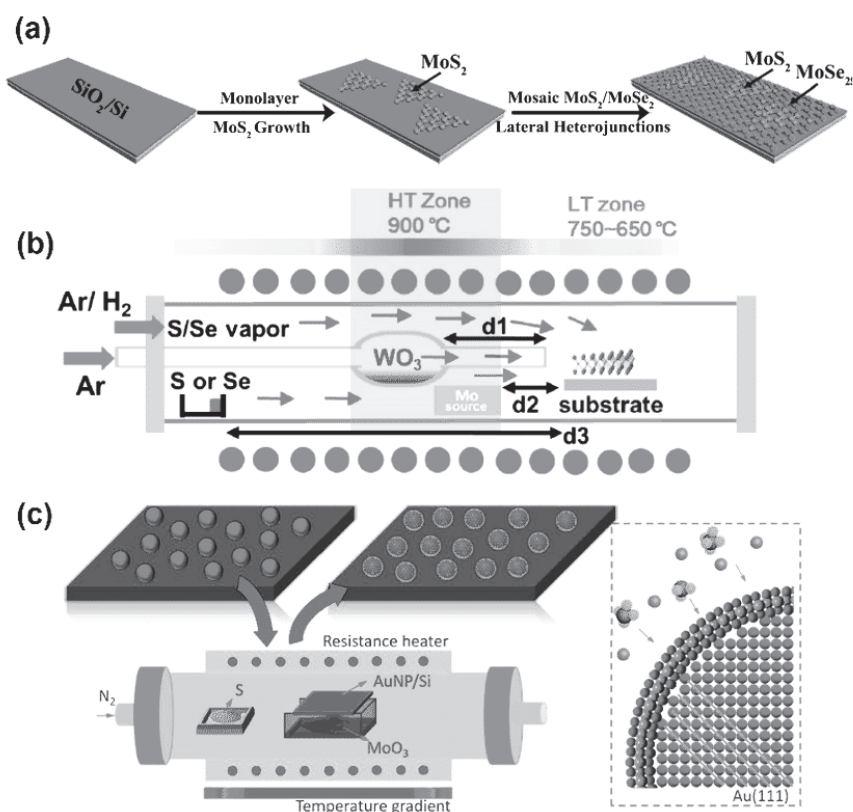


Рис. 4.1 Хімічне осадження з парової фази

[Qi, H., Wang, L., Sun, J., Long, Y., Hu, P., Liu, F., & He, X. (2018). Production Methods of Van der Waals Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides. *Crystals*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.3390/cryst8010035>]

Процес CVD включає кілька ключових кроків:

- 1. Транспортування газів-попередників:** гази доставляються до реакційної камери, де вони змішуються та переносяться до поверхні субстрату.
- 2. Хімічна реакція на поверхні субстрату:** при досягненні субстрату, гази-попередники реагують або розкладаються, часто за допомогою тепла, ультрафіолетового світла або плазми. Це веде до утворення тонкої плівки матеріалу на субстраті.

**3. Утворення тонкої плівки:** продукти реакції осідають на субстраті, формуючи тонку плівку.

CVD широко використовується для синтезу різноманітних матеріалів, включаючи графен та вуглецеві нанотрубки. Наприклад, у виробництві графену, метановий газ ( $\text{CH}_4$ ) часто використовується як вуглецеве джерело, яке при високій температурі розкладається на поверхні мідної підкладки, залишаючи одношаровий графен.

Переваги методу CVD включають можливість контролю товщини та якості плівок, а також можливість виробництва рівномірних та великих площ покриття. Однак, цей метод також може бути дорогим і часто вимагає високих температур та складного устаткування. Тим не менш, завдяки своїй гнучкості та ефективності, CVD залишається одним із найважливіших методів у сучасній нанотехнології.

### *Золь-гель методи*

Золь-гель процеси передбачають перехід системи з рідкого «золю» в тверду «гелеву» фазу. Ця методика зазвичай використовується для синтезу наночастинок оксидів металів і тонких плівок.

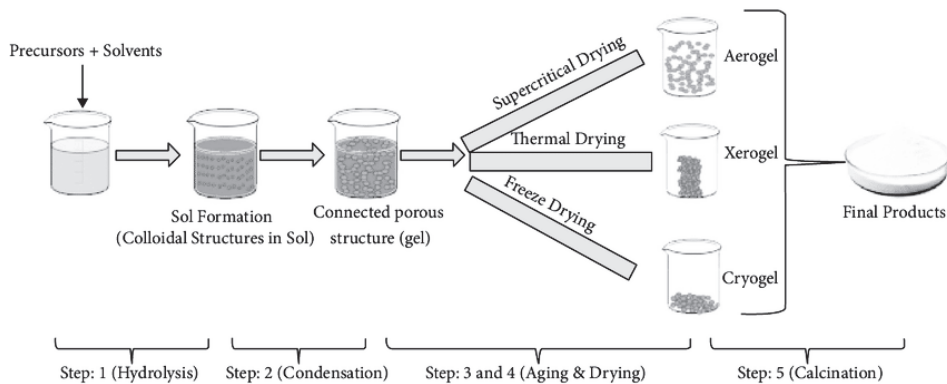


Рис. 4.2 Схеми золь-гель методу

[Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suksatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H., ... & Kianfar, E. (2021). Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-21.]

Основні етапи золь-гель процесу:

1. **Формування золю:** на цьому етапі відбувається розчинення металоорганічних або неорганічних сполук у розчиннику, утворюючи колоїдний розчин або золь. Це розчинене речовину складається з мікроскопічних частинок, розподілених у рідині.
2. **Гідроліз та конденсація:** під час гідролізу розчинені сполуки реагують з водою, утворюючи гідроксильні групи. Далі відбувається конденсація, де ці гідроксильні групи реагують між собою, формуючи полімерні ланцюги або мережу.
3. **Формування гелю:** у міру просування конденсації, розчин стає все більш в'язким, перетворюючись на гель - тверду, пористу структуру, яка все ще містить значну кількість розчинника.
4. **Висушування та прокалювання:** під час висушування з гелю видаляється розчинник, залишаючи твердий матеріал.

Прокалювання (випалювання) при високих температурах може бути використане для подальшого зміцнення структури та видалення будь-яких залишкових органічних або неорганічних компонентів.

Золь-гель метод використовується для створення широкого спектру матеріалів, зокрема тонких плівок, фібрів, пористих матеріалів, а також для виготовлення наночастинок із високим ступенем контролю над їх розміром, пористістю та хімічним складом. Ця техніка особливо ефективна для виробництва оксидних матеріалів, таких як діоксид кремнію або титану, і використовується у різних галузях, від електроніки до біомедичних застосувань.

## 4.2 Підходи «зверху вниз»

Підходи "зверху вниз" у нанотехнології полягають у створенні нанорозмірних структур шляхом розбиття більших матеріалів на менші частини, часто використовуючи фізичні методи. Цей підхід контрастує з методами "знизу вгору", де наноструктури створюються з атомів або молекул.

Основні характеристики підходів "зверху вниз" включають:

1. **Механічне подрібнення:** це один із найпростіших способів отримання наночастинок. Великі частинки матеріалу подрібнюються до нанорозмірів за допомогою різних механічних процесів, таких як мелення або фрезерування.
2. **Літографія:** у виробництві напівпровідників та мікроелектроніки використовуються різні форми літографії для створення мікро- та наноструктур. Літографія дозволяє

точно управляти розмірами та формами на поверхні матеріалу, видаляючи окремі частини за допомогою хімічного травлення або лазерного випаровування.

### **3. Електронно-променева або йонно-променева обробка:**

ці методи використовують фокусовані промені для точного видалення матеріалу з поверхні, дозволяючи створювати надзвичайно малі та точні структури.

Підходи "зверху вниз" мають переваги у тому, що вони дозволяють використовувати вже існуючі матеріали та технології, а також забезпечують високий ступінь контролю над кінцевими структурами. Однак вони також можуть бути обмежені у відношенні масштабів виробництва та ефективності для створення дуже малих або складних структур. В цілому, ці методи є невід'ємною частиною нанотехнологій та відіграють важливу роль у створенні різноманітних наноструктур і пристроїв.

#### *Механічне фрезерування*

Тут макроскопічні вихідні структури розбиваються на більш дрібні частини за допомогою механічних сил. Цей метод зазвичай використовується для виробництва металевих і композитних наночастинок.

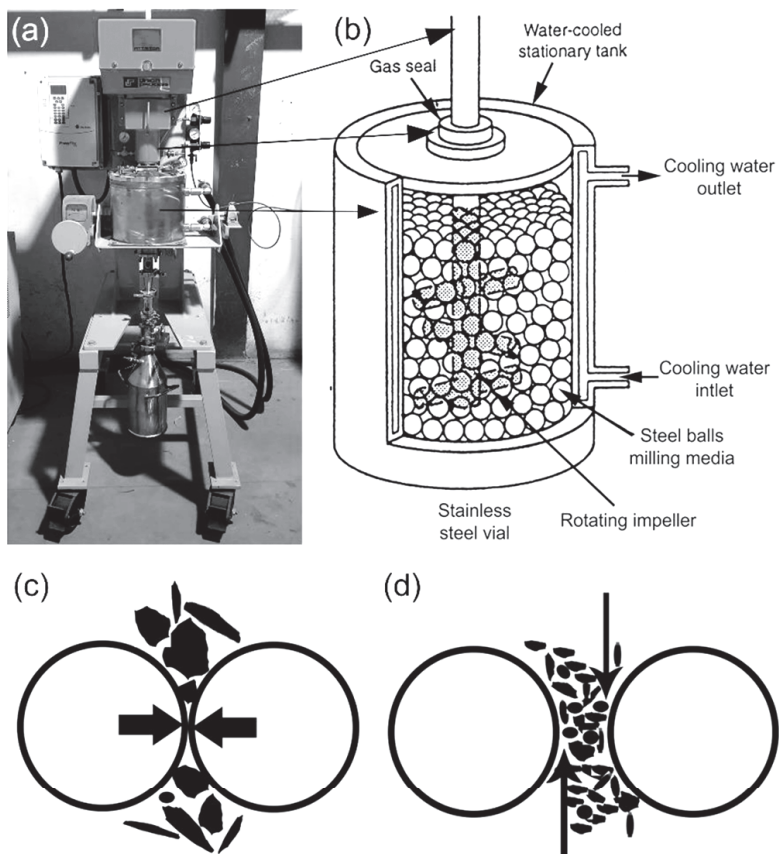


Рис. 4.3 – Метод механічного фрезерування

[El-Eskandarany, M. S., Al-Hazza, A., Al-Hajji, L. A., Ali, N., Al-Duweesh, A. A., Banyan, M., & Al-Ajmi, F. (2021). Mechanical Milling: A Superior Nanotechnological Tool for Fabrication of Nanocrystalline and Nanocomposite Materials. *Nanomaterials*, 11(10), 2484. <https://doi.org/10.3390/nano11102484>]

Механічне фрезерування є одним із основних методів у нанотехнології для створення наночастинок, особливо металевих та композитних. Цей процес включає розбивання макроскопічних вихідних структур на дрібніші частини за допомогою механічних сил.

Основні особливості механічного фрезерування:

- 1. Процес подрібнення:** в механічному фрезеруванні використовуються шарові млини, де великі частки матеріалу

піддаються впливу механічних сил, таких як удари, тертя та здавлювання. Це веде до їх поступового подрібнення.

2. **Контроль розміру частинок:** процес дозволяє контролювати розмір отриманих частинок шляхом регулювання часу фрезерування, інтенсивності ударів та інших параметрів. Довший час фрезерування та більш інтенсивні удари зазвичай призводять до створення дрібніших частинок.
3. **Універсальність:** метод є універсальним і може застосовуватися до різних матеріалів, включаючи метали, сплави, кераміку та композити.
4. **Шкала виробництва:** механічне фрезерування ефективно для виробництва великих об'ємів наночастинок, що робить його практичним для промислового застосування.
5. **Виклики:** одним із основних викликів є управління теплом, що генерується під час фрезерування, оскільки надмірне тепло може змінити властивості матеріалів. Також існує ризик забруднення матеріалу частинками фрезерувального обладнання.

Загалом, механічне фрезерування залишається важливим і доступним методом для виготовлення наночастинок, здатним задовольняти вимоги як наукових досліджень, так і промислового виробництва.

### *Літографія*

Метод літографії передбачає використання масок і хімічного травлення для візерунка підкладки, таким чином визначаючи

наноструктури на її поверхні. Це особливо корисно у виробництві напівпровідників.

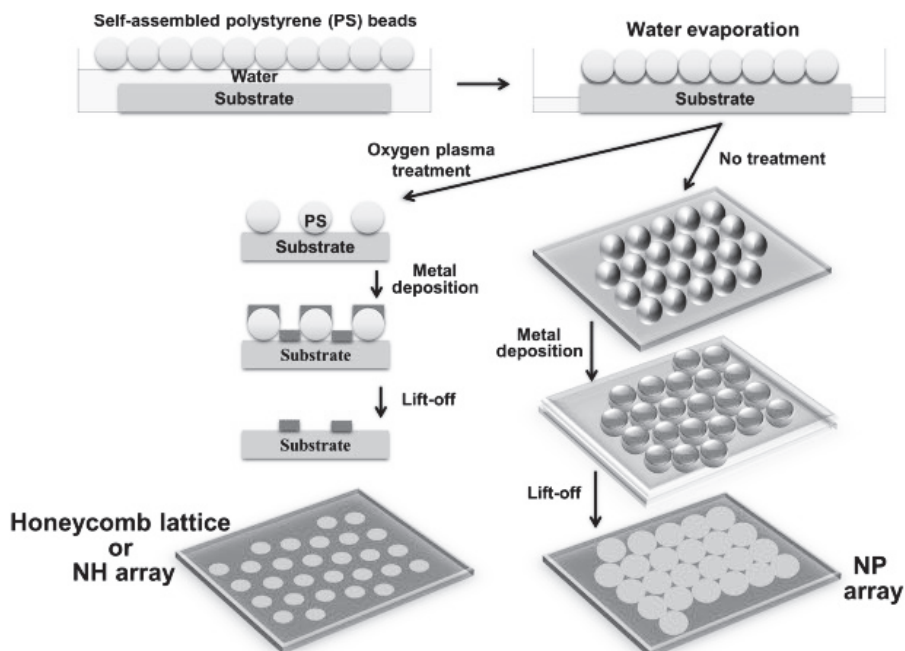


Рис. 4.4 Метод літографії

[Brady, B., Wang, P. H., Steenhoff, V., & Brolo, A. G. (2019). Nanostructuring Solar Cells Using Metallic Nanoparticles. In *Metal Nanostructures for Photonics* (pp. 197–221). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102378-5.00009-x>]

Літографія є ключовим методом у виробництві наноструктур, особливо у галузі напівпровідників. Цей процес включає створення візерунків на поверхні підкладки, які визначають розташування та форму майбутніх наноструктур.

Основні етапи літографії:

1. **Нанесення фоторезисту:** спочатку на поверхню підкладки наноситься фоторезист, світлочутлива речовина, яка змінює свої властивості під дією світла.
2. **Експонування через маску:** поверхню з фоторезистом висвітлюють через маску, яка має визначений візерунок. Це

призводить до зміни властивостей фоторезисту у ділянках, де відбулося висвітлення.

3. **Розробка:** після висвітлення фоторезист розробляється, при цьому розчиняються або зберігаються тільки ті області, які були висвітлені (або навпаки, в залежності від типу фоторезисту). Це створює візерунок на поверхні підкладки.
4. **Хімічне травлення:** потім використовується хімічне травлення для видалення областей підкладки, не захищених фоторезистом, відповідно до візерунка.
5. **Видалення фоторезисту:** на завершальному етапі залишки фоторезисту видаляються, залишаючи на поверхні підкладки визначені наноструктури.

Літографія особливо важлива у виробництві напівпровідників та інтегральних схем, де вона дозволяє точно визначити дрібні структури, необхідні для створення мікročипів та інших мікроелектронних компонентів. Сучасні методи літографії, такі як глибока ультрафіолетова літографія або електронно-променева літографія, дозволяють створювати структури з розмірами в нанометровому діапазоні, що є критично важливим для подальшого розвитку напівпровідникових технологій.

### 4.3 Гібридні підходи

Існують також методи, які поєднують стратегії «знизу вгору» і «згори вниз», використовуючи переваги кожної з них.

#### *Електропрядіння*

Під час електропрядіння розчин полімеру піддається дії електричного поля з утворенням струменя, який потім твердне з

утворенням нановолокон. Цей метод ефективно поєднує елементи самоскладання та механічного структурування.

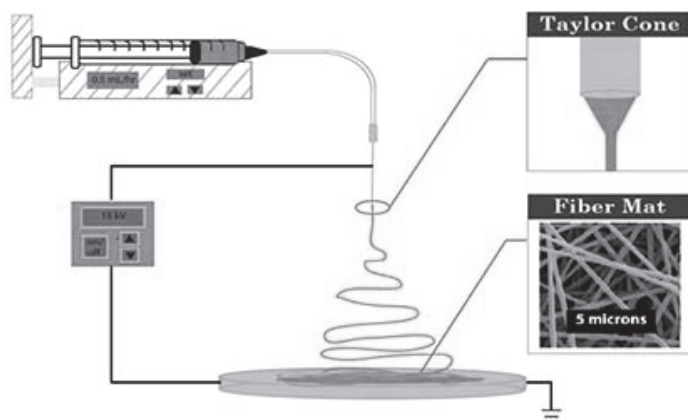


Рис. 4.5 Метод електропрядіння

[Introductory tutorial for electrospinning <https://www.nanofiberlabs.com/solutions/introductory-tutorial-for-electrospinning.html> ]

Основні етапи електропрядіння:

1. **Підготовка розчину полімеру:** спочатку готується розчин полімеру, який має певну в'язкість та електропровідність.
2. **Подача розчину через шприц або дюзу:** розчин полімеру подається через тонку дюзу або шприц під контрольованим тиском.
3. **Створення електричного поля:** розчин поміщається в електричне поле між дюзою та заземленим колектором. Електричне поле створюється між дюзою, з якої виходить розчин, і колектором, на якому збираються нановолокна.
4. **Формування нановолокон:** під дією електричного поля розчин розтягується, утворюючи тонкий струмінь, який летить до колектора. По дорозі струмінь висихає або твердне, утворюючи нановолокно.

**5. Депозиція на колекторі:** нановолокна осідають на колекторі, утворюючи нетканий матеріал.

Електропрядіння використовується для створення матеріалів з унікальними властивостями, таких як висока площа поверхні, пористість та гнучкість. Волокна, отримані цим методом, можуть застосовуватися у різних областях, включаючи біомедичні дослідження, фільтраційні системи, електроніку та текстильну промисловість. Перевагами електропрядіння є його простота, висока продуктивність та можливість контролювати розмір та морфологію нановолокон.

#### 4.4 Методи на основі шаблонів

Ці методи використовують «шаблон» або «форму» для визначення розміру та форми наноструктур.

##### *Наносферна літографія*

У цьому підході моношар сферичних частинок використовується як маска, а матеріал осідає через проміжки між сферами, в результаті чого утворюється наноструктурована поверхня.

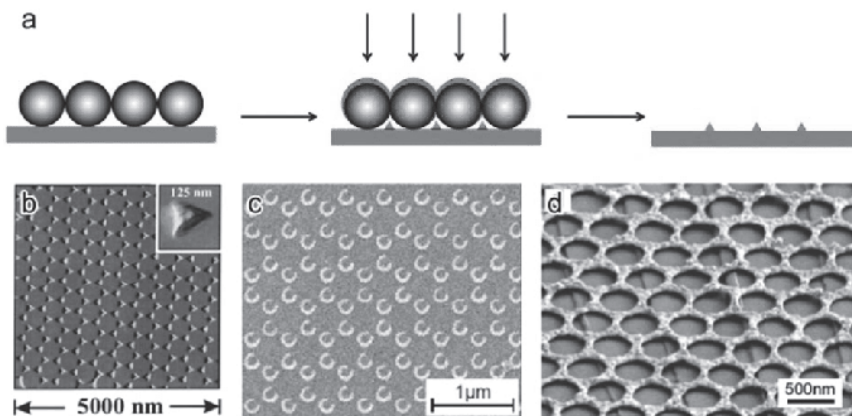


Рис. 4.6 Метод наносферної літографії

Наносферна літографія є інноваційним методом для створення наноструктур на поверхнях. Цей підхід використовує моношар сферичних частинок, які служать в якості маски для формування наноструктур.

Основні кроки наносферної літографії:

1. **Формування моношару сферичних частинок:** спочатку на поверхню підкладки наноситься моношар сферичних частинок, таких як полістиролові або силікагелеві кульки. Ці кульки утворюють регулярний шаблон на поверхні.
2. **Депозиція матеріалу:** потім через проміжки між сферичними частинками на поверхню осідає матеріал. Це може бути зроблено за допомогою різних методів, таких як хімічне осадження з парової фази або фізичне осадження з парової фази.
3. **Утворення наноструктур:** матеріал, що осідає на поверхню, формує наноструктури в проміжках між кульками. По завершенні процесу депозиції моношар сферичних частинок видаляється, залишаючи за собою візерунковану поверхню.
4. **Очищення поверхні:** після видалення маски поверхня очищається, в результаті чого утворюються регулярно розташовані наноструктури.

Наносферна літографія дозволяє створювати високоорганізовані наноструктуровані поверхні з високою точністю і регулярністю. Цей метод є ефективним для створення широкого спектру наноструктур, включаючи решітки, фотонні кристали та інші наноструктурні матеріали, які використовуються в

оптоелектроніці, біомедицині та сенсорних технологіях. Його переваги включають відносну простоту, низьку вартість та можливість масштабування для великих площ.

Таким чином, синтез наноструктур є складним процесом, який може бути досягнутий за допомогою різних методів, кожен зі своїм унікальним набором керівних принципів, переваг і недоліків. Розуміння цих загальних ідей має вирішальне значення для раціонального проектування та синтезу наноструктур із бажаними функціями, що дозволяє їх ефективно використовувати в широкому спектрі застосувань.

#### **4.5 Хімічні й електрохімічні методи**

Серед безлічі методів синтезу наноструктур хімічні й електрохімічні методи займають особливе місце, завдяки:

- дешевизні;
- простоті;
- малій кількості технологічних кроків;
- коротким термінам тривалості технологічного процесу тощо.

Короткочасне травлення кристалу викликає утворення фігур травлення (найчастіше ямок) і шарів розчинення на його поверхнях без втрати макроскопічних особливостей (макроморфології), у той час як тривале травлення сприяє виникненню макроскопічної форми, відмінної від початкової. Як мікро-, так і макроморфологія кристалів зумовлюються параметрами обробки. Крім того, травлення кристалів значно впливає на хімічний склад його поверхні. Так, було встановлено, що під дією світла на поверхні арсеніду галію після електрохімічної

обробки сформувався оксид арсену. Кластери оксидів формуються лише на тих ділянках кристалу, які освітлювали під час травлення. У водних та кислих розчинах відбувається значне окислення карбідів. Від умов окислення залежить морфологія отримуваних структур.

Оскільки поверхня більшості напівпровідників групи *A3B5* характеризується високою щільністю поверхневих станів у забороненій зоні, то відбувається закріплення рівня Фермі. Його положення на поверхні практично не залежить від природи адсорбованих атомів. Ця обставина негативно впливає на роботу багатьох мікро- та оптоелектронних приладів, заважаючи в повній мірі розкрити високі потенціальні можливості напівпровідників.

Хімічні та електрохімічні підходи до синтезу наноструктур заслуговують на особливу увагу через їх універсальність, ефективність і високий ступінь контролю, який вони пропонують над розміром, формою та складом отриманих матеріалів. Ці методи часто використовують маршрути на основі рішень і сприяють масштабованому виробництву. Нижче ми розглянемо основні особливості хімічних і електрохімічних методів синтезу наноструктур.

#### *Хімічне відновлення*

Один із найпростіших хімічних методів передбачає відновлення солей металів для синтезу металевих наночастинок. Наприклад, нітрат срібла можна відновити за допомогою борогідриду натрію в присутності стабілізуючого агента для отримання наночастинок срібла.

Ключові особливості методу такі:

- Простий і економічний
- Висока прибутковість
- Обмежений контроль над формою

Основні етапи хімічного відновлення:

1. **Підготовка розчину солі металу:** спочатку готується водний розчин солі металу, наприклад, нітрату срібла.
2. **Додавання відновлювача:** до розчину додається відновлювач, такий як борогідрид натрію. Ця речовина відновлює метал із його іонної форми до металеві.
3. **Утворення наночастинок:** під час реакції іони металу в розчині відновлюються до атомів металу, які потім агрегують, утворюючи наночастинок.
4. **Стабілізація наночастинок:** для запобігання агломерації (злипання) наночастинок і забезпечення їх стабільності в розчині зазвичай використовується стабілізуючий агент, такий як полівінілпіролідон (ПВП) або цитрат натрію.

Цей метод є одним із найпростіших і найефективніших для синтезу металевих наночастинок і має широкий спектр застосувань, включаючи електроніку, каталіз, медицину та біотехнології. Однак контроль розміру та форми наночастинок може бути складним і вимагає точного регулювання умов реакції.

#### *Сольвотермальний і гідротермальний методи*

Ці методи включають хімічні реакції в умовах високої температури та високого тиску, як правило, у герметичній посудині. Сольвотермальні методи використовують органічні розчинники, тоді як гідротермальні методи використовують воду.

*Ключові особливості:*

- підходить для широкого діапазону матеріалів;
- висока кристалічність;
- контроль за розміром і морфологією частинок.

Обидва методи використовуються для створення різноманітних наноструктур, зокрема кристалів, наночастинок та нанопорошків.

### 1. Гідротермальний метод:

- **Середовище:** гідротермальний синтез виконується у водному розчині, де вода служить розчинником.
- **Процес:** реакційна суміш поміщається у закриту ємність, таку як автоклав, і нагрівається до високих температур, часто вище точки кипіння води, під високим тиском.
- **Застосування:** гідротермальний метод широко використовується для синтезу кристалічних матеріалів, таких як цеоліти, оксиди металів та різноманітні мінерали.

### 2. Сольвотермальний метод:

- **Середовище:** в сольвотермальному синтезі використовуються інші розчинники, окрім води, наприклад, органічні розчинники.
- **Процес:** схожий на гідротермальний метод, сольвотермальний синтез також включає нагрівання реакційної суміші під високим тиском в закритій ємності.
- **Застосування:** цей метод дозволяє синтезувати наноматеріали з особливими властивостями, які можуть

бути недосяжні за допомогою гідротермального методу, залежно від вибору розчинника.

Обидва ці методи дозволяють точно контролювати розмір, форму та кристалічну структуру наноматеріалів, а також забезпечують високу чистоту та однорідність продукту. Вони використовуються у різних галузях, включаючи матеріалознавство, хімію, фізику та енергетику.

### *Електрохімічне осадження*

У цьому методі іони в розчині випадають у вигляді твердих частинок шляхом додавання осаджувача.

Ключові особливості:

- просто і швидко;
- масштабований;
- розміри частинок часто вимагають подальшого налаштування.

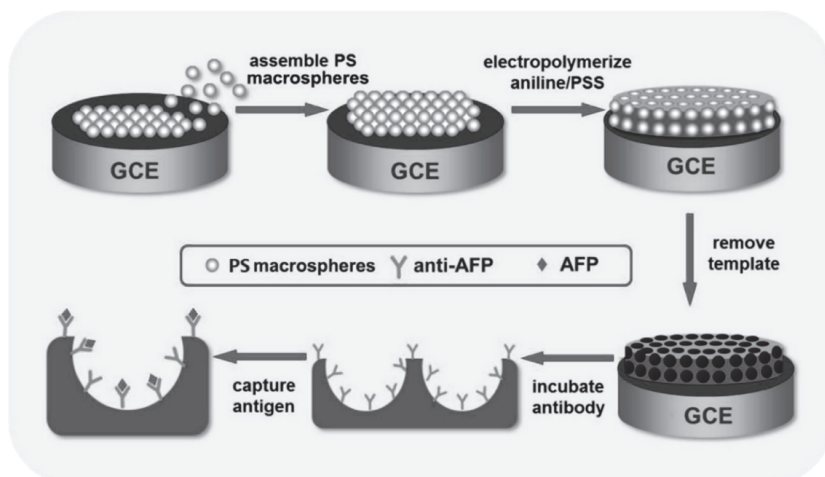


Рис. 4.7 Метод електрохімічного осадження

[Tonelli, D., Scavetta, E., & Gualandi, I. (2019). Electrochemical Deposition of Nanomaterials for Electrochemical Sensing. *Sensors*, 19(5), 1186. <https://doi.org/10.3390/s19051186>]

Основні аспекти електрохімічного осадження:

1. **Електрохімічна ванна:** процес здійснюється в електрохімічній ванні, де розчин містить іони, що мають осідати.
2. **Електроди:** ванна містить два електроди — анод та катод. Об'єкт, на якому потрібно сформувати покриття, зазвичай використовується як катод.
3. **Пропускання електричного струму:** коли через систему пропускається електричний струм, іони металів у розчині переміщуються до катода, де вони відновлюються (втрачають свої позитивні заряди) і осідають на поверхні як тверді частинки.
4. **Утворення покриття або наноструктур:** у результаті цього процесу на катоді формується тверде покриття, яке може бути металевим, полімерним або композитним, залежно від складу електроліту та умов електролізу.
5. **Контроль умов процесу:** шляхом регулювання параметрів, таких як щільність струму, час електролізу, температура та склад розчину, можна контролювати товщину, структуру та властивості осадженого матеріалу.

Електрохімічне осадження використовується у багатьох застосуваннях, включаючи виробництво електронних компонентів, захисних покриттів, сенсорів та наноматеріалів. Цей метод забезпечує високий рівень контролю над морфологією покриття, економічний і відносно простий у використанні.

## Електрохімічне травлення

Електрохімічні методи часто включають окислення або відновлення частинок на поверхні електрода, зануреного в електролітичний розчин. Зовнішнє електричне поле керує реакцією.

*Ключові особливості:*

- високий контроль над розміром і товщиною;
- підходить для тонких плівок і шаруватих структур;
- вимагає точного контролю електрохімічних параметрів.

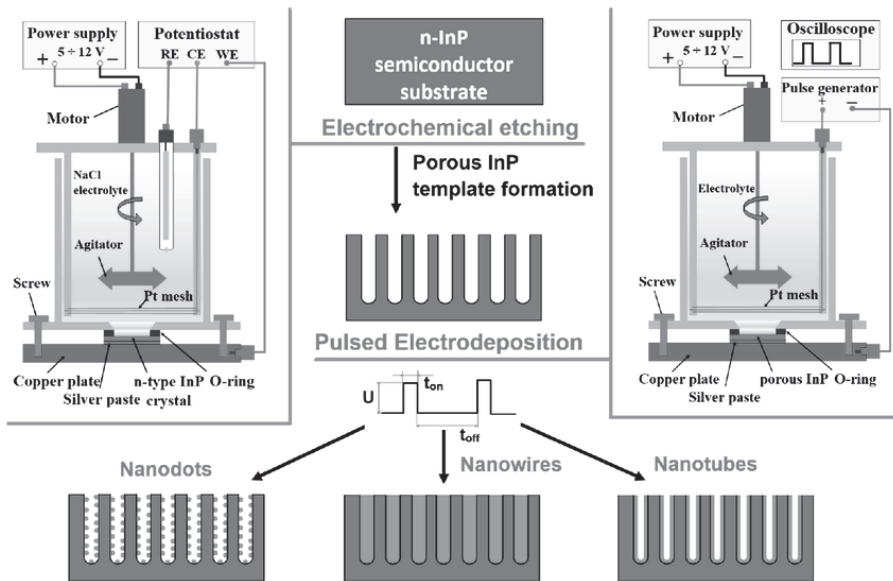


Рис. 4.8 Електрохімічне травлення

[Monaico, E. I., Monaico, E. V., Ursaki, V. V., & Tiginyanu, I. M. (2022). Controlled Electroplating of Noble Metals on III-V Semiconductor Nanotemplates Fabricated by Anodic Etching of Bulk Substrates. *Coatings*, 12(10), 1521. <https://doi.org/10.3390/coatings12101521>]

Електрохімічне травлення — це процес, який використовується для видалення матеріалу з поверхні об'єкта за допомогою електрохімічної реакції. Цей метод часто застосовується у

мікрофабрикації та обробці металів для створення гладких, високоточних поверхонь або для формування складних структур.

Основні характеристики електрохімічного травлення:

1. **Електрохімічна ванна:** процес відбувається в електрохімічній ванні, де розміщується електролітний розчин.
2. **Використання електродів:** об'єкт, який потрібно травити, функціонує як анод (позитивний електрод), а катод (негативний електрод) зазвичай виготовлений з інертного матеріалу.
3. **Пропускання електричного струму:** коли пропускається електричний струм, відбувається електрохімічна реакція, в результаті якої метал на поверхні аноду окислюється і розчиняється в електроліті.
4. **Контрольоване видалення матеріалу:** шляхом регулювання параметрів електролізу, таких як напруга, щільність струму та склад електроліту, можна контролювати швидкість та область видалення матеріалу з поверхні.
5. **Застосування:** електрохімічне травлення часто використовується для виготовлення мікроелектронних пристроїв, точної металообробки, а також для поліпшення поверхонь, наприклад, для зниження шорсткості.

Цей метод є ефективним для досягнення високої точності та якості поверхні, і він має перевагу у порівнянні з традиційними механічними методами травлення, оскільки дозволяє краще контролювати процес на мікроскопічному рівні.

### *Електрохімічний синтез за допомогою шаблону*

Тут нанопористий шаблон використовується в поєднанні з електрохімічним осадженням для визначення геометрії наноструктур.

#### *Ключові особливості:*

- високовпорядковані наноструктури;
- контроль співвідношення сторін;
- видалення шаблону може бути складним завданням.

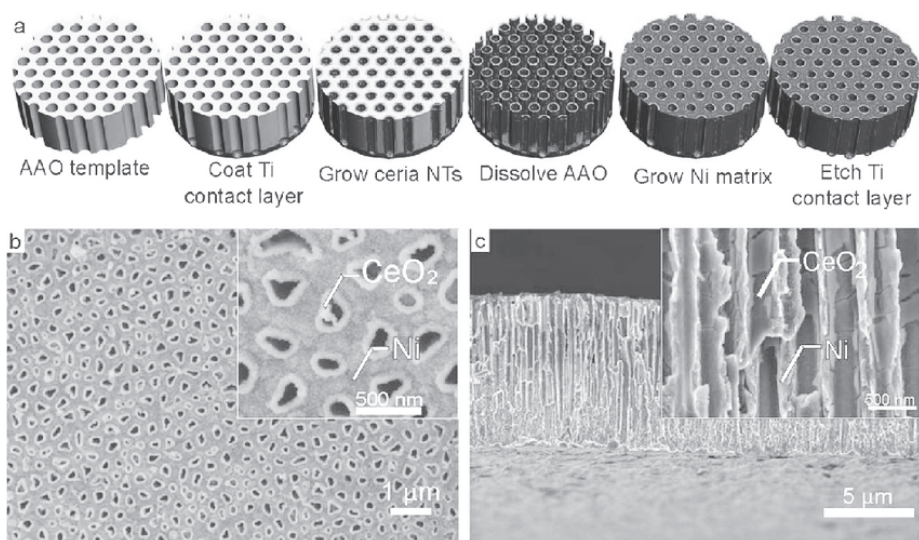


Рис. 4.9 Електрохімічний синтез за допомогою шаблону

[Zhang, C., Grandner, J., Liu, R., Lee, S. B., & Eichhorn, B. W. (2010). Heterogeneous films of ordered CeO<sub>2</sub>/Ni concentric nanostructures for fuelcell applications. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(17), 4295–4300. <https://doi.org/10.1039/b918587a>]

Електрохімічний синтез за допомогою шаблону — це метод, який комбінує електрохімічне осадження з використанням нанопористого шаблону для точного визначення геометрії та розмірів наноструктур. Цей підхід дозволяє створювати

високоорганізовані наноструктури з контрольованими властивостями.

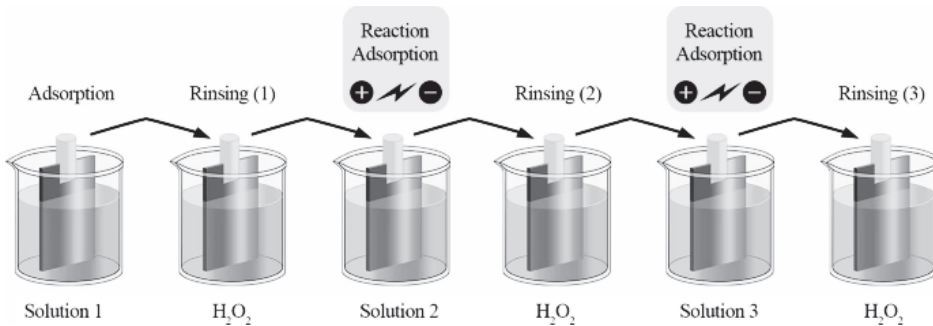
Основні кроки електрохімічного синтезу за допомогою шаблону:

1. **Вибір та підготовка шаблону:** використовується нанопористий шаблон, такий як анодний алюмінієвий оксид (ААО) або полікарбонатна мембрана з точно визначеними порами. Ці пори визначатимуть форму і розміри майбутніх наноструктур.
2. **Електрохімічне осадження:** шаблон поміщається в електролітний розчин, і на нього подається електричний струм, що спричиняє осадження матеріалу в порах шаблону.
3. **Формування наноструктур:** матеріал осідає у порах шаблону, утворюючи наноструктури, які повторюють форму та розміри пор. Наприклад, можуть утворюватися нанодроти, нанотрубки або наностовпчики.
4. **Видалення шаблону:** після завершення процесу осадження шаблон видаляється, залишаючи позаду організовані наноструктури. Шаблон може бути видалений хімічним травленням або іншими методами.

Електрохімічний синтез за допомогою шаблону має кілька переваг, включаючи високу точність у контролі розмірів та форми наноструктур, можливість створення великої кількості однорідних наноструктур, а також гнучкість у виборі матеріалів для осадження. Цей метод застосовується у різних галузях, зокрема у виготовленні електронних пристроїв, сенсорів та у біомедичних дослідженнях.

## SILAR метод

SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) — це хімічний метод виробництва тонких плівок, який широко використовується для синтезу наноструктур та покриттів. Метод SILAR включає послідовні цикли адсорбції іонів та їх реакції на поверхні, що дозволяє формувати шар за шаром структуру плівки.



### 4.10 SILAR метод

[Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I. et al. Study of the structural and morphological characteristics of the Cd<sub>x</sub>Te<sub>y</sub>O<sub>z</sub> nanocomposite obtained on the surface of the CdS/ZnO heterostructure by the SILAR method. Appl. Phys. A 129, 499 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06776-x>]

Основні етапи методу SILAR:

1. **Адсорбція:** підкладка занурюється в розчин, який містить іони одного з компонентів майбутнього матеріалу. Іони адсорбуються (притягаються та прилипають) на поверхні підкладки.
2. **Промивання:** після адсорбції підкладка промивається для видалення надлишкових іонів і запобігання утворенню небажаних реакцій або осадження.
3. **Реакція:** далі підкладка занурюється в інший розчин, який містить іони іншого компоненту. Тут відбувається хімічна реакція між адсорбованими іонами та цими новими іонами, утворюючи тверду фазу на поверхні підкладки.

4. **Повторення циклів:** ці кроки повторюються багато разів, що дозволяє поступово накопичувати шари матеріалу на підкладці.

Метод SILAR є відносно простим та економічно ефективним для виробництва тонких плівок. Він забезпечує хороший контроль над товщиною плівки та її складом. SILAR використовується для створення різноманітних матеріалів, включаючи напівпровідники, діелектрики та фотокаталізатори, і знаходить застосування в сонячних елементах, сенсорах, оптоелектронних пристроях та інших технологіях.

Підсумовуючи, хімічні та електрохімічні методи пропонують різноманітний інструментарій для синтезу наноструктур. Вибір методу часто залежить від бажаних властивостей наноструктур, включаючи їх розмір, форму, склад і кристалічність. Оволодіння цими методами синтезу є невід'ємною частиною розвитку галузі, забезпечуючи шлях для розробки інноваційних матеріалів із спеціальними функціями.

#### **4.6 Ізотропне і анізотропне травлення кристалів**

Ізотропне травлення кристалів характеризується тим, що видалення матеріалу відбувається по всіх кристалографічних площинах з однаковою швидкістю. Таке травлення застосовують, як правило, для зменшення шорсткості поверхні, тобто для хімічного або електрохімічного полірування напівпровідника. Як правило, використовуваний електроліт повинен містити азотну кислоту (як ізотропного травника) та фтористоводневу кислоту (як

комплексоутворювача). Для сповільнення швидкості травлення застосовують оцтову кислоту.

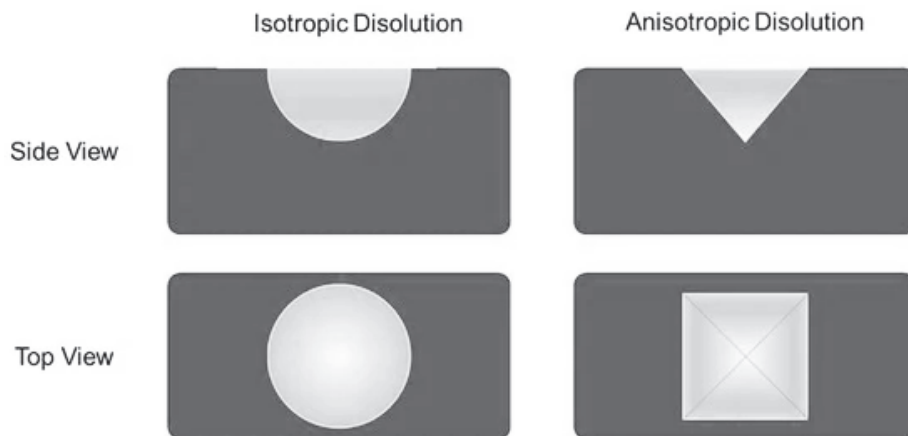


Рис. 4.11 Ізотропне і анізотропне травлення кристалів

[Lu D, Jiang Q, Ma X, Zhang Q, Fu X, Fan L. Defect-Related Etch Pits on Crystals and Their Utilization. Crystals. 2022; 12(11):1549. <https://doi.org/10.3390/cryst12111549>]

Анізотропне травлення має велике значення для структурування напівпровідників і в основному пов'язано із різноманіттям швидкості травлення низькоіндексованих поверхонь кристалів. Для анізотропного травлення геометричні властивості кристалічної ґратки відіграють вирішальну роль [139].

Зазвичай досліджуються низькоіндексовані поверхні кристалу орієнтації  $\{111\}$ ,  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Кожен набір площин має свою відмінну поведінку в розчині. Однією з причин для визначення різноманітності кристалографічних площин може бути щільність атомів у цих кристалографічних площинах (висока щільність атомів відповідатиме низькій швидкості розчинення) [139].

Експериментальні дані свідчать, що площини  $\{111\}$  розчиняються повільніше, ніж  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Це пояснюється тим,

що площини  $\{111\}$  окислюються набагато швидше, тобто на них майже миттєво утворюються власний оксид, що не відбувається на поверхнях площин  $\{110\}$  та  $\{100\}$ . Таким чином, на поверхні кристалографічної площини  $\{111\}$  міститься пасивуючий шар, що перешкоджає анодному розчиненню кристалу. Швидкість розчинення окисного шару є меншою, ніж швидкість його наростання. Для подолання цього явища в складі травника підвищують концентрацію комплексоутворювача (плавикової кислоти).

Величезна кількість підходів до опису процесів стуктурування під час електрохімічної обробки матеріалів породжує потребу в систематизації цих знань. Тому постає необхідність у встановлення принципів і закономірностей, на яких ґрунтується керування процесом формування пор на поверхні напівпровідників. Наноструктури, сформовані на поверхні напівпровідників демонструють різноманіття форм, розмірів та кількості нанооб'єктів. З одного боку, це розширює межі застосування, з іншого – призводить до труднощів, пов'язаних з розробкою критеріального апарату оцінки показників якості наноструктур. Актуальним є пошук шляхів уніфікації підходів до визначення морфологічних показників поруватих структур, який дозволить стандартизувати вимоги до наноматеріалів. Будь-який критеріальний апарат повинен ґрунтуватися на функціональному призначенні матеріалу. Говорити про якість наноструктур можливо лише з позицій практичного його застосування в конкретному приладі.

#### 4.7 Застосування напівпровідникових наноструктур для систем накопичення та зберігання енергії

Наноструктуровані напівпровідники розглядаються багатьма вченими як заміна аморфних, полі- та монокристалічних для застосування їх у сонячній енергетиці. Напівпровідники – це матеріали, які за своєю питомою провідністю займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Вони відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури і впливу різних видів випромінювання. Основною властивістю напівпровідників є збільшення електричної провідності з ростом температури.

Нормативне забезпечення визначення, призначення та випробування напівпровідників представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Нормативна база для визначення, призначення та випробування напівпровідників і приладів на їх основі

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ ІЕС 60050-551:2007	Електротехнічний словник термінів. Частина 551. Силова електроніка (ІЕС 60050-551:1998, IDT)
ДСТУ ІЕС 60747-1:2009	Прилади напівпровідникові. Частина 1. Загальні положення (ІЕС 60747-1:2006, IDT)
ДСТУ 3480-96	Прилади напівпровідникові силові. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 20859.1-98)
ДСТУ 4194-1-1:2004	Перетворювачі напівпровідникові. Перетворювачі з мережевою комутацією. Частина 1-1. Загальні технічні умови (ІЕС 60146-1-1:1991, MOD)

ДСТУ 4194-1-2:2004	Перетворювачі напівпровідникові. Перетворювачі з мережевою комутацією. Частина 1-2. Настанови щодо вибирання та застосовування (IEC/TR 60146-1-2:1991, MOD)
ДСТУ 2862-94	Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги
ДСТУ 2847-94	Перетворювачі електроенергії напівпровідникові. Терміни та визначення
ДСТУ IEC 60747-10:2015	Прилади напівпровідникові. Дискретні прилади та інтегральні схеми. Частина 10. Загальні технічні умови на дискретні прилади та інтегральні схеми (IEC 60747-10:1991, IDT)
ДСТУ IEC 60748-1:2015	Прилади напівпровідникові. Інтегральні схеми. Частина 1. Загальні положення (IEC 60748-1:2002, IDT)
ДСТУ IEC 60747-2:20015	Прилади напівпровідникові. Дискретні прилади та інтегральні схеми. Частина 2. Випрямні діоди (IEC 60747-2:2000, IDT)

Найбільш перспективним методом нетрадиційної енергетики вважається фотоелектричний метод перетворення сонячної енергії завдяки наявним перевагам:

- пряме перетворення енергії світлових квантів у електричну;
- різноманіття елементарної бази для виготовлення сонячних елементів;
- можливість створення модульних систем різної потужності;
- можливість використання концентрованого сонячного випромінювання;
- безшумність;
- простота експлуатації;
- екологічність.

Серед недоліків використання енергії сонця найчастіше виділяють такі:

- висока собівартість сонячних панелей;
- вироблення електроенергії тільки протягом світлового дня;
- залежність від кліматичних умов;
- потреба у великих площах для улаштування фотоелектричних станцій;
- проблеми з акумулюванням енергії;
- недосконалість технології й невеликий ККД тощо.

Саме недосконалість технології створення фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та їхній низький ККД є основними стримуючими факторами глобальної заміни традиційної енергетики на відновлювану. Тобто існує потреба в розробці інноваційних технологій, здатних підвищити ККД та інші електрофізичні характеристики сонячних панелей.

У зв'язку з цим актуальними є дослідження, що спрямовані на пошук шляхів удосконалення технологічних процесів виготовлення фотоелектричних перетворювачів. При розробці відповідних технологічних рішень необхідно враховувати особливості матеріалів, які використовуються як сировина для ФЕП.

Основою найпоширеніших комерційних фотоелектричних пристроїв є твердотільні монокристалічні кремнієві сонячні елементи з р-п-переходами. Добре відпрацьована технологія отримання та обробки монокристалічного кремнію дозволяє очікувати утримання ключових позицій для сонячних елементів на його основі в найближчому майбутньому.

Кремній є другим найбільш поширеним елементом у земній корі (35%) після кисню. Це основний матеріал для фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання спектру в діапазоні від ультрафіолетової до ближньої інфрачервоної області спектру, проте він може поглинати невелику частину сонячної радіації, тобто перетворювати фотони з енергією забороненої зони кремнію. Теоретична крива для ефективності перетворення матеріалів сонячних елементів у порівнянні з шириною забороненої зони (рис. 4.12) показує, що кремній (1,1 еВ) не знаходиться на максимумі кривої (близько 1,4-1,5 еВ), але відносно близько до нього. Ефективність для ідеальних кремнієвих сонячних батарей може досягати близько 30% (при 300 К).

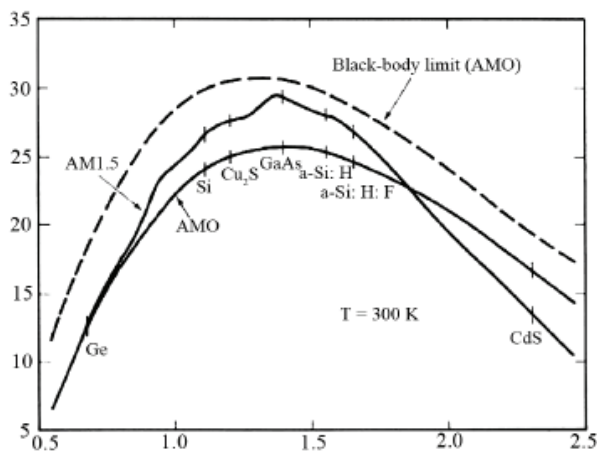


Рисунок 4.12 Графік ефективності ФЕП у залежності від ширини забороненої зони напівпровідника (при 300 К)

[Dincer, F., & Meral, M. E. (2010). Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells. Smart Grid and Renewable Energy, 01(01), 47–50. <https://doi.org/10.4236/sgre.2010.11007>]

Широкому застосуванню фотоелектричних перетворювачів перешкоджають, у першу чергу, висока вартість технологій

одержання монокристалічних плівок кремнію та полікомпонентна технологія багатошарових напівпровідникових структур. Сонячні елементи на основі  $\text{mono-Si}$  мають ККД близько (15 – 20)%.

Через високий коефіцієнт заломлення кремнію ( $n = 3,5$ ) значна частина сонячного випромінювання відбивається від поверхні фотовольтаїчного перетворювача (величина відображення може становити  $\sim 35\%$ ) і, отже, не впливає на процес генерації електронно-діркових пар. Це веде до зменшення ККД таких перетворювачів. Як правило, завдання зниження відображення вирішується нанесенням на поверхню сонячних елементів антивідбиваючих покриттів. Застосування таких покриттів призводить до збільшення коефіцієнта ефективності перетворення, подовження терміну служби й поліпшення електрофізичних і робочих характеристик фотовольтаїчних перетворювачів. Високий показник заломлення кристалічного кремнію в сонячному спектрі (300 – 1100) нм створює великі оптичні втрати, які можуть бути зменшені за допомогою просвітлюючого покриття (ARC). Хоча високоефективні подвійні й потрійні антивідбиваючі покриття доступні, більшість промислових кристалічних кремнієвих сонячних елементів використовують простий і недорогий одношаровий ARC з відносно поганими антивідбиваючими властивостями.

Для опису фотоелектричних перетворювачів застосовується набір параметрів і характеристик, що дозволяє порівнювати між собою фотоелектричні перетворювачі різного типу. Згідно з еквівалентної схемою ФЕП кількісними

характеристиками фотоелектричних процесів є світлові діодні характеристики, які розраховуються на одиницю площі ФЕП:

- величина фотоструму;
- величина діодного струму насичення;
- коефіцієнт ідеальності діоду;
- послідовний електроопір;
- шунтуючий електроопір.

Фактична ефективність ФЕП може істотно відрізнятись від теоретичної. Основні характеристики промислових сонячних елементів, виміряних при прямому опроміненні наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні характеристики промислових сонячних елементів

Тип сонячного елемента	$\eta$ , %	Площа поверхні, $\text{см}^2$	$U_{oc}$ , В	$I_{sc}$ , $\text{мА/см}^2$	$FF$ , %	Розробник
<i>Кремнієві</i>						
Кристалічні	24,4±0,5	4,00	0,706	42,7	82,8	UNSW
Полікристалічні	20,4±0,5	1,002	0,664	38,0	80,9	FhG-ISE
Тонкоплівкові	20,1±0,4	242,6	0,682	38,14	77,4	Solexel
Аморфні	10,1±0,3	1,036	0,886	16,75	67	Oerlikon
<i>ФЕП на основі напівпровідників АЗВ5</i>						
Арсенід галію	18,4±0,5	0,9927	1,122	29,68	86,5	Alta devices
Фосфід індію	22,1±0,7	4,02	0,878	29,5	85,4	Spire
<i>Халькогенідні тонкоплівкові</i>						
Телурид кадмію	18,3±0,5	1,005	0,857	26,95	77,0	GE GR

<i>Фотохімічні</i>						
Сенсибілізовані барвником	11,9±0,4	1,005	0,744	22,47	71,2	Sharp
Органічні	10,7±0,3	1,013	0,872	17,75	68,9	Mitsubishi Chem
<i>Багатоперехідні</i>						
InGaP/GaAs/InGaAs	37,7±1,2	1.047	3,014	14.57	86	Sharp
a-Si/nc-Si	12,3±0,3	0.962	1,365	12.93	69,4	Kaneka

Основним фактором, який впливає на ефективність ФЕП, можна назвати витрати енергії або неефективне розсіяння енергії в об'єм приладової структури у вигляді тепла (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Основні види втрат енергії в фотоелектричних перетворювачах

Серед основних напрямків подолання проблеми недосконалості фотоелектричних перетворювачів енергії можуть бути виділені такі:

- удосконалення технологічного процесу підготовки елементарної бази;
- використання антивідбиваючих покриттів для ФЕП;
- пошук нових матеріалів для сонячних панелей.

Зусилля у пошуку нових матеріалів для ФЕП спрямовуються в бік застосування наноструктурованих напівпровідників на основі монокристалічних.

Перше спостереження видимої фотолюмінесценції при кімнатній температурі в наноструктурованому поруватому кремнії відкрило можливості широкого спектру фотонних і біологічних застосувань у зв'язку зі зміною показника заломлення, більшим відношенням поверхня/обсяг і біосумісність поруватого кремнію.

Сонячні батареї (СБ) широко використовуються на космічних апаратах як первинне джерело електричної енергії. Збільшення енергоспоживання й ресурсу космічних апаратів пред'являє до сонячних батарей жорсткі вимоги на стійкість їх до дії середовища на орбіті. Вплив на СБ комплексу чинників середовища біля супутника виражається у:

- деградаційних процесах у матеріалах і елементах конструкцій фотоелектричних перетворювачів;
- погіршенні їхніх експлуатаційних характеристик;
- скорочення ресурсу;
- втрати електричної потужності;
- зменшення терміну активного існування космічних апаратів.

Основними складовими космічного середовища, які впливають на сонячні батареї в іоносфері й магнітосфері Землі, є потоки газу, плазми й електромагнітного випромінювання.

Джерелом радіаційного впливу на СБ може бути сонячне космічне випромінювання, що виникає в результаті спалахів на сонці. Це явище супроводжується викидом великої кількості протонів.

Для подолання цих проблем необхідним є пошук нових матеріалів, що здатні забезпечити високу ефективність сонячних модулів та протистояти впливу агресивного космічного середовища.

Традиційні кремнієві ФЕП показують невисоку ефективність при використанні їх у космічній енергетиці. Дослідниками було запропоновано використовувати сонячні елементи на основі інших напівпровідників, зокрема арсеніду галію. Такі конструкції мають більшу радіаційну стійкість у порівнянні з кремнієм. Це значно подовжує час життя сонячних елементів на земній орбіті.

Останнім часом для космічних сонячних батарей розглядається фосфід індію. Його вартість набагато перевищує вартість кремнію й арсеніду галію. Однак цей матеріал вважається найбільш радіаційно стійким серед напівпровідників групи *A3B5*. Звісно, застосування напівпровідникових сполук *A3B5* у сонячній енергетиці істотно обмежується високою собівартістю. На основі цього класу матеріалів формують як одноперехідні, так і багатоперехідні сонячні елементи. Для компенсації підвищеної собівартості прагнуть максимально збільшити коефіцієнт корисної дії. Це стає можливим завдяки наноструктуруванню поверхні напівпровідника.

Результати аналізу дозволяють зробити висновок, що єдиної думки щодо можливості підвищення ефективності фотоелектричного перетворення енергії не існує. Вочевидь, вибір найбільш прийняттого технічного рішення повинен базуватися на

експериментальних і теоретичних дослідженнях структури та властивостей наноструктурованих матеріалів.

Основною проблемою застосування фотоелектричних перетворювачів енергії є залежність від часу доби та погодних умов, що зумовлює або надлишок енергії, або її нестачу. Подолання цього протиріччя вбачається в розробці інноваційних технологій накопичення та зберігання енергії в екологічно прийнятний спосіб. Серед пріоритетних технологій накопичення енергії слід виділити електрохімічні накопичувачі – суперконденсатори (СК) та літєві джерела струму (ЛДС). Перед ЛДС суперконденсатори володіють рядом переваг, найбільш істотною з яких є відсутність електрохімічних реакцій, швидкість проходження яких обмежує величину потужності.

Найбільш поширеним електродним матеріалом суперконденсаторів залишається активоване вугілля, яке характеризується розвиненою поруватою поверхнею, доброю поляризацією, доступністю й дешевизною виробництва. Однак існує ряд факторів, які обмежують його широке застосування. Серед них внутрішній опір суперконденсатора, що залежить від провідності електроліту й електродів. Електропровідність поруватого вуглецевого матеріалу зменшується зі збільшенням поруватої структури внаслідок розривів провідних шляхів і заростання контактного опору між частинками. Велика питома площа поверхні також обмежує просторову ємність, яка негативно впливає на потужність суперконденсатора. Вуглецевий матеріал характеризується високою активністю поверхні, яка пов'язана з наявністю різного роду функціональних груп. Адсорбовані на поверхні вугілля функціональні групи можуть взаємодіяти з

електролітом. Цей ефект призводить до розкладання електродів і скорочення циклів роботи суперконденсатора.

Тобто, такі матеріали, як графенові та вуглецеві нанотрубки, слугують платформами для чудових характеристик конкретних пристроїв завдяки властивості електрохімічної стабільності, але мають обмеження площі поверхні поруватих шаблонів [166]. У таких пристроях об'ємна продуктивність часто не береться до уваги через неоднорідність товщини зразка, незважаючи на промислову значимість характеристик об'ємного зберігання при оцінці продуктивності транспортних застосувань. Цей фактор зумовлює необхідність пошуку матеріалів з контрольованою поруватою структурою.

Структурна перевага контрольованих поруватих матеріалів, таких як поруваті напівпровідники, підкреслюється тим фактом, що процес електрохімічного травлення або процес виготовлення, який формує структуру активної речовини, зумовлює об'ємні властивості та дозволяє легко оцінювати й контролювати цей показник.

Насправді існує безліч типів поруватих матеріалів, таких як металоорганічні каркаси, мезо- та макропоруваті матеріал, селективно витравлені поруваті напівпровідники. Тонкий контроль над площею поверхні, поруватістю і морфологією пор досягається завдяки використанню керованих технологій.

Таким чином, основним завданням постає вдосконалення шляхів структурного контролю поруватих матеріалів з поруватістю, яку складно досягти у звичайних вуглецевих наноматеріалах, і модифікувати стабільність поверхні цих матеріалів для використання їх у якості шаблонів, життєздатних для зберігання

електрохімічної енергії.

Технічна реалізація суперконденсатора являє собою два послідовно з'єднаних елементарних конденсатора (рис. 4.14).

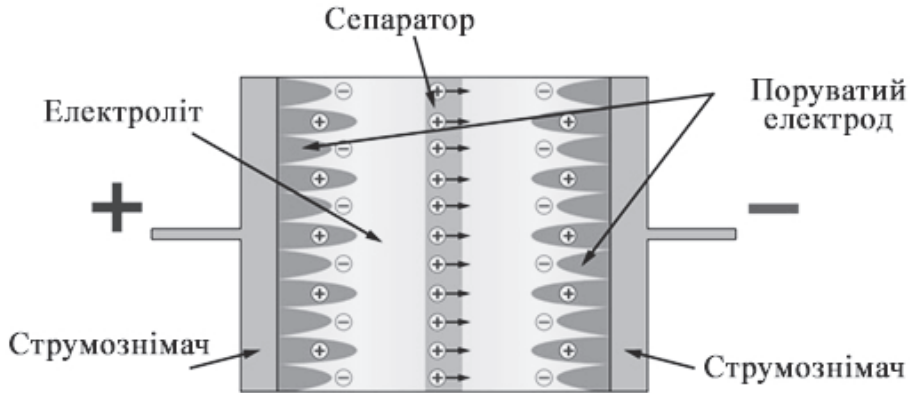


Рисунок 4.14 – Принципова схема суперконденсатора

З'єднання відбувається по електричним верствам у електроліті. Заряд знімається з електронних оболонок у поруватому матеріалі, який служить електродом. Послідовне з'єднання суперконденсаторів реалізується шляхом використання загального електроліту, розділеного сепаратором.

Суперконденсатори можуть зберігати більше енергії, ніж звичайні батареї та конденсатори, створюючи подвійний шар зарядів, розділених між двома пластинами з поруватих матеріалів. Пластини створюють між собою подвійний шар полярного електроліту. Нормативне забезпечення визначення, призначення та випробування різних типів конденсаторів представлено в табл. 4.3.

У порівнянні з літій-іонними батареями і традиційними конденсаторами суперконденсатори мають багато переваг, однак є й ряд недоліків (рис. 4.15).

Таблиця 4.3 – Нормативні документи для випробувань електрохімічних конденсаторів

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ 2.728-74	Позначення умови графічні в схемах. Резистори, конденсатори
ДСТУ 28885-90	Конденсатори. Методи вимірювань і випробувань
ДСТУ EN 60831-2:2016	Конденсатори шунтувальні силові самовідновні для систем змінного струму на номінальну напругу до 1000 В включно. Частина 2. Випробування на старіння, самовідновлення та руйнування (EN 60831-2:2014, IDT)
ДСТУ IEC 60063:2015	Резистори та конденсатори. Ряди преференційних чисел (IEC 60063:2015, IDT)
ДСТУ EN 61921:2015	Конденсатори силові. Низьковольтні батареї конденсаторів для коригування коефіцієнта потужності (EN 61921:2003, IDT)
ДСТУ EN 60143-2:2016	Конденсатори послідовного з'єднання для силових систем. Частина 2. Захисне устаткування для послідовного з'єднання конденсаторних батарей (EN 60143-2:1994, IDT)
ДСТУ EN 61071:2016	Конденсатори для силової електроніки (EN 61071:2007, IDT)
ДСТУ HD 597 S1:2015	Конденсатори та ємнісні подільники напруги (HD 597 S1:1992, IDT). З поправкою № 1
ДСТУ EN 62271-109:2016	Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 109. Обвідні вимикачі з послідовним конденсатором змінного струму (EN 62271-109:2009, IDT)

ДСТУ ІЕС 61881:2005	Електроустаткування залізниць. Устаткування рухомого складу. Конденсатори для силової електроніки (ІЕС 61881:1999, ІДТ)
ДСТУ ІЕС 60143-3:2005	Конденсатори послідовно з'єднані для енергосистем. Частина 3. Внутрішні плавкі запобіжники (ІЕС 60143-3:1998, ІДТ)
ДСТУ EN 61071:2016	Конденсатори для силової електроніки (EN 61071:2007, ІДТ)
ДСТУ HD 597 S1:2015	Конденсатори та емнісні подільники напруги (HD 597 S1:1992, ІДТ). З поправкою № 1
ДСТУ EN 62271-109:2016	Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 109. Обвідні вимикачі з послідовним конденсатором змінного струму (EN 62271-109:2009, ІДТ)



Рисунок 4.15 – Переваги й недоліки суперконденсаторів

Таким чином, наноструктуровані напівпровідники володіють незвичайними властивостями в порівнянні з відомими матеріалами, що дозволяє розглядати їх як перспективні матеріали для сонячних елементів та суперконденсаторів. Однак встановлення механізмів та підходів до управління якістю наноструктур потребує дослідження. Оцінювання вже готового наноматеріалу необхідно проводити за певним критеріальним апаратом, який визначається функціональним призначенням матеріалу.

#### **4.8 Проблеми низької конкурентоспроможності промислової нанотехнологічної продукції**

Розвиток нанотехнологій відкрив нові межі для промислового застосування, пропонуючи трансформаційний потенціал у різних секторах. Однак, незважаючи на технологічний прогрес і активізацію дослідницьких зусиль, нанотехнологічні продукти іноді стикаються з проблемами низької конкурентоспроможності на ринку. Розуміння цих викликів є не лише економічним імперативом, а й технологічною необхідністю для сприяння інноваціям і забезпечення сталого розвитку галузі.

Однією з головних причин низької конкурентоспроможності є висока вартість виробництва. Синтез наноматеріалів часто включає складні методи та спеціалізоване обладнання, що значно підвищує витрати на виробництво. Крім того, масштабованість цих методів іноді сумнівна, що обмежує обсяг економічно ефективного виробництва. Таким чином, незважаючи на те, що нанотехнологічні продукти можуть запропонувати чудову

продуктивність, їх висока вартість може стримувати широке впровадження, особливо коли доступні дешевші альтернативи.

Інше важливе питання — це відтворюваність і контроль якості. Унікальні властивості наноматеріалів значною мірою залежать від їх структури та складу, на які, у свою чергу, впливають параметри синтезу. Незначні коливання цих параметрів можуть призвести до значних змін властивостей, що робить контроль якості складним завданням. Ця мінливість створює перешкоду для галузей, яким потрібна стабільна та надійна продуктивність, змушуючи їх вагатися щодо інтеграції нанотехнологічних рішень у свою діяльність.

Крім того, нормативні та стандартизаційні рамки для нанотехнологічних продуктів все ще знаходяться на стадії зародження, що призводить до невизначеності у відповідності та безпеці. Відсутність чітких вказівок може не тільки ускладнити виробникам забезпечення відповідності всім вимогам, але й знеохотити потенційних клієнтів, які стурбовані безпекою та впливом цих продуктів на навколишнє середовище.

Проблема низької конкурентоспроможності також ускладнюється мультидисциплінарним характером нанотехнологій. Хоча цей міждисциплінарний підхід є сильною стороною, що дозволяє створювати інноваційні рішення, він також може бути проблемою з точки зору готовності до ринку. Продукти часто мають відповідати критеріям у різних галузях, таких як матеріалознавство, біологія та інженерія, що потребує ширшого спектру випробувань і перевірок, ніж звичайні продукти.

Нарешті, обізнаність про ринок і сприйняття споживачів відіграють недооцінену роль у конкурентоспроможності

нанотехнологічних продуктів. Незважаючи на їхні потенційні переваги, відсутність розуміння або неправильні уявлення про нанотехнології можуть перешкодити проникненню на ринок. Ефективні комунікаційні стратегії, які передають переваги та вирішують потенційні проблеми, мають вирішальне значення для підвищення конкурентоспроможності.

Підсумовуючи, низьку конкурентоспроможність промислових нанотехнологічних продуктів можна пояснити складною взаємодією економічних, технічних і соціальних факторів. Вирішення цих проблем вимагатиме узгоджених зусиль дослідників, зацікавлених сторін промисловості та політиків. Тільки завдяки такому спільному підходу ми можемо сподіватися розкрити повний потенціал нанотехнологій у промисловому застосуванні.

### **Перелік питань для самоперевірки**

У чому полягає основна відмінність між підходами «зверху вниз» і «знизу вверху» у синтезі наноструктур?

Чи можете ви навести приклад низхідного методу синтезу наноструктур?

Наведіть приклад висхідного підходу в синтезі наноструктур.

Що є ключовими міркуваннями при виборі методу синтезу наноструктур?

Опишіть принцип хімічного осадження з парової фази (CVD).

У чому перевага використання сольвотермічних методів синтезу наноструктур?

Як електрохімічні методи забезпечують контроль розміру та товщини наноструктур?

Яка різниця між ізотропним та анізотропним травленням?

Які типи застосувань зазвичай виграють від анізотропного травлення?

Як напівпровідникові наноструктури можуть сприяти рішенням для зберігання енергії?

Назвіть конкретний матеріал, який зазвичай використовується в напівпровідникових наноструктурах для зберігання енергії.

Які фактори спричиняють низьку конкурентоспроможність промислових нанотехнологічних продуктів?

Як мультидисциплінарний характер нанотехнологій впливає на їх конкурентоспроможність на ринку?

### **Теми для самостійного опрацювання**

*Технології «зверху вниз» і «знизу вгору» (розділ 4.1 – 4.4)*

**Поглиблений аналіз літографії:** досліджуйте різні типи літографічних методів та їх застосування у створенні наноструктур.

**Молекулярна самозбірка:** вивчіть, як працює молекулярна самозбірка та її корисність у підходах знизу до створення наноструктур.

**Удосконалені методи CVD:** зрозумійте варіації та вдосконалення методів хімічного осадження з парової фази для синтезу наноструктур.

**Золь-гель хімія:** зануртеся в деталі золь-гель хімії та те, як вона забезпечує утворення складних наноструктур.

*Хімічні та електрохімічні методи (розділ 4.5)*

**Хімічне відновлення в синтезі наночастинок:** дослідіть роль відновників і стабілізаторів у методах хімічного відновлення для синтезу наночастинок.

**Електрохімічні параметри:** вивчайте, як різні параметри, такі як напруга, щільність струму та концентрація електроліту, впливають на методи електрохімічного синтезу.

*Ізотропне та анізотропне травлення кристалів (розділ 4.6)*

**Механізми травлення:** зрозумійте хімічні та фізичні механізми процесів ізотропного та анізотропного травлення.

**Застосування техніки травлення:** ознайомтеся з галузями та продуктами, де переважно використовуються методи травлення.

*Застосування напівпровідникових наноструктур для накопичення енергії та систем зберігання (розділ 4.7)*

**Напівпровідникові матеріали для накопичення енергії:** досліджуйте конкретні напівпровідникові матеріали та їхню придатність для різних застосувань зберігання енергії.

**Тематичні дослідження:** перегляньте тематичні дослідження, які демонструють застосування напівпровідникових наноструктур у системах зберігання енергії.

*Проблеми низької конкурентоспроможності продукції промислових нанотехнологій (розділ 4.8)*

**Економічний аналіз нанотехнологічних продуктів:** досліджуйте економічні чинники, які сприяють низькій конкурентоспроможності нанотехнологічних продуктів на ринку.

**Регуляторні виклики в нанотехнологіях:** проаналізуйте існуючий нормативний ландшафт, що впливає на конкурентоспроможність нанотехнологічних продуктів.

## Список використаних та рекомендованих джерел

1. Qi, H., Wang, L., Sun, J., Long, Y., Hu, P., Liu, F., & He, X. (2018). Production Methods of Van der Waals Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides. *Crystals*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.3390/cryst8010035>
2. Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suksatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H., ... & Kianfar, E. (2021). Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-21.
3. El-Eskandarany, M. S., Al-Hazza, A., Al-Hajji, L. A., Ali, N., Al-Duweesh, A. A., Banyan, M., & Al-Ajmi, F. (2021). Mechanical Milling: A Superior Nanotechnological Tool for Fabrication of Nanocrystalline and Nanocomposite Materials. *Nanomaterials*, 11(10), 2484. <https://doi.org/10.3390/nano11102484>
4. Brady, B., Wang, P. H., Steenhoff, V., & Brolo, A. G. (2019). Nanostructuring Solar Cells Using Metallic Nanoparticles. In *Metal Nanostructures for Photonics* (pp. 197–221). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102378-5.00009-x>
5. Liu, Y., Goebel, J., & Yin, Y. (2013). Templated synthesis of nanostructured materials. *Chem. Soc. Rev.*, 42(7), 2610–2653. <https://doi.org/10.1039/c2cs35369e>
6. Tonelli, D., Scavetta, E., & Gualandi, I. (2019). Electrochemical Deposition of Nanomaterials for Electrochemical Sensing. *Sensors*, 19(5), 1186. <https://doi.org/10.3390/s19051186>
7. Monaico, E. I., Monaico, E. V., Ursaki, V. V., & Tiginyanu, I. M. (2022). Controlled Electroplating of Noble Metals on III-V Semiconductor Nanotemplates Fabricated by Anodic Etching of Bulk Substrates. *Coatings*, 12(10), 1521. <https://doi.org/10.3390/coatings12101521>
8. Zhang, C., Grandner, J., Liu, R., Lee, S. B., & Eichhorn, B. W. (2010). Heterogeneous films of ordered CeO<sub>2</sub>/Ni concentric nanostructures for fuelcell applications. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(17), 4295–4300. <https://doi.org/10.1039/b918587a>
9. Suchikova, Y., Kovachov, S., Bohdanov, I. et al. Study of the structural and morphological characteristics of the Cd<sub>x</sub>TeyO<sub>z</sub> nanocomposite obtained on the surface of the CdS/ZnO heterostructure by the SILAR method. *Appl. Phys. A* 129, 499 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06776-x>
10. Lu D, Jiang Q, Ma X, Zhang Q, Fu X, Fan L. Defect-Related Etch Pits on Crystals and Their Utilization. *Crystals*. 2022; 12(11):1549. <https://doi.org/10.3390/cryst12111549>
12. Mlinar, V. (2013). Engineered nanomaterials for solar energy conversion. *Nanotechnology*, 24(4), 042001.
13. Li, W., Elzatahry, A., Aldhayan, D., & Zhao, D. (2018). Core-shell structured titanium dioxide nanomaterials for solar energy utilization. *Chemical Society Reviews*, 47(22), 8203-8237.
14. Liao, L., Wang, M., Li, Z., Wang, X., & Zhou, W. (2023). Recent Advances in Black TiO<sub>2</sub> Nanomaterials for Solar Energy Conversion. *Nanomaterials*, 13(3), 468.

15. Jafaryar, M., & Sheikholeslami, M. (2023). Simulation for charging of phase change material in existence of nanomaterial within solar energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 68, 107864.
16. Emsadi, K. (2023). Metal halide perovskite nanomaterials for solar energy. In *Advances in Electronic Materials for Clean Energy Conversion and Storage Applications* (pp. 149-168). Woodhead Publishing.
17. Mohsin, M., Ishaq, T., Bhatti, I. A., Jilani, A., Melaibari, A. A., & Abu-Hamdeh, N. H. (2023). Semiconductor Nanomaterial Photocatalysts for Water-Splitting Hydrogen Production: The Holy Grail of Converting Solar Energy to Fuel. *Nanomaterials*, 13(3), 546.
18. Feng, T., Liu, G., Li, G., Li, Y., Liang, J., & Wang, K. (2023). Engineering iron-rich nanomaterials for supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 145045.
19. Lu, C., Liu, L., Yang, Y., Ma, Y., Luo, Q., & Zhu, M. (2023). Recent Progress in Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Based Nanomaterials for Supercapacitors. *ChemNanoMat*, 9(5), e202200537.
20. Guan, Y., Hu, K., Su, N., Zhang, G., Han, Y., & An, M. (2023). Review of NiS-Based Electrode Nanomaterials for Supercapacitors. *Nanomaterials*, 13(6), 979.
21. Guan, Y., Hu, K., Su, N., Zhang, G., Han, Y., & An, M. (2023). Review of NiS-Based Electrode Nanomaterials for Supercapacitors. *Nanomaterials*, 13(6), 979.
22. Nayak, A., Bhushan, B., Kotnala, S., Kukretee, N., Chaudhary, P., Tripathy, A. R., ... & Mudliar, S. L. (2023). Nanomaterials for supercapacitors as energy storage application: Focus on its characteristics and limitations. *Materials Today: Proceedings*, 73, 227-232.
23. Dincer, F., & Meral, M. E. (2010). Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells. *Smart Grid and Renewable Energy*, 01(01), 47–50. <https://doi.org/10.4236/sgre.2010.11007>

## Лекція 5

### Методи та підходи оцінювання якості нанотехнологічної продукції

#### Зміст

#### 5.1 TQM (Total Quality Management)

5.2 Математично-статистичні методи оцінювання якості наноматеріалів

5.3 Підходи та технології, що сприяють підвищенню рівня якості наноматеріалів

#### 5.4 Підходи до оцінювання якості наноматеріалів

Перелік питань для самоперевірки

Теми для самостійного опрацювання

Список використаних та рекомендованих джерел

### **5.1 TQM (Total Quality Management)**

#### *5.1.1 Загальний підхід*

Стандарти, що розробляються Міжнародною організацією по стандартам не обмежуються різними системами заходів для покращення якості, вони також визначають правила документування процесів і вказують, які процеси найбільш важливі для забезпечення необхідного рівня якості. Однак існують практики, які дають можливість зробити в технологіях покращення якості наступний після сертифікату ISO9001 крок.

Зокрема, TQM (Total Quality Management) – це підхід до управління організацією, націлений на якість. Термін Total Quality Management запропонований для опису методології, відповідно до якої критерії якості стають основним фактором для керівництва при проектуванні, плануванні та модернізації технологій.

Методологія TQM визначає якість продукції та послуг як інтегруючу категорію. Згідно з нею якість визначається набором категорій (рис. 5.1.).



Рисунок 5.1 – Категорії якості продукції згідно з TQM

Хоча специфіка може відрізнятися залежно від галузі чи характеру організації, деякі загальні категорії в TQM можуть включати:

- Ефективність: Наскільки добре продукт виконує свою призначену функцію?
- Надійність: чи стабільно якісний продукт з часом?
- Довговічність: Як довго служить продукт?
- Зручність обслуговування: наскільки легко ремонтувати або обслуговувати продукт?
- Естетика: чи має продукт приємний зовнішній вигляд?
- Особливості: чи пропонує продукт атрибути, які привабливі для клієнтів?

- Сприйняття якості: Яке загальне сприйняття продукту клієнтом?

### *Наслідки для науки про наноматеріали*

У контексті науки про наноматеріали TQM може запропонувати безцінне розуміння систематичного покращення якості наноматеріалів. Наприклад, TQM може керувати розробкою нових методів синтезу, зосереджуючись не лише на виході, але й на відтворюваності, масштабованості та впливі на навколишнє середовище. У дослідницьких умовах принципи TQM можуть бути застосовані для забезпечення точності та повторюваності експериментів, тим самим сприяючи накопиченню знань високоякісними даними.

Таким чином, TQM пропонує цілісний підхід до управління якістю, виходячи за рамки обмежень традиційних методів. Його застосування в галузі науки про наноматеріали може слугувати каталізатором для стимулювання інновацій та підвищення конкурентоспроможності нанотехнологічних продуктів.

### *Наслідки TQM для наноінженерії*

Наноінженерія, дисципліна, яка зосереджується на розробці функціональних систем у молекулярному масштабі, представляє сферу, де якість є не просто показником, а критичним визначальним фактором функціональності та безпеки. Застосування принципів тотального управління якістю (TQM) у наноінженерії може значно покращити розробку, характеристику та застосування нанорозмірних систем.

### *TQM у синтезі наноматеріалів для наноінженерії*

У наноінженерії якість наноматеріалів має першочергове значення, оскільки їхні властивості часто визначають продуктивність кінцевої сконструйованої системи. TQM може керувати оптимізацією протоколів синтезу, щоб гарантувати, що наноматеріали відповідають суворим критеріям якості, таким як чистота, розподіл розміру та ефективність функціональності. Цей підхід виходить за рамки простої відповідності стандартам ISO і передбачає проактивне планування якості та постійне вдосконалення.

### *TQM у виготовленні та складанні пристроїв*

Складання нанопристроїв вимагає рівня точності, який на порядки вищий, ніж у інженерії макромасштабу. У цьому випадку методи TQM можуть допомогти звести до мінімуму помилки та варіації шляхом впровадження ретельних перевірок якості на кожному етапі процесу складання. Механізми контролю якості, засновані на принципах TQM, можуть бути встановлені для моніторингу критичних параметрів, таких як товщина шару в наноплівкових пристроях або властивості з'єднання в наноелектронних схемах.

### *TQM у надійності та безпеці процесу*

Незначні масштаби, задіяні в наноінженерії, роблять процеси дуже чутливими до коливань умов навколишнього середовища, таких як температура та тиск. TQM може керувати розробкою надійних систем, стійких до таких змін. Крім того, протоколи

безпеки, особливо ті, що стосуються потенційної нанотоксичності, можна оптимізувати відповідно до принципів TQM, щоб забезпечити як безпеку оператора, так і екологічну відповідність.

### *TQM у додатках для кінцевих користувачів*

Продукти наноінженерії часто знаходять застосування в критичних сферах, таких як медична діагностика, зондування навколишнього середовища та високопродуктивне обчислення. TQM може допомогти адаптувати ці продукти відповідно до очікувань споживачів або перевершити їх через ітераційні цикли зворотного зв'язку, тим самим підвищуючи задоволеність клієнтів і сприйняття ринком.

### *TQM у міждисциплінарній співпраці*

Наноінженерія за своєю суттю є мультидисциплінарною, що включає експертизу з матеріалознавства, фізики, біології та інженерії. Цілісний підхід TQM особливо корисний тут, оскільки він гарантує гармонізацію показників якості в різних дисциплінах. Це важливо для бездоганної інтеграції компонентів і систем, які часто розробляються в різних дослідницьких середовищах.

### *TQM у стійкому розвитку та етиці*

Враховуючи стадію зародження нормативно-правової бази в наноінженерії, TQM може слугувати механізмом саморегулювання для забезпечення етичної та сталої практики. Це включає відповідальне постачання сировини, мінімізацію відходів під час синтезу та забезпечення того, що кінцеві продукти підлягають повторній переробці або біорозкладанню.

Підсумовуючи, впровадження TQM в наноінженерії може забезпечити надійну основу для досягнення досконалості в дослідженнях, розробках і комерціалізації. Розвиваючи культуру постійного вдосконалення якості, TQM може значно сприяти надійності, безпеці та конкурентоспроможності продуктів наноінженерії на ринку.

## **5.2 Математично-статистичні методи оцінювання якості наноматеріалів**

Оцінка якості є невід'ємним компонентом будь-якого інженерного процесу, і це особливо вірно в сферах науки про наноматеріали та наноінженерії. У той час як експериментальні методи забезпечують засоби розробки та характеристики матеріалів у нанорозмірах, математичні та статистичні методи забезпечують інструменти для суворої оцінки якості. Серед найбільш поширених інструментів забезпечення якості є методи статистичного контролю процесів (SPC), набір статистичних тестів і алгоритмів, призначених для моніторингу, контролю та вдосконалення процесів.

### *Важливість статистичного контролю процесу (SPC)*

Статистичний контроль процесів забезпечує керований даними підхід для розуміння змін у процесі, що дозволяє організаціям приймати обґрунтовані рішення. Використовуючи статистичні методи для моніторингу та контролю якості, SPC дозволяє виявити розбіжності до того, як вони переростуть у більші проблеми. Це особливо важливо при синтезі та виготовленні

наноматеріалів і наноструктур, де найменші зміни можуть мати значний вплив на функціональність і безпеку.

### *Компоненти SPC в наноінженерії*

- Контрольні діаграми

Контрольні діаграми — це графічні інструменти, які відображають дані процесу протягом певного часу, пропонуючи візуальні засоби для оцінки стабільності процесу. Вони необхідні в наноінженерних програмах для моніторингу таких параметрів, як розподіл частинок за розміром, товщина шару або електропровідність, які є критичними для продуктивності кінцевого використання.

- Індекси можливостей процесу

Це статистичні показники, які забезпечують порівняння між природною мінливістю процесу та мінливістю, дозволеною специфікаціями процесу. У контексті наноматеріалів індекси можливостей можуть допомогти оцінити, наприклад, чи може процес синтезу постійно виробляти наночастинки в межах певного діапазону розмірів.

- Регресійний аналіз

Регресійний аналіз часто використовується для розуміння зв'язків між змінними. У наноінженерії його можна використовувати для співвіднесення параметрів синтезу з

кінцевими властивостями матеріалу, що забезпечує прогнозне моделювання та оптимізацію.

- **Перевірка гіпотез**

Перевірки гіпотез, такі як тест  $\chi^2$ -квадрат або t-тест, можна використовувати для висновків або рішень щодо якості процесу. Наприклад, t-тест можна використати, щоб визначити, чи дає новий метод синтезу статистично значуще покращення чистоти матеріалу.

- **Передові математичні методи**

Окрім основних статистичних інструментів, для оцінки якості можна застосувати передові математичні методи, такі як алгоритми машинного навчання. Ці методи можуть аналізувати складні багатовимірні набори даних для вилучення шаблонів або кореляцій, які можуть бути неочевидними традиційними методами.

### *Наслідки для покращення якості*

Застосування цих математичних і статистичних методів дає змогу застосовувати більш тонкий і ефективний підхід до забезпечення якості. У галузі, де точність має першочергове значення, ці інструменти забезпечують безперервне покращення якості, керуючись розумінням, що базується на даних.

### *Виклики та майбутні напрямки*

Хоча методи SPC пропонують надійні механізми оцінки якості, їх ефективність залежить від якості зібраних даних. У нових галузях, таких як наноінженерія, де стандартизація все ще триває, забезпечення цілісності даних може бути проблемою.

Підводячи підсумок, можна сказати, що математичні та статистичні методи, особливо під егідою статистичного контролю процесів, пропонують незамінні інструменти для оцінки якості в наноінженерії. Сприяючи глибшому розумінню варіацій процесу та їх наслідків, ці методи дозволяють розробляти якісніші, надійніші наноматеріали та продукти наноінженерії

### **5.3 Підходи та технології, що сприяють підвищенню рівня якості наноматеріалів**

Загальне управління якістю базується на принципах, розуміння й реалізація на практиці яких дозволяє досягати бажаного рівня якості «з першого разу» (рис. 5.2).

У дещо зміненому вигляді ці елементи увійшли до складу принципів системи менеджменту якості, представлених у стандартах ISO серії 9000.

Єдиним для всіх підходів є те, що контроль якості необхідно здійснювати шляхом порівняння запланованого показника якості з дійсним його значенням. Власне контроль якості полягає в тому, щоб, перевіряючи показники якості, виявити їх відхилення від запланованих значень. У разі виявлення відхилення необхідно знайти причину його появи, і після коригування процесу, знову перевірити відповідність скоригованих показників якості їхнім

запланованим значенням. Саме по такому безперервному циклу здійснюється управління, забезпечення необхідної якості та подальше його поліпшення.

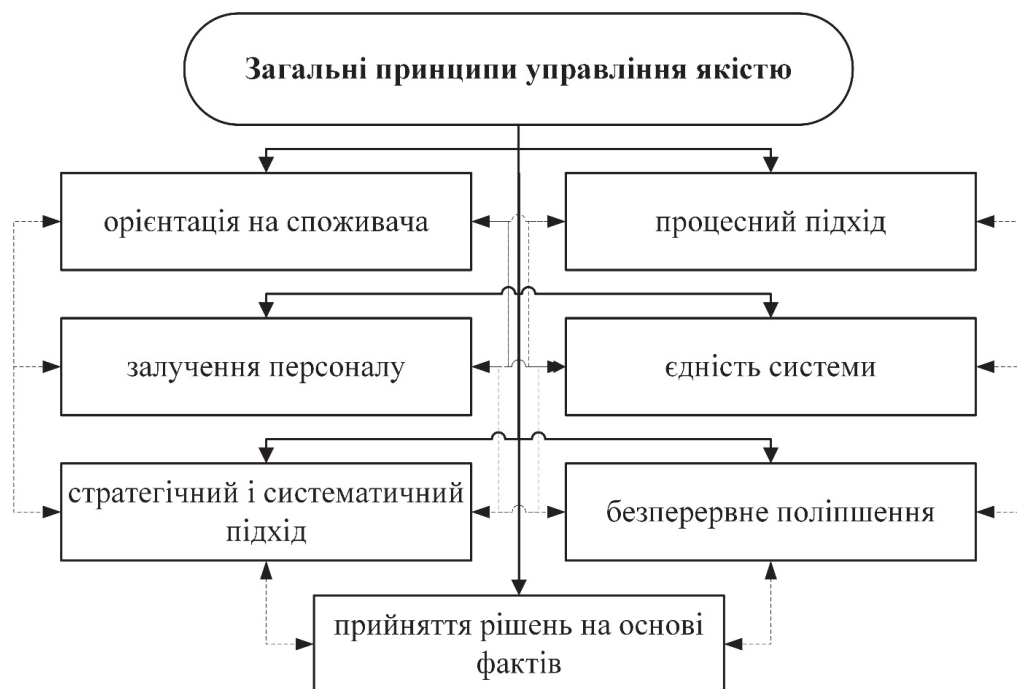


Рисунок 5.2 – Принципи управління якістю продукції

Науковою основою сучасного технічного контролю є математично-статистичні методи. Управління якістю продукції може забезпечуватися двома методами:

- за допомогою розбраковки виробів;
- шляхом підвищення технологічної точності.

Стратегія щодо підвищення рівня якості та його вдосконалення повинна бути реалізована на всіх етапах життєвого циклу продукту. Існує необхідність відстеження рівня якості продукції на початкових етапах виробничого процесу, а не

підсумкового й єдиного контролю якості вже готового продукту на виході. Тобто необхідним є відстеження рівня не тільки готового продукту, але й контроль якості сировини, виробничого процесу, застосовуваних технологій. Підвищення рівня якості продукції залежить від задоволення потреб замовників. Відповідність рівня якості продукції потребам споживачів обчислюється за допомогою експертних вимірювань або документальних даних. Серед існуючих методів визначення показників якості (ПЯ) немає відповідного по відношенню до якості нанопродукції в ринковому середовищі, так як існуючі підходи визначення показників якості не враховують наукоємність нанотехнологій.

У даний час існує велика кількість підходів та технологій, що сприяють підвищенню рівня якості та конкурентоспроможності підприємств (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Підходи та технології, які спрямовано на підвищення рівня якості продукції

Підхід / технологія	Опис
<i>Підходи</i>	
Системи контролю (СК)	Порівняння запланованих показників з фактичними, і відповідно аналіз отриманих відхилень при їх наявності. Завданням СК є розробка плану і, згідно нього, досягнення цілі. Метою СК є інформаційна підтримка управлінських рішень для підвищення якості. Якість управлінського рішення – це безліч рішень здатних задовольнити вимоги споживачів.
Сбалансована система показників (BSC – balanced scorecard)	Методологія, яка заснована на перекладі стратегій у конкретні цілі розвитку підприємства. BSC ґрунтується на таких основних напрямках, як клієнти, фінанси, внутрішні процеси та

	навчання. За даним напрямком з'являється можливість ефективної оцінки діяльності підприємства. При досягненні розроблених цілей необхідним є надання результатів у вигляді кількісних показників
Система менеджменту якості (СМЯ)	У СМЯ з метою підвищення якості застосовують оцінку задоволеності споживачів, яка є обов'язковою за вимогами стандартів. Вихідними даними при аналізі є дані, отримані через лінію «Зворотній зв'язок зі споживачами», при аналізі в основному використовуються індекс задоволеності споживачів і кваліметричні способи оцінки якості
<i>Технології</i>	
Структурування функції якості( QFD – Quality Function Deployment)	Технологія, яка ще на етапі проектування виробів дозволяє перевести виявлені потреби споживачів у технічні вимоги до продукції. Дана технологія застосовується тільки для визначення підвищення якості продукції
FMEA-аналіз (Failure Mode and Effects Analysis, аналіз видів и наслідків відмов)	Аналіз імовірності виникнення дефектів і можливий вплив їх на споживача. Метою даного аналізу є зменшення кількості ризиків від можливих дефектів при розробці продукту
Функціонально-вартісний аналіз	Оцінка витрат, яка проводиться вже для розроблених продуктів для зменшення кількості витрат і, відповідно, зниження собівартості продукту
GAP-аналіз (метод аналізу первинної інформації)	Застосовується для виявлення відхилень у процесах, що виникли при існуванні дефектів. Сприяє поліпшенню існуючих процесів, а так само може застосовуватися при аналізі розроблюваних

Дані управлінські технології, як і стандарти серії спрямовані на підвищення результативності роботи СМЯ.

## 5.4 Підходи до оцінювання якості наноматеріалів

Теоретичною базою для оцінки якості будь-якого продукту чи процесу є кваліметрія, у межах якої розвиваються статистичні, аналітичні, експертні методики оцінки відповідності бажаному рівню. Контроль якості відбувається шляхом порівняння запланованого показника із дійсним його значенням. Відхилення від запланованих показників відбувається, як правило, у біг гірших значень. Необхідно також враховувати, що сама по собі якість є динамічним об'єктом, який вимагає постійного контролю.

Існує безліч статистичних методів контролю якості. У цьому сенсі завжди постає питання – якому методу слід віддати перевагу. Деякі спеціалісти пропонують користуватися наступним принципом: важливість статистичного методу дорівнює його математичному потенціалу, множеному на імовірність його застосування. Тобто при оцінці якості виробу необхідно обирати такі методи, які дають достовірну інформацію, однак є простими та зрозумілими (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Методи контролю якості продукції

Назва, джерело	Опис	Мета, застосування
Метод контрольних карт	Графік, на який послідовно в порядку відбору вибірок наносять значення статистичного показника, який обчислюється за вибірковими даними.	Дозволяють використовувати поточні дані процесу, щоб встановити статистично нормальні робочі кордони в яких повинні перебувати параметри процесу. При оцінюванні якості наноструктур для встановлення залежностей характеристик від технологічних умов синтезу.

Контрольні листки реєстрації даних	Інструмент для збору даних та їхнього автоматичного упорядкування для полегшення подальшого використання зібраної інформації.	Мета збору даних у процесі контролю якості наноструктур полягає в контролі та регулюванні процесу синтезу; аналізі відхилень від встановлених характеристик; контролі нанотехнологічної продукції.
Причинно-наслідкова діаграма Ісікави	Інструмент, який дозволяє виявити найбільш істотні фактори, що впливають на кінцевий результат.	Використовується для систематичного і повного визначення причин виникнення проблеми; для аналізу й структурування процесів; при необхідності візуалізації та оцінювання співвідношення причинно-наслідкових зв'язків.
Аналіз Парето	Інструмент, що дозволяє об'єктивно представити й виявити фактори, які впливають на досліджувану проблему.	Застосовується як для виявлення проблем, так і для аналізу причин, що викликають ці проблеми.
Гістограма розподілу показників якості	Інструмент, що дозволяє візуально оцінити розподіл статистичних даних, згрупованих за частотою попадання даних в певний інтервал.	Застосовується при оцінці процесу за допомогою вибіркового даних, коли потрібно з'ясувати ймовірність перетину розподілу генеральної сукупності, меж полів допуску і появи у зв'язку з цим невідповідності вимогам споживача.
Діаграма розкиду	Інструмент, що дозволяє визначити вид і тісноту зв'язку двох параметрів процесу.	Для з'ясування залежності між показниками якості та основними факторами виробництва.

Представлені вище підходи до управління якістю застосовані для широкого кола процесів та продукції. Кожен з них має переваги в певних випадках. Дуже часто застосовують комбінації підходів та технологій. Надалі для визначення механізмів управління та контролю якості нанотехнологічної продукції будемо користуватися розглянутими технологіями, які лежать в основі системного підходу управління якістю продукції.

## **Перелік питань для самоперевірки**

Що таке загальне управління якістю (TQM) і чим воно відрізняється від традиційних методів забезпечення якості?

Поясніть поняття «якість як інтегруюча категорія» в контексті TQM.

Як можна застосувати принципи TQM у сфері наноінженерії?

Що таке статистичний контроль процесу (SPC) і чому він важливий для оцінки якості?

Опишіть корисність контрольних карт у моніторингу якості в наноінженерії.

Поясніть, що таке індекси здатності процесу та як їх можна використовувати для оцінки якості наноматеріалів.

Яку роль відіграє регресійний аналіз в оцінці якості?

Назвіть деякі технології, які зазвичай використовуються для підвищення якості наноматеріалів.

Як ці технології сприяють покращенню якості?

Які загальні підходи використовуються для оцінки якості в нанотехнологіях?

Чим ці підходи відрізняються та які їхні відповідні переваги та обмеження?

Чи можете ви назвати підхід, який особливо добре підходить для оцінки якості наноматеріалів, що використовуються в біомедичних цілях?

## **Теми для самостійного опрацювання**

*TQM (Загальне управління якістю) (розділ 5.1)*

**Роль TQM у нанотехнологіях:** проведіть детальне дослідження того, як принципи TQM можуть бути налаштовані та застосовані саме в галузі нанотехнологій.

**Тематичні дослідження TQM:** ознайомтеся з практичними прикладами TQM, де TQM було успішно впроваджено в галузях нанотехнологій для підвищення якості.

*Математичні та статистичні методи оцінювання якості (розділ 5.2)*

**Розширені методи SPC:** проаналізуйте передові методи статистичного контролю процесів, які застосовуються в контексті наноматеріалів і наноструктур.

**Машинне навчання в оцінці якості:** вивчайте, як алгоритми машинного навчання використовуються в оцінці якості нанотехнологічних продуктів.

*Підходи та технології, що сприяють підвищенню рівня якості (розділ 5.3)*

**Технології визначення характеристик наноматеріалів:** досліджуйте різні методи визначення характеристик, як-от скануюча електронна мікроскопія (SEM) і атомно-силова мікроскопія (AFM), які сприяють оцінці якості.

**Роль нанокомпозитів у підвищенні якості:** проаналізуйте, як нанокомпозити можуть сприяти загальній якості нанотехнологічних продуктів і які методи використовуються для оцінки цих композитів.

*Підходи до оцінки якості (розділ 5.4)*

**Протоколи оцінки якості:** порівняйте існуючі протоколи та стандарти, спеціально спрямовані на оцінку якості в нанотехнологіях.

**Біоетичні міркування в оцінці якості:** враховуючи те, що нанотехнології часто перетинаються з біологією, аргументуйте в етичні міркування, які беруть участь у оцінці якості, особливо в біомедичних додатках.

### **Список використаних та рекомендованих джерел**

1. Dahlgaard, J. J., Kanji, G. K., & Kristensen, K. (2008). *Fundamentals of total quality management*. Routledge.
2. Ahire, S. L., Landeros, R., & Golhar, D. Y. (1995). Total quality management: a literature review and an agenda for future research. *Production and Operations management*, 4(3), 277-306.
3. Hackman, J. R., & Wageman, R. (1995). Total quality management: Empirical, conceptual, and practical issues. *Administrative science quarterly*, 309-342.
4. Osayawe Ehigie, B., & McAndrew, E. B. (2005). Innovation, diffusion and adoption of total quality management (TQM). *Management Decision*, 43(6), 925-940.
5. Arora, V. K. (2008, July). Engineering the soul of management in the nano era. In *PICMET'08-2008 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology* (pp. 742-753). IEEE.
6. Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*, 32(4), 614-626.
7. Palit, S., & Hussain, C. M. (2021). Consumer Nanoproducts and Environmental Engineering Science: Critical Overview. *Handbook of Consumer Nanoproducts*, 1-13.

8. Sebastian, V. (2022). Toward continuous production of high-quality nanomaterials using microfluidics: Nanoengineering the shape, structure and chemical composition. *Nanoscale*, 14(12), 4411-4447.
9. Madsen, D. Ø., & Stenheim, T. (2015). The Balanced Scorecard: A review of five research areas. *American Journal of Management*, 15(2), 24-41.
10. Modell, S. (2012). The politics of the balanced scorecard. *Journal of Accounting & Organizational Change*, 8(4), 475-489.
12. Chan, L. K., & Wu, M. L. (2002). Quality function deployment: A literature review. *European journal of operational research*, 143(3), 463-497. Chan, L. K., & Wu, M. L. (2002). Quality function deployment: a comprehensive review of its concepts and methods. *Quality engineering*, 15(1), 23-35.
13. Bossert, J. L. (2021). *Quality function deployment: The practitioner's approach*. CRC Press.
14. Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*, 40(2), 828-838.
15. Shebl, N. A., Franklin, B. D., & Barber, N. (2012). Failure mode and effects analysis outputs: are they valid?. *BMC health services research*, 12(1), 1-10.
16. Ashley, L., & Armitage, G. (2010). Failure Mode and Effects Analysis. *Journal of patient safety*, 6(4), 210-215.
17. Fernández-Cruz, M. L., Hernandez-Moreno, D., Catalán, J., Cross, R. K., Stockmann-Juvala, H., Cabellos, J., ... & Janer, G. (2018). Quality evaluation of human and environmental toxicity studies performed with nanomaterials—the GUIDEnano approach. *Environmental Science: Nano*, 5(2), 381-397.
18. Siivola, K. M., Burgum, M. J., Suárez-Merino, B., Clift, M. J., Doak, S. H., & Catalán, J. (2022). A systematic quality evaluation and review of nanomaterial genotoxicity studies: a regulatory perspective. *Particle and fibre toxicology*, 19(1), 59.
19. Cockburn, A., Bradford, R., Buck, N., Constable, A., Edwards, G., Haber, B., ... & Wildemann, T. (2012). Approaches to the safety assessment of engineered nanomaterials (ENM) in food. *Food and Chemical Toxicology*, 50(6), 2224-2242.

## Лекція 6

### Функціональне моделювання процесу синтезу наноструктур заданого рівня якості

#### Зміст

6.1 Якість наноматеріалів та зв'язок з якістю технологічних процесів

6.2 Нотація IDEF0

6.3 Побудова функціональної моделі за допомогою нотації IDEF0

6.4 Визначення критеріїв якості наноструктур

6.5 Системний підхід до управління якістю наноструктур

Перелік питань для самоперевірки

Теми для самостійного опрацювання

Список використаних та рекомендованих джерел

#### **6.1 Якість наноматеріалів та зв'язок з якістю технологічних процесів**

Якість продукції визначається як ступінь характеристик продукту, що задовільняє висунуті до нього вимоги. Рівень якості розуміється як категорія чи розряд, надані різним вимогам щодо якості продукції, які мають те саме функціональне застосування. Тому заданий рівень якості доцільно визначити як відповідність оцінюваних показників якості встановленим (еталонним) значенням. Забезпечення якості є складовою загальної системи управління якістю продукції. Тому заданий рівень якості продукції є наслідком діяльності всієї системи управління якістю. Регульовані властивості визначимо як набуті показники продукції, заданого рівня якості, яких можливо досягти при застосуванні системи управління якістю.

Тож, для отримання якісних наноструктур із заданими регульованими властивостями необхідним є створення системи

забезпечення якості наноструктур через управління процесом синтезу наноструктур. Синтез наноструктур будемо розглядати як процес здійснення діяльності, що реалізується в певному часовому проміжку та в певній послідовності відповідно до заданих стадій та етапів. Тобто тут і далі будемо вважати, що «управління якістю» та «забезпечення якості» є синонімами, так як забезпечити якість наноструктур можливо тільки через управління цього процесу.

Критерії якості визначаються декомпозицією системи критеріїв якості кожного структурного рівня з урахуванням його призначення. Керуючі технологічні чинники встановлюються на підставі аналізу результатів декомпозиції властивостей на кожному структурному рівні. Залежності впливу керуючих технологічних чинників на властивості матеріалу відображають у вигляді експериментально-статистичних моделей, сукупність яких є спільною моделлю забезпечення якості синтезованих наноструктур.

Якість наноматеріалів, а саме якість підготовки наноструктурованої поверхні до подальшого використання споживачем, тісно пов'язано з якістю технологічних процесів. До таких процесів належать:

- процес оцінювання якості вихідної напівпровідникової пластини;
- процес синтезу наноструктур заданого рівня якості;
- поточне оцінювання процесу синтезу наноструктур;
- процес остаточного оцінювання якості наноструктур, що виражається у вихідному контролі;
- процес коригування дій та поліпшення показників якості вже сформованих наноструктур.

## 6.2 Нотація IDEF0

Необхідний і достатній набір показників якості наноструктур і додавання нових властивостей повинен складатися з таких показників якості, які впливають на результативність, тобто досягнення бажаного результату. У цьому сенсі взаємопов'язані процеси доречно представляти як компоненти системи. Кожна зі складових системи управління якістю наноструктур є складною підсистемою, що характеризується задачами, функціями й засобами реалізації. Тобто необхідним є:

- опис структури процесів реалізації;
- визначення функцій системи;
- встановлення властивостей системи.

За методологічну основу доречно прийняти методологію IDEF0 (ICAM Definition), що розуміється як топологія опису системи в цілому як безлічі взаємозалежних дій або функцій. Графічний стандарт IDEF0 є частиною методології SADT (метод структурного аналізу й проектування). Основною метою цієї методології є побудова функціональної схеми досліджуваної системи, яка описує всі необхідні процеси з точністю, достатньою для однозначного моделювання діяльності системи. В IDEF0 моделлю називається опис мережі процесів. При цьому реалізуються три базові принципи моделювання процесів (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Базові принципи моделювання процесів у IDEF0

Принцип	Опис принципу
Принцип функціональної декомпозиції	Являє собою спосіб моделювання типової ситуації, коли будь-яка дія, операція, функція можуть бути розбиті (декомпозовані) на більш прості дії, операції, функції. Іншими словами, складна функція може бути представлена у вигляді сукупності елементарних функцій.
Принцип обмеження складності	Суть принципу полягає в тому, що кількість блоків на діаграмі має бути не менше двох і не більше шести.
Принцип контекстної діаграми	Моделювання ділового процесу починається з побудови контекстної діаграми. На цій діаграмі відображається тільки один блок – головна функція, що моделюється.

### 6.3 Побудова функціональної моделі за допомогою нотації IDEF0

На першому етапі побудови функціональної моделі за допомогою IDEF0 необхідно визначити функцію, що є процесом. Визначення цього процесу здійснюється через формування мети. Мета, у свою чергу, відображає причину створення моделі процесу і визначає її призначення. Загальною метою моделей у рамках методології IDEF0 є аналіз відповідності отриманої моделі встановленим вимогам. Для того, щоб виявити процеси, необхідно визначити:

- параметри наноструктури;
- функціональне призначення нанопродукції;
- об'єкти перетворення (напівпровідникові пластини).

Спираючись на цю інформацію, можна виокремити головну функцію (процес) – «Синтезувати наноструктури заданого рівня якості» (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 – Встановлення функції процесу синтезу наноструктур

Функціональне моделювання передбачає поступовий перехід від загального до конкретного шляхом декомпозиції. Контекстна діаграма містить опис діяльності, яку пронизують потоки, що зв'язують суб'єкт діяльності та процес, тобто саму модель, із реальним середовищем.

Входами процесу синтезу наноструктур на поверхні напівпровідника заданого рівня якості є:

- напівпровідникові пластини;
- споживачі продукції (прилади, в яких будуть застосовані наноструктури);
- ресурси;
- зовнішня інформація про стан вихідних напівпровідникових зразків.

Виходами процесу є:

- синтезовані наноструктури заданого рівня якості;

- споживачі (прилади, в яких можуть бути застосовані синтезовані наноструктури, вимоги до якості яких виконано);
- прибуток та окупність від вжитих технологічних інновацій;
- інформація для споживачів (оцінка рівня якості параметрів наноструктур та відповідності функціональному призначенню).

Управління процесом здійснюється на основі, стандартів ISO, технологічних маршрутів, критеріїв якості тощо. До механізмів віднесемо зовнішні впливи, персонал та наявне обладнання для синтезу наноструктур. Карта процесу представлена на рис. 6.2.

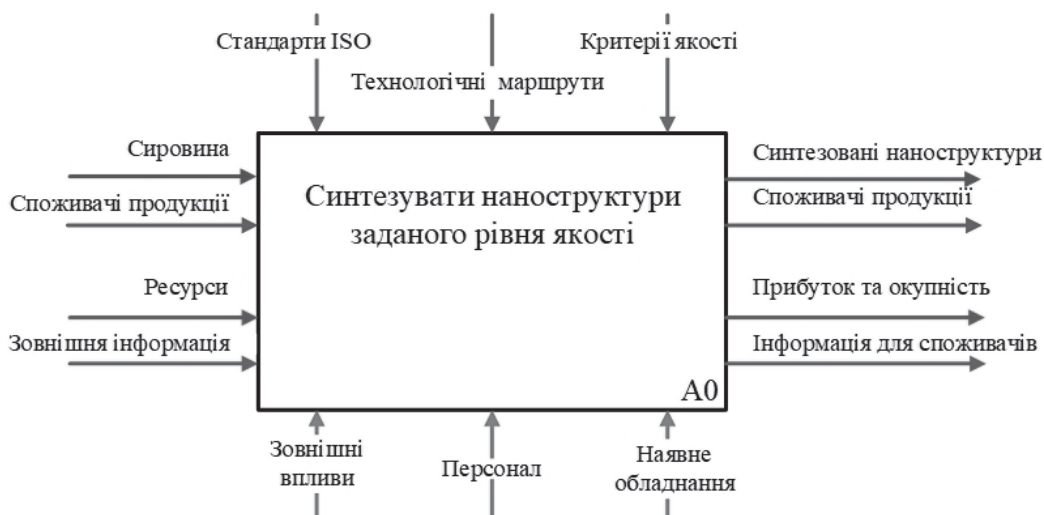


Рисунок 6.2 – Контекстна діаграма синтезу наноструктур заданого рівня якості

Враховуючи цілі моделювання – відповідність процесу вимогам стандартів ISO – процес «Синтезувати наноструктури заданого рівня якості» включає наступні функції (процеси):

- управління якістю;
- управління ресурсами;
- управління синтезом;

– оцінювання і покращення якості.

Згідно методології IDEF0, кожний блок обов'язково має містити хоча б по одній дузі входу, виходу, управління і механізму.

Розглянемо взаємодії між процесами, що складають процес «Синтезувати наноструктури заданого рівня якості» (рис. 6.3).

Функція A1 «Управління якістю» є керуючою для всіх інших функцій. Відповідно до цього виходи «Вимоги, інструкції» є керуючим для всіх інших функцій системи.

Функція A2 «Управління ресурсами» має зв'язок «вихід-механізм» з функцією A3 «Управління синтезом». У свою чергу, вихід процесу A3 «Управління синтезом» є входом до функції A4 «Оцінювання і покращення якості».

Виходами функції A4 «Оцінювання й покращення якості» будуть виступати: наноструктури заданого рівня якості; споживачі продукції (прилади), інформація про якість наноструктур та окупність технологічних операцій по синтезу наноструктур.

Далі проводиться декомпозиція по всім чотирьом функціям A1«Управління якістю», A2 «Управління ресурсами», A3 «Управління синтезом», A4 «Оцінювання і покращення якості».

Якість наноструктур буде зумовлюватися технологічними чинниками синтезу, тому розглянемо структуру мережі процесів, що складають функцію A3 «Управління синтезом» (рис. 6.4).

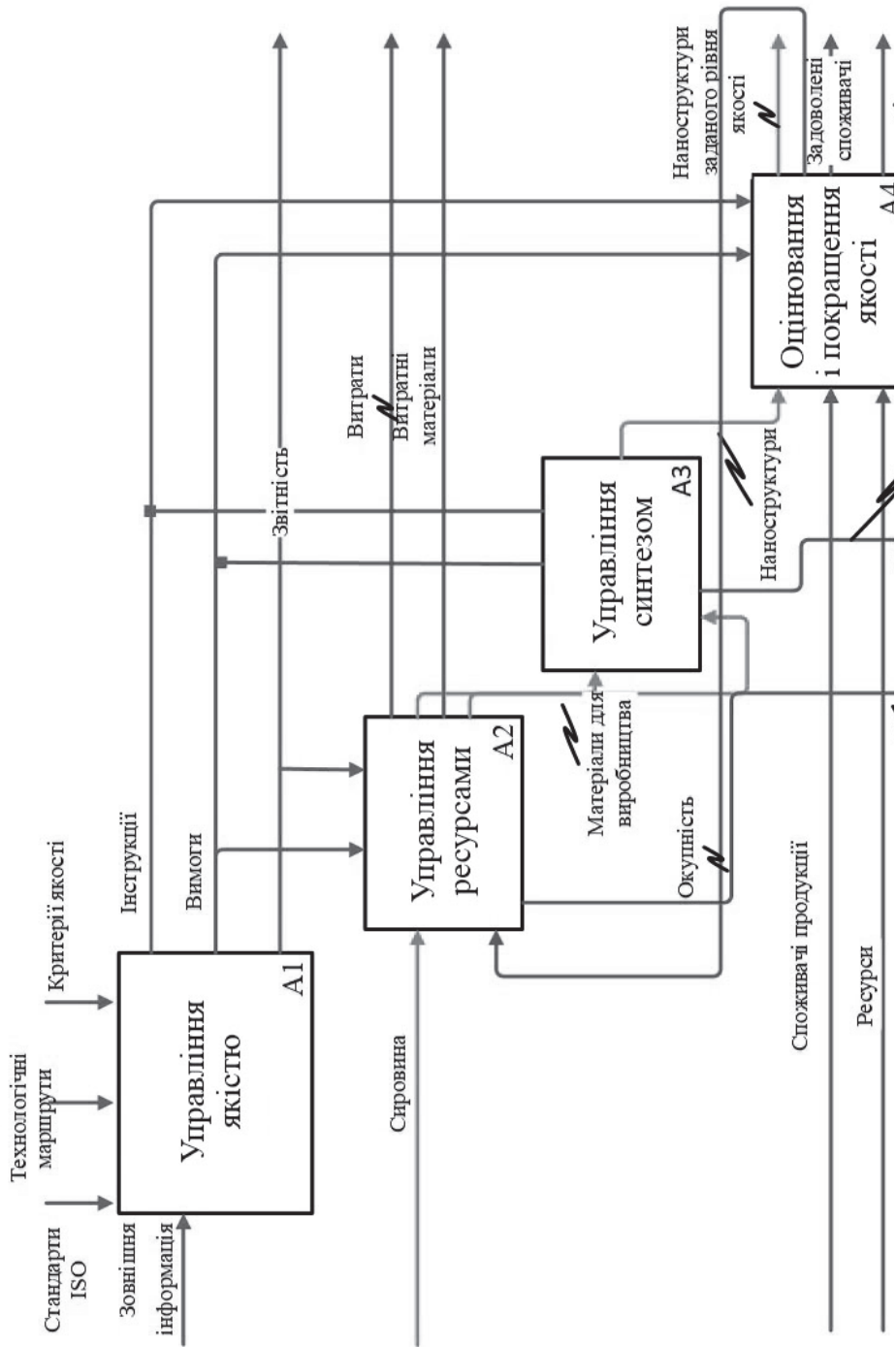


Рисунок 6.3 – Декомпозиція процесу «Синтезувати наноструктури заданого рівня якості»

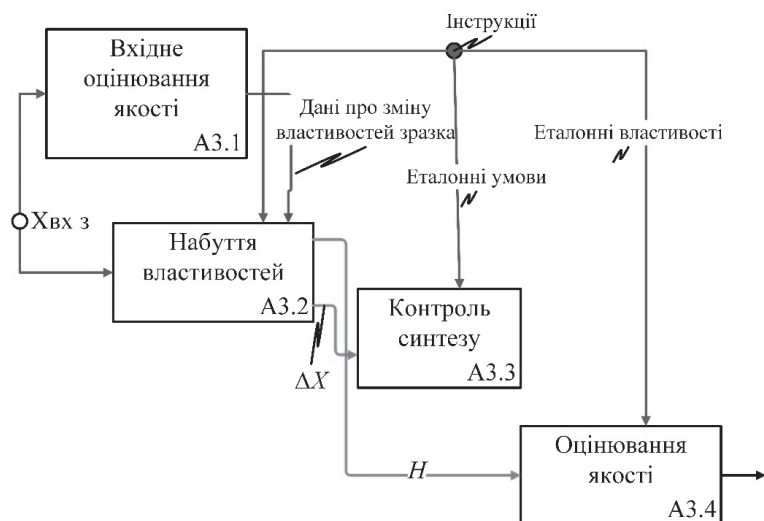


Рисунок 6.4 – Структура мережі процесів, що складають функцію «Управління синтезом»

На вхід процесу А.3.1 «Вхідне оцінювання якості» надходить інформація про матеріали, які застосовуються для виробництва наноструктур, тобто напівпровідникові пластини. Інформацію про параметри пластин отримують з паспорта матеріалу, або проводячи неруйнівний контроль тих властивостей напівпровідника, які впливатимуть на вихідні властивості синтезованих наноструктур.

#### 6.4 Визначення критеріїв якості наноструктур

Множина властивостей вихідного зразка являє собою сукупність часткових властивостей, і може бути представлена множиною показників:

$$\chi = \sum_{i=1}^n f(\alpha_i), \quad (6.1)$$

де  $n$  – кількість властивостей, що оцінюються,  $\alpha_i$  – властивості зразка, кожна з яких, у свою чергу, може бути представлена множиною показників:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_{12} + \dots + \alpha_{1k} \\ \alpha_2 = \alpha_{21} + \alpha_{22} + \dots + \alpha_{2l} \\ \alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2} + \dots + \alpha_{mp} \end{cases}, \quad (6.2)$$

де  $k, l, m, p \in N$ .

До них належать:

- тип провідності напівпровідника,
- орієнтація поверхні,
- рівень легування,
- тип легуючої домішки,
- тип і кількість дефектів тощо.

Звісно, вихідні зразки характеризуються певним рівнем якості – серед загальної партії можуть бути дефектні зразки або ті, що частково не відповідають заданим параметрам. Тому необхідно мати той набір показників вихідних властивостей зразка, який буде вважатися еталонним. Виходячи з цього можна визначити функцію процесу АЗ.1 «Вхідний контроль якості», яка постає в порівнянні властивостей, що входять у вхідну множину властивостей зразка  $\chi$  – з властивостями, що входять у еталонну множину властивостей зразка, шляхом перевірки попадання  $\chi$  в інтервал еталонних значень:

$$\chi \in [\chi_{st \min}; \chi_{st \max}], \quad (6.3)$$

де  $\chi_{st\min}$  – мінімально допустиме еталонне значення властивості,  
 $\chi_{st\max}$  – максимально допустиме еталонне значення властивості.

Еталонна множина властивостей зразка формується на основі даних, отриманих з наявних інформаційних ресурсів – національних та міжнародних стандартів, паспортів матеріалу, вимог, що висуваються до чистоти і якості матеріалу, а також інших технічних матеріалів, і складається з множини еталонних показників:

$$\begin{cases} \chi_{st\min} = \sum_{i=1}^n f(\chi_{ist\min}) \\ \chi_{st\max} = \sum_{i=1}^n f(\chi_{jst\max}) \end{cases} . \quad (6.4)$$

При синтезі наноструктур на поверхні напівпровідників деякі властивості значно змінюються, деякі – зовсім втрачають сенс (наприклад, гладкість поверхні). Крім того, напівпровідникова пластина з шаром наноматеріалу на поверхні набуває зовсім інших властивостей, якими не володів вихідний кристал. Тому у певному наближенні можна ввести ще одну характеристику  $\Delta\chi$  – приріст функції властивостей вхідної множини властивостей зразка. Ця величина описується своєю множиною показників:

$$\Delta\chi = \{ \Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_m \} , \quad (6.5)$$

$$\text{де } \begin{cases} \Delta\chi_1 = \Delta\chi_{11} + \Delta\chi_{12} + \dots + \Delta\chi_{1k} \\ \Delta\chi_2 = \Delta\chi_{21} + \Delta\chi_{22} + \dots + \Delta\chi_{2l} \\ \Delta\chi_m = \Delta\chi_{m1} + \Delta\chi_{m2} + \dots + \Delta\chi_{mp} \end{cases} . \quad (6.6)$$

де  $k, l, m, p \in N$ .

Тобто приріст функції властивостей вхідної множини властивостей зразка  $\Delta\chi$  є виходом процесу АЗ.1 «Вхідне оцінювання якості». Інформація, у вигляді приросту функції властивостей вхідної множини властивостей зразка  $\Delta\chi$  являється керуючим фактором для процесу АЗ.2 «Набуття властивостей».

Вхідна множина умов формування наноструктур  $T$  є сукупністю умов, передбачених етапами технологічного процесу.

Як вже було сказано раніше, вихідні властивості зразка не лише змінюються, а й відбувається набуття нових властивостей. Для зручності будемо вважати, що властивості саме «набуваються». Згідно з основними принципами нотації IDEF0 на вхід процесу «Набуття властивостей» надходить множина вхідних властивостей зразка  $\chi$ , тобто ті параметри напівпровідника, якими він володів до технологічної обробки.

Множина умов формування наноструктур визначається:

- рекомендаціями до технологічного процесу формування наноструктур на основі напівпровідникових кристалів;
- стандартами;
- положеннями;
- технологічними маршрутами та картами;
- кодексами усталеної практики;
- протоколами лабораторних досліджень;

– інформацією, що отримується з інших джерел (наукові статті, патенти) тощо.

На основі цих документів складається множина технологічних чинників:

$$T = \sum_{i=1}^k f(\tau_i), \quad (6.7)$$

де  $k$  – кількість умов формування наноструктур;

$\tau_1 = \{\tau_{11}, \tau_{11}, \dots, \tau_{1k}\}$  – множина інтервалів технологічного процесу (час обробки загальний, терміни кожного з етапів технологічного процесу тощо);

$\tau_2 = \{\tau_{21}, \tau_{21}, \dots, \tau_{2l}\}$  – множина підготовчих та заключних етапів (підготовка, поліровка, пасивація, відпал тощо);

$\tau_3 = \{\tau_{31}, \tau_{31}, \dots, \tau_{3m}\}$  – множина додаткових умов формування наноструктур (освітлення, підігрів та перемішування електроліту тощо);

$\tau_4 = \{\tau_{41}, \tau_{41}, \dots, \tau_{4p}\}$  – множина основних умов формування наноструктур (щільність струму, склад і концентрація електроліту) тощо;

$$k, l, m, p \in N.$$

Функція процесу «Набуття властивостей» описується наступним чином:

$$H = \frac{f(\chi) + f(\tau)}{f(\psi)}, \quad (6.8)$$

де  $f(\psi)$  – множина зовнішніх факторів які можуть впливати на вихідні властивості зразків;

$H$  – множина набутих властивостей зразка:

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}, \quad (6.9)$$

яка описується набором атрибутів:

$$\begin{cases} h_1 = h_{11} + h_{12} + \dots + h_{1k} \\ h_2 = h_{21} + h_{22} + \dots + h_{2l} \\ h_m = h_{m1} + h_{m2} + \dots + h_{mp} \end{cases} \quad (6.10)$$

де  $k, l, m, p \in N$ .

Виходами процесу АЗ.2 «Набуття властивостей» являються:

- множина вихідних властивостей зразка,
- множина набутих властивостей зразка.

Звісно, під час технологічного процесу синтезу наноструктур здійснюються певні технологічні операції. Ці операції необхідно піддавати контролю протягом всього технологічного процесу. Тому врахування поточного оцінювання являється важливою ланкою в забезпеченні якості синтезованих наноструктур. Поточний контроль у залежності від методу синтезу наноструктур можна проводити за двома напрямками:

- контроль суто технологічних операцій (зняття вольт-амперних характеристик, контроль температурного режиму тощо);
- проміжний контроль якості зразків (якщо це є можливим і доцільним).

Для зручності об'єднаємо ці два напрямки контролю під одним процесом «Контроль синтезу», адже проміжні властивості синтезованих наноструктур корелюють з умовами синтезу.

Функцію процесу АЗ.3, що постає у визначенні попадання моделі технологічного процесу синтезу наноструктур у інтервал значень еталонної моделі, представимо в наступному вигляді:

$$\mu \in [\mu_{st \min}; \mu_{st \max}], \quad (6.11)$$

де  $\mu$  – модель технологічного процесу;

$\mu_{st \min}$  – мінімально допустиме еталонне значення еталонної моделі технологічного процесу,

$\mu_{st \max}$  – максимально допустиме еталонне значення еталонної моделі технологічного процесу.

Еталонна множина моделі технологічного процесу формується із технологічних режимів і складається з множини еталонних показників:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{st \min} = \sum_{i=1}^s f(\mu_{i \min}) \\ \mu_{st \max} = \sum_{j=1}^s f(\mu_{j \max}) \end{array} \right. . \quad (6.12)$$

Виходами процесу АЗ.3 «Контроль синтезу» будуть виступати оцінки моделі технологічного процесу, які є інформацією про якість виконання процесу АЗ «Управління синтезом».

Процес АЗ.4 «Оцінювання якості» являється завершальним для процесу АЗ. На цьому етапі необхідно зробити висновок про плин технологічного процесу, оцінити його особливості, зробити висновок про можливість повторюваності експерименту та відтворюваність результатів. Цей процес передуює заключному етапу – загальному оцінюванню проведення діяльності та являється важливою ланкою в загальному процесі управління

якістю наноструктур. На вхід процесу АЗ.4 «Оцінювання якості» надходить множина набутих властивостей зразка  $H$ . Функція цього процесу – порівняння набутих властивостей наноструктур з еталонними. Досягнення результату буде характеризуватися попаданням у інтервал еталонних значень набутих властивостей зразка:

$$H \in [H_{st\min}; H_{st\max}], \quad (6.13)$$

де  $H_{st\min}$  – мінімально допустиме еталонне значення набутих властивостей,

$H_{st\max}$  – міаксимально допустиме еталонне значення набутих властивостей.

Виходами процесу АЗ.4 «Оцінювання якості» являються оцінки вихідної множини набутих властивостей зразка, які є інформацією про якість виконання процесу АЗ «Синтезувати наноструктури». Інформацією для споживачів буде оцінка вихідної множини набутих властивостей наноструктур.

Основним процесом АЗ «Синтезувати наноструктури» являється процес АЗ.2 «Реалізовувати додавання властивостей». Узагальнений показник якості буде містити часткові критерії, які складаються із часткових показників. Тобто частковий критерій виконує функцію порівняння набутих властивостей зразка з еталонними значеннями.

Відповідно, критерієм завершення процесу синтезу можна вважати попадання у еталонний інтервал значень. Визначення узагальненого критерію якості буде представлено у наступних розділах.

В якості показника досягнення результату визначимо коефіцієнт якості  $K_{я}$  – відношення реальних властивостей зразка до очікуваних (тих, що намагалися додати під час синтезу наноструктур). Коефіцієнт якості характеризує параметри структури, що було сформовано під час синтезу.

Виходячи із вимог до достатнього рівня якості вихідної моделі, задається необхідна якість –  $K_{я\text{ необ}}$ . Таким чином, критерієм завершення процесу синтезу наноструктур буде:

$$K_{я} \geq K_{я\text{ необ}}. \quad (6.14)$$

Це означає, що під час здійснення процесу синтезу наноструктур досягли бажаного результату.

## **6.5 Системний підхід до управління якістю наноструктур**

Системний підхід до управління якістю наноструктур у загальному розумінні повинен містити певні компоненти (рис. 6.5).

Відповідно до основних положень системного аналізу, наноматеріали доцільно розглядати як складну систему, яка функціонує у зовнішньому середовищі. Зовнішнє середовище у цьому сенсі можна вважати надсистемою, воно визначає:

- умови функціонування (область застосування) наноматеріалу;
- вимоги до матеріалу, згідно з якими може проводитися оцінка їхнього рівня якості.

Зараз простежується тенденція управління якістю матеріалів за допомогою застосування наукових знань, зокрема:

- дослідження адекватності наукових гіпотез про вплив зовнішніх факторів на процеси структуроутворення та експлуатаційні властивості наноматеріалів,

- встановлення кореляцій між технологічними чинниками й набутими властивостями наноструктур;

- дослідження механізмів самоорганізації при синтезі наноструктур тощо.

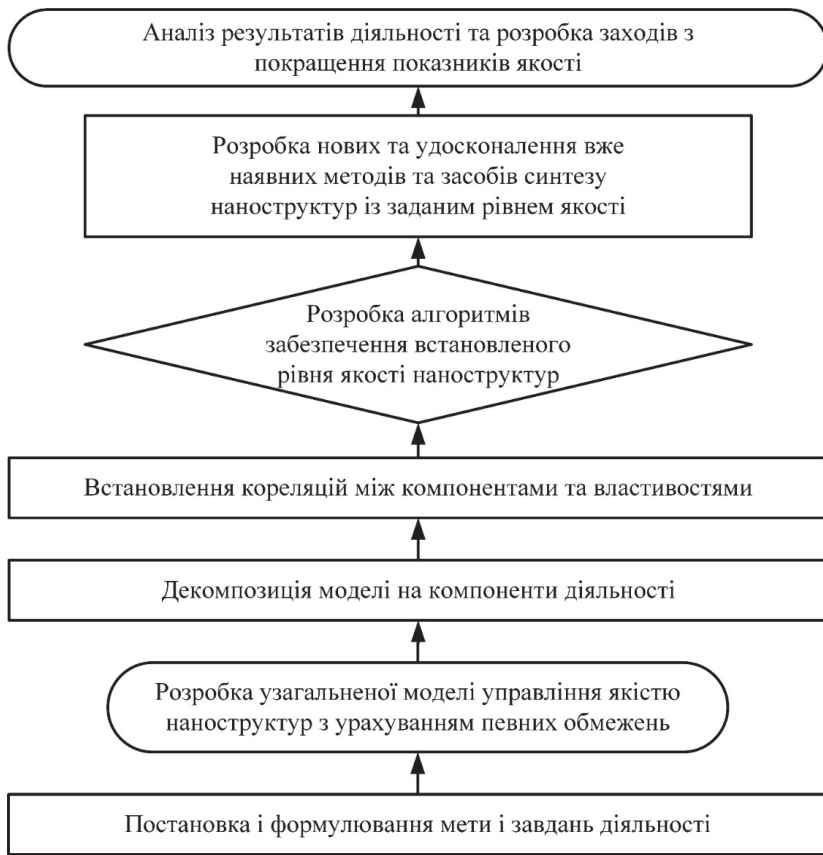


Рисунок 6.5. – Компоненти системи управління якістю наноструктур

Тобто управління якістю наноструктур, як будь-яка складна система, складається із багатьох компонентів, які формуються виходячи з їх функціональних характеристик та взаємовідношень у процесі функціонування системи в цілому.

З урахуванням представлених вище загальних положень системного підходу, а також специфічних особливостей розробки системи управління якістю наноструктур (рис. 6.6) необхідним є реалізація схеми вирішення задач забезпечення якості наноструктурованих наноматеріалів на поверхні напівпровідників (рис. 2.9).

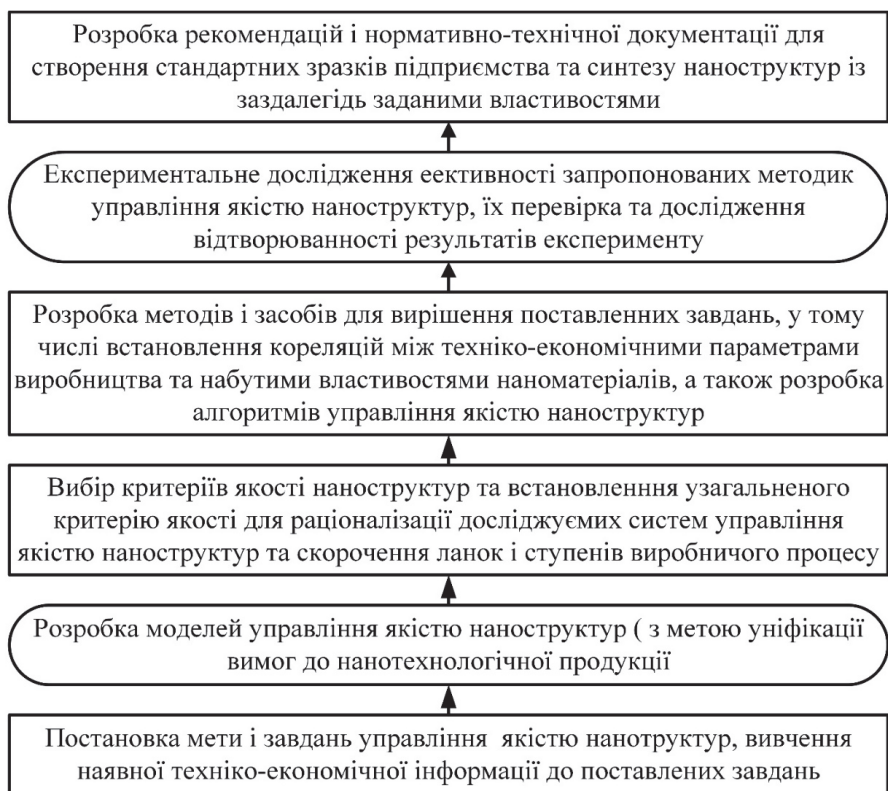


Рисунок 2.8 – Етапи забезпечення якості наноструктур

Проектування і синтез наноматеріалів доцільно проводити по структурних рівнях, так як це виключає вплив додаткових чинників на досліджувані процеси і явища. Зазначений підхід був запропонований у вигляді поліструктурної теорії В. І. Соломатова. Згідно поліструктурної теорії кожен рівень структури матеріалу розглядається окремо, а показники його якості виділяються виходячи з декомпозиції системи критеріїв якості.

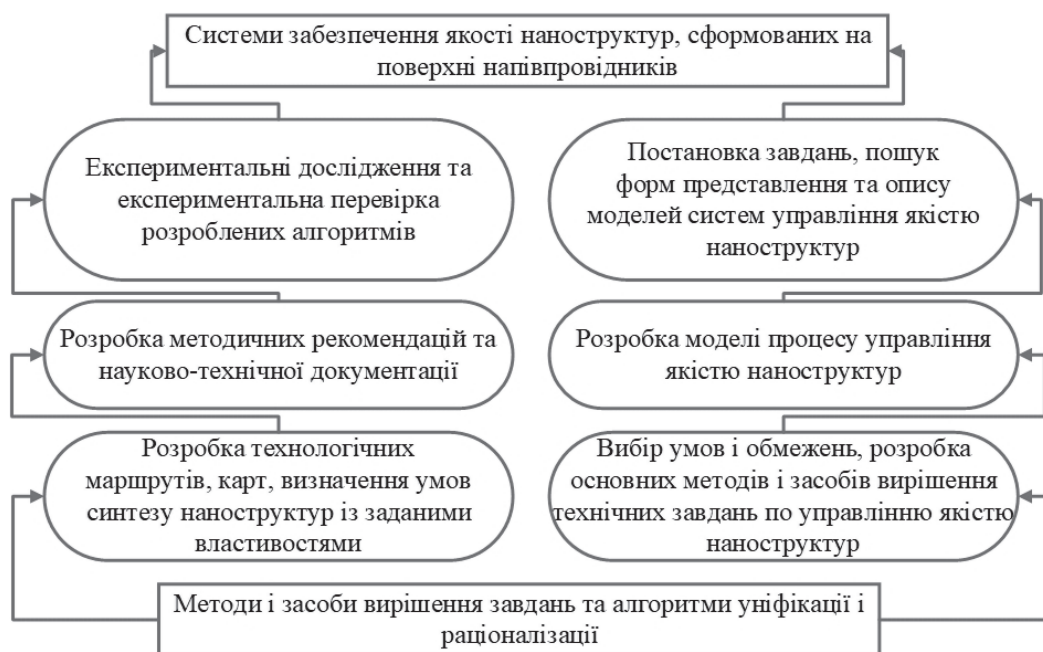


Рисунок 6.7 – Схема вирішення завдань створення системи забезпечення якості наноструктур, сформованих на поверхні напівпровідників

Крім декомпозиції системи критеріїв якості декомпозиція включає в себе визначення для кожного рівня структури керуючих ресурсних і технологічних чинників на підставі аналізу структуроутворення та явищ, що протікають під час синтезу

наноструктури. На підставі емпіричних даних щодо впливу керуючих чинників встановлюють експериментально-статистичні моделі.

Сукупність цих моделей можна вважати загальною моделлю синтезованого матеріалу заданого рівня якості. На основі розроблених часткових моделей та узагальненої моделі забезпечення якості наноструктури стає можливим проведення багатокритеріальної оптимізації. Метою цього постає визначення меж варіювання технологічних чинників, які здатні забезпечити заданий рівень якості синтезованих наноструктур. Тобто при виборі раціональних варіантів систем оптимального управління якістю, більшість виникаючих завдань оптимізації являються багатокритеріальними.

### **Перелік питань для самоперевірки**

Як якість наноматеріалів пов'язана з якістю технологічних процесів, що використовуються для їх синтезу?

Наведіть приклад, коли недолік технологічного процесу безпосередньо впливає на якість отриманого наноматеріалу.

Що таке нотація IDEF0 і яка її основна мета в моделюванні?

Поясніть основні компоненти діаграми IDEF0.

Опишіть етапи побудови функціональної моделі для синтезу наноструктури з використанням нотації IDEF0.

Як нотацію IDEF0 можна використовувати для виявлення потенційних вузьких місць або неефективності в процесі синтезу наноструктур?

Які загальні критерії якості використовуються для оцінки наноструктур?

Як ці критерії якості можна кількісно виміряти?

Окреслити ключові складові системного підходу до управління якістю при синтезі наноструктур.

Як системний підхід сприяє постійному покращенню якості наноструктур?

### **Теми для самостійного опрацювання**

*Якість наноматеріалів і зв'язок з якістю технологічних процесів (розділ 6.1)*

**Зв'язок між якістю та процесом у наноматеріалах:** охарактеризуйте взаємозв'язку між якістю наноматеріалів і технологічними процесами, що використовуються в їх синтезі.

**Вплив параметрів процесу:** поясніть, як варіації параметрів процесу можуть вплинути на якість наноматеріалів.

*Нотація IDEF0 (розділ 6.2)*

**Розуміння нотації IDEF0:** аргументуйте походження, розвиток і стандартні правила створення діаграм IDEF0.

**IDEF0 в інших галузях:** сформулюйте принципи застосування нотації IDEF0 в галузях, відмінних від нанотехнологій.

*Побудова функціональної моделі з використанням нотації IDEF0 (розділ 6.3)*

**Тематичні дослідження з моделювання IDEF0:** запропонуйте приклади, де нотація IDEF0 була успішно використана для моделювання синтезу наноструктур.

**Програмні засоби для моделювання IDEF0:** ознайомтеся з програмними засобами, які полегшують побудову діаграм IDEF0.

*Визначення критеріїв якості наноструктур (розділ 6.4)*

**Метрики якості в нанотехнологіях:** сформулюйте різні показники якості, які спеціально використовуються для наноструктур, і те, як вони вибираються.

**Стандартизація критеріїв якості:** ознайомтеся з існуючими стандартами або протоколами для визначення критеріїв якості в нанотехнологіях.

*Системний підхід до управління якістю наноструктур (розділ 6.5)*

**Системи управління якістю в нанотехнологіях:** співвіднесіть різні системи управління якістю та їхнім застосуванням у нанотехнологіях.

**Моделі постійного вдосконалення:** дізнайтеся про такі моделі, як «Шість сигм», та поясніть, як їх можна адаптувати для системного підходу до управління якістю в нанотехнологіях.

### **Список використаних та рекомендованих джерел**

1. Hristozov, D. R., Zabeo, A., Foran, C., Isigonis, P., Critto, A., Marcomini, A., & Linkov, I. (2014). A weight of evidence approach for hazard screening of engineered nanomaterials. *Nanotoxicology*, 8(1), 72-87.
2. Fernández-Cruz, M. L., Hernandez-Moreno, D., Catalán, J., Cross, R. K., Stockmann-Juvala, H., Cabellos, J., ... & Janer, G. (2018). Quality evaluation of human and environmental toxicity studies performed with nanomaterials—the GUIDEnano approach. *Environmental Science: Nano*, 5(2), 381-397.
3. Siivola, K. M., Burgum, M. J., Suárez-Merino, B., Clift, M. J., Doak, S. H., & Catalán, J. (2022). A systematic quality evaluation and review of nanomaterial

genotoxicity studies: a regulatory perspective. *Particle and fibre toxicology*, 19(1), 59.

4. Cockburn, A., Bradford, R., Buck, N., Constable, A., Edwards, G., Haber, B., ... & Wildemann, T. (2012). Approaches to the safety assessment of engineered nanomaterials (ENM) in food. *Food and Chemical Toxicology*, 50(6), 2224-2242.

5. Comandella, D., Gottardo, S., Rio-Echevarria, I. M., & Rauscher, H. (2020). Quality of physicochemical data on nanomaterials: an assessment of data completeness and variability. *Nanoscale*, 12(7), 4695-4708.

6. Robinson, R. L. M., Lynch, I., Peijnenburg, W., Rumble, J., Klaessig, F., Marquardt, C., ... & Harper, S. L. (2016). How should the completeness and quality of curated nanomaterial data be evaluated?. *Nanoscale*, 8(19), 9919-9943.

7. Worth, A., Aschberger, K., Asturiol, D., Bessems, J., Gerloff, K., Graepel, R., ... & Richarz, A. N. (2017). Evaluation of the availability and applicability of computational approaches in the safety assessment of nanomaterials. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 10, 248139.

8. Lubinski, L., Urbaszek, P., Gajewicz, A., Cronin, M. T. D., Enoch, S. J., Madden, J. C., ... & Puzyn, T. (2013). Evaluation criteria for the quality of published experimental data on nanomaterials and their usefulness for QSAR modelling. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 24(12), 995-1008.

9. Presley, A., & Liles, D. H. (1995, May). The use of IDEF0 for the design and specification of methodologies. In *Proceedings of the 4th industrial engineering research conference* (pp. 442-448).

10. Waissi, G. R., Demir, M., Humble, J. E., & Lev, B. (2015). Automation of strategy using IDEF0—A proof of concept. *Operations Research Perspectives*, 2, 106-113.

11. Dorador, J. M., & Young, R. I. (2000). Application of IDEF0, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 13(5), 430-445.

12. Ang, C. L., Luo, M., Khoo, L. P., & Gay, R. K. L. (1997). A knowledge-based approach to the generation of IDEF0 models. *International Journal of Production Research*, 35(5), 1385-1412.

13. Peters, L., & Peters, J. (1997, April). Using IDEF0 for dynamic process analysis. In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (Vol. 4, pp. 3203-3208). IEEE.
14. Manenti, G., Ebrahimi-arjestan, M., Yang, L., & Yu, M. (2019, October). Functional modelling and IDEF0 to enhance and support process tailoring in systems engineering. In 2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE) (pp. 1-8). IEEE.
15. Suchikova, Y. O., Kovachov, S. S., Shishkin, G. O., Pimenov, D. O., Lazarenko, A. S., Bondarenko, V. V., & Bogdanov, I. T. (2021). Functional model for the synthesis of nanostructures of the given quality level. Archives of Materials Science and Engineering, 107(2).
16. Berladir, K. V., Mitalova, Z., Pavlenko, I. V., Trojanowska, J., Ivanov, V. O., & Rudenko, P. V. (2023). Design and manufacturing of polymer composite materials using quality management methods.
17. Shankar Raman, A. (2022). An Information Modeling Framework for Support of Sustainable Manufacturing System Design Decision Making.

*Навчальне видання*

Ігор Богданов, Яна Сичікова, Олена Кривильова, Сергій Ковачов

**Курс лекцій**  
**Наноматеріалознавство**

Редактор Яна Сичікова  
Дизайнер Сергій Ковачов

Підписано до друку 27.10.2023 р.  
Формат 70x100/16. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 8,77  
Наклад 300 прим.

ФОП Самченко Анастасія Михайлівна  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК №7906 від 03.08.2023 р.  
Тел. (093) 860-62-21.