

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Іван ПРОЦЕНКО
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 171 Електроніка освітньої-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ НАНОСЕНСОРІВ**

Здобувача групи ЕП-91 Прийми Антона Олеговича

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

Антон ПРИЙМА

Керівник доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
к.ф.-м.н., доцент

Наталія ШУМАКОВА

Суми – 2023

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 37 сторінках, зокрема, містить 11 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел із 24 найменувань.

Найпоширенішим застосуванням сучасної нанотехнології є розробка різноманітних наносенсорів із спеціальними заданими властивостями, їх постійне конструктивне вдосконалення та розширення широкого спектру застосувань, включаючи електроніку, медицину, біотехнології, військову, хімічну, харчову промисловість, екологію тощо. Дослідження конструктивних особливостей та сфер застосування наносенсорів є актуальною темою, яка має великий науковий і практичний потенціал для подальшого розвитку технологій та вирішення різних проблем сучасного світу.

Мета кваліфікаційної роботи полягала не тільки в аналізі наукової літератури з даної тематики, а також дослідженні конструктивних особливостей різноманітних наносенсорів та їх спектру застосування.

В ході виконання кваліфікаційної роботи проведено аналіз структурних і конструктивних особливостей наносенсорів як вітчизняного так і зарубіжного виробництва. Дослідження наносенсорів відкриває нові можливості для вирішення різних проблем, зокрема, забезпечення більш точної діагностики хвороб, підвищення ефективності виробничих процесів та розробки нових матеріалів з властивостями, що задовольняють потреби сучасного ринку.

Отримані результати можна використати для створення нових пристроїв, які забезпечують швидке, чутливе та точне виявлення аналітів у різних доменах застосування, впровадження в промисловість, що може сприяти покращенню якості життя та ефективності відповідних процесів.

Теза до роботи була опублікована на конференції ФЕЕ-2023, «Structural features and application of nanosensors».

Ключові слова: ЕЛЕКТРОНІ НАНОСЕНСОРИ, ЗАСТОСУВАННЯ НАНОСЕНСОРІВ, КЛАСИФІКАЦІЯ НАНОСЕНСОРІВ, НАНОСЕНСОР, НАНОТЕХНОЛОГІЇ, ОПТИЧНІ НАНОСЕНСОРИ, ХІМІЧНІ НАНОСЕНСОРИ.

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 –Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
І.Ю.Проценко
«20» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Прийми Антона Олеговича

**1.Тема роботи: КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ
НАНОСЕНСОРІВ**

затверджена наказом по університету від «15» травня 2023р. , №0499-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 10 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи(актуальність, мета)

Мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі наукової літератури з даної тематики, а також дослідженні конструктивних особливостей різноманітних наносенсорів та їх спектру застосування. В ході виконання кваліфікаційної роботи проведено аналіз структурних і конструктивних особливостей наносенсорів як вітчизняного так і зарубіжного виробництва. Дослідження конструктивних особливостей та сфер застосування наносенсорів є актуальною темою, яка має великий науковий і практичний потенціал для подальшого розвитку технологій та вирішення різних проблем сучасного світу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Основні поняття та класифікація наносенсорів, особливості виготовлення.
2. Конструктивні особливості та принцип роботи наносенсорів.
3. Застосування наносенсорів в електроніці та інформаційних та медицині.

4. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди №1-2 – Загальна інформація

Слайди №3-6 – Принцип роботи та конструктивно-технологічні особливості наносенсорів

Слайди №7-10 – Застосування наносенсорів

Слайд №11 – Висновки

6. Дата видачі завдання 25.05.2022р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|----|--|--|-------------|
| 1. | Аналіз літературних даних | до 25.05.2022р. | <i>вик.</i> |
| 2. | Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів | до 05.06.2022р. | <i>вик.</i> |
| 3. | Підготовка тексту кваліфікаційної роботи | до 08.06.2022р. | <i>вик.</i> |
| 4. | Попередній захист роботи | 12.06.2022р., 10 ⁰⁵ (дистанційно) | <i>вик.</i> |
| 5. | Захист роботи в екзаменаційній комісії | 20.06.2022 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно) | <i>вик.</i> |

Студент

Прийма А.О.

Науковий керівник

Н.І. Шумакова

ЗМІСТ

| | с. |
|--|----|
| ВСТУП | 4 |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСЕНСОРІВ | 5 |
| 1.1. Основні поняття та класифікація наносенсорів | 5 |
| 1.2. Особливості виготовлення наносенсорів..... | 7 |
| 1.3. Хімічні та фізичні процеси взаємодії наносенсорів з об'єктом вимірювання | 9 |
| 1.4. Методи дослідження та аналізу даних, отриманих за допомогою наносенсорів | 10 |
| РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ НАНОСЕНСОРІВ | 12 |
| 2.1. Принцип дії наносенсорів | 12 |
| 2.1.1. Хімічні наносенсори | 13 |
| 2.1.2. Оптичні наносенсори..... | 17 |
| 2.1.3. Електронні наносенсори..... | 20 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОСЕНСОРІВ | 24 |
| 3.1. Застосування наносенсорів в електроніці та інформаційних технологіях..... | 24 |
| 3.2. Застосування наносенсорів в промисловості та екології..... | 26 |
| 3.3. Застосування наносенсорів в медицині та біології..... | 28 |
| 3.4. Переваги та недоліки застосування наносенсорів порівняно з традиційними методами вимірювання..... | 32 |
| ВИСНОВКИ | 34 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 36 |

ВСТУП

Нанотехнологія - одна з найперспективніших галузей сучасної науки і техніки, вона базується на використанні різноманітних наноматеріалів з особливими, заданими фізичними та хімічними властивостями. Одним з найперспективніших застосувань нанотехнологій є використання наносенсорів, які можуть виявляти різні аналіти з високою чутливістю і специфічністю.

Наразі вчені та інженери постійно розробляють нові конструкції наносенсорів, які є менш складними у виготовленні, більш чутливими та надійними в роботі і можуть бути використані в широкому спектрі промисловості. Це питання є актуальним, оскільки досягнення кращих характеристик наносенсорів дозволить значно розширити їх застосування в різних галузях, включаючи електроніку, медицину, біотехнології, харчову промисловість, екологію тощо.

Так в США оцінили, що близько 20 000 дослідників працюють у сфері наносенсорів. У Великобританії Інститут медицини праці підрахував, що приблизно 2000 людей працюють у нових компаніях, що займаються виробництвом наносенсорів. Крім того, різні організації в усьому світі інвестують у ринок наносенсорів та їх нові застосування [1].

Вихідні дані для дослідження – це аналіз наукових публікацій та патентів у галузі наносенсорів, зокрема з питань конструкційної особливості, властивостей та їх сфери застосування

Обґрунтування необхідності досліджень зумовлено швидким розвитком нанотехнології і у зв'язку з цим існує необхідність аналізу структурних особливостей різноманітних наносенсорів, що допоможе принести значний внесок у розвиток різних галузей науки та техніки.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСЕНСОРІВ

1.1. Основні поняття та класифікація наносенсорів

Наносенсори - це вимірювальні пристрої, які використовують наноматеріали для виявлення та вимірювання різних параметрів. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи метали, напівпровідники, кераміку та полімери. На рис. 1.1 представлено одну із класифікацій наносенсорів.



Рисунок 1.1 – Класифікація наносенсорів за отриманням молекул, структурою та застосуванням [2].

На основі джерела енергії наносенсори можна класифікувати на два типи, тобто активні наносенсори, такі як термістори, і пасивні наносенсори без джерела енергії, такі як термопара та п'єзоелектричні наноматеріали. На рис. 1.2 також представлено різні типи наносенсорів і деякі важливі під категорії.



Рисунок 1.2 – Різні типи наносенсорів і деякі важливі під категорії на основі різних типів елементів. [3].

Залежно від методу вимірювання наносенсори можна класифікувати так [3]:

1. Оптичні наносенсори: вимірюють параметри, засновані на зміні оптичних властивостей матеріалу, таких як світловий сигнал, оптичне поглинання тощо.
2. Електронні наносенсори: вимірюють електронні властивості матеріалів, такі як електропровідність, електричний опір і коефіцієнт термічного опору.
3. Механічні наносенсори: вимірюють параметри, що залежать від механічних властивостей матеріалу, такі як маса, деформація та еластичність.
4. Хімічні наносенсори: вимірюють параметри, що залежать від хімічних властивостей матеріалу, такі як концентрація, газову чутливість тощо.
5. Біологічні наносенсори: вимірюють параметри, які залежать від біологічних властивостей матеріалу, такі як рівень реакції на біомолекули, зміни клітинної електричної активності, реакція на віруси і бактерії.
6. Наносенсори на основі магнітних матеріалів: вимірюють параметри, засновані на магнітних властивостях матеріалів, таких як магнітний момент, магнітна сприйнятливність і магнітний резонанс.

7. Наносенсори на основі плазмонів: вимірювання на основі плазмонних коливань, викликаних поглинанням і розсіюванням світла.

8. Наносенсори на основі графену: використовують графен, моношар вуглецю з унікальними електронними властивостями, для вимірювання різних параметрів.

Крім того, їх можна класифікувати за типом взаємодії з аналізованим об'єктом:

1. Контактні наносенсори: вимірюють параметри шляхом прямого контакту з аналізованим об'єктом.

2. Безконтактні наносенсори: вимірюють параметри без прямого контакту з аналізованим об'єктом.

3. Полімерні наносенсори: використовують полімери як рецептори для виявлення різних речовин, таких як білки та нуклеїнові кислоти.

4. Волоконно-оптичні наносенсори: використовують оптичне волокно для вимірювання, наприклад, концентрації речовини.

1.2. Особливості виготовлення наносенсорів

Виробництво наносенсорів- це складний, багатоетапний процес. Загалом, він складається з наступних операцій [4]:

1. Вибір матеріалу: наносенсори можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи кремній, золото, платину і вуглець. Вибір матеріалу залежить від конкретного застосування наносенсора.

2. Осадження тонких плівок: це етап нанесення тонкої плівки матеріалу на підкладку за допомогою таких методів, як фізичне осадження з газової фази, хімічне осадження з газової фази і електрохімічне осадження з газової фази.

3. Фотолітографія: етап, на якому за допомогою світла створюється малюнок на тонкій плівці матеріалу. Шаблони використовуються для створення структур на поверхні тонкої плівки.

4. Етап травлення: це процес, на якому матеріал видаляється за допомогою хімічного травлення. Хімічне травлення створює наноструктури на поверхні плівки.

5. Обробка поверхні: процес, в якому поверхня обробляється для поліпшення властивостей наносенсора. Наприклад, поверхня наносенсора може бути функціоналізована хімічними методами.

6. Тестування: це етап вимірювання властивостей наносенсора та оцінки його продуктивності.

На рис.1. 3 представлено процеси проектування та виготовлення наносенсорів.



Рисунок 1.3 – Огляд процесу проектування та виготовлення наносенсорів [5].

У процесі виробництва наносенсорів дуже важливо дотримуватися високих стандартів якості та безпеки, щоб забезпечити надійність та ефективність наносенсорів. Також важливо враховувати специфічні вимоги застосування наносенсорів, які можуть впливати на вибір матеріалів і методів виробництва. Наприклад, для медичних досліджень можуть знадобитися наносенсори з високою чутливістю і стійкістю до біологічних середовищ, а для електроніки - з високою швидкістю відгуку і точністю вимірювань.

Тому виробництво наносенсорів є складним і міждисциплінарним процесом, що вимагає високо кваліфікованих фахівців з різних наукових і технічних галузей. Враховуючи вимоги застосування та використовуючи правильні методи і матеріали, можна успішно розробляти і виготовляти ефективні та надійні наносенсори для різних застосувань.

1.3. Хімічні та фізичні процеси взаємодії наносенсорів з об'єктом вимірювання

Взаємодія наносенсора з об'єктом вимірювання відбувається через різноманітні фізичні та хімічні процеси такі як:

1. Адсорбція - процес, при якому молекули газу або рідини поглинаються на поверхні наносенсора. Це може змінити електричні властивості наносенсора і забезпечити можливість вимірювати концентрацію речовин в об'єкті вимірювання.
2. Десорбція - процес, при якому молекули, які раніше адсорбувалися на поверхні наносенсора, знову вивільняються у навколишнє середовище. Це може відбуватися при зміні температури або концентрації інших речовин.
3. Хімічна реакція - процес, при якому наносенсор взаємодіє з речовинами в об'єкті вимірювання, що може змінювати його електричні властивості.
4. Фізичні процеси - наносенсори також можуть вимірювати фізичні властивості об'єкта вимірювання, такі як тиск, температура та рух [6].

Хімічна і фізична взаємодія між наносенсором і досліджуваним об'єктом є важливим процесом, який визначає чутливість і специфічність наносенсора. У випадку виявлення газу чутливість наносенсора залежить від того, наскільки швидко газ взаємодіє з поверхнею наносенсора.

У процесах хімічної взаємодії хімічно активні молекули або іони взаємодіють з активними ділянками на поверхні наносенсора, змінюючи його електронну структуру і генеруючи електричні або оптичні сигнали. У наносенсорах на основі оксидів металів, таких як SnO_2 і ZnO , взаємодія між газом і поверхнею наносенсора змінює електричний опір.

Процеси фізичної взаємодії можуть включати зміни механічних властивостей наносенсора, таких як маса і жорсткість під впливом зовнішніх подразників. У наносенсорах на основі вуглецевих нанотрубок зміна маси за рахунок аналізованого матеріалу може спричинити зміну резонансної частоти.

Фізичні процеси, такі як поглинання світла, фотопровідність, термоелектричні та п'єзоелектричні ефекти, також можуть бути використані для виявлення об'єктів за допомогою наносенсорів.

Взаємодія наносенсорів з об'єктом вимірювання дуже складний процес, який залежить від багатьох факторів, таких як форма та розмір наносенсора, тип поверхні об'єкта вимірювання та інші фізичні та хімічні властивості, що можуть вплинути на взаємодію.

Вивчення і розуміння хімічних і фізичних процесів взаємодії наносенсор-об'єкт є важливим для оптимізації роботи наносенсорів і розробки нових типів наносенсорів з вищою чутливістю і специфічністю. Крім того, ці знання дозволяють визначити оптимальні умови для вивчення і використання наносенсорів у різних галузях, таких як біомедицина, енергетика, хімія та екологія.

1.4. Методи дослідження та аналізу даних, отриманих за допомогою наносенсорів

Вивчення та аналіз даних, отриманих з наносенсорів, вимагає використання різних методів та інструментів. До основних методів дослідження належать [7]: 1. Оптична спектроскопія. Наносенсори на основі поверхневого плазмонного резонансу або квантових точок можна аналізувати за допомогою методів оптичної спектроскопії, таких як УФ-видима спектроскопія або флуоресцентна спектроскопія. Ці методи дозволяють виявити цільову молекулу на основі змін оптичних властивостей наносенсора.

2. Електричні вимірювання. Наносенсори на основі нанодротів або вуглецевих нанотрубок можна аналізувати за допомогою електричних вимірювань, таких як вимірювання опору або провідності. Ці методи дозволяють виявити цільову молекулу на основі змін електричних властивостей наносенсора.

3. Мас-спектрометрія. Наносенсори на основі чутливих до маси перетворювачів, таких як кварцові кристалічні мікроваги, можна аналізувати за

допомогою мас-спектрометрії. Цей метод дозволяє виявити молекулу-мішень на основі змін маси наносенсора внаслідок зв'язування молекули-мішені.

4. Мікроскопія. Наносенсори можна візуалізувати за допомогою різних методів мікроскопії, таких як скануюча електронна мікроскопія, трансмісійна електронна мікроскопія або атомно-силова мікроскопія .

Ці методи дозволяють візуалізувати наносенсор і цільову молекулу з високою роздільною здатністю. Загалом, комбінація цих методів може бути використана для отримання повного розуміння цільової молекули та її взаємодії з наносенсором. Для аналізу даних, отриманих з наносенсорів, можна використовувати різні методи статистичного аналізу, такі як кореляційний аналіз, факторний аналіз і дисперсійний аналіз. Крім того, алгоритми машинного навчання можна використовувати для отримання прогнозних даних і розробки алгоритмів автоматичної обробки даних.

Для збору даних використовуються спеціальні програмні засоби, такі як програмне забезпечення для збору даних і програмне забезпечення для аналізу даних. Збором даних займаються спеціально навчені люди, які проводять експерименти та вимірювання. Після того, як дані отримані, вони аналізуються та обробляються відповідним чином.

Основними завданнями аналізу даних є виявлення залежностей між параметрами вимірювання та проведення статистичних оцінок. Результати аналізу даних можуть бути представлені у вигляді графіків, таблиць та інших графічних зображень. Крім того, можуть бути розроблені математичні моделі для прогнозування поведінки наносенсорів за різних умов.

Таким чином, дослідження та аналіз даних, отриманих за допомогою наносенсорів, є складним і багатогранним процесом, що вимагає використання різних методів та інструментів. Важливо звернути увагу на коректність і точність проведення вимірювань та правильний вибір методів та інструментів для аналізу отриманих даних.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ НАНОСЕНСОРІВ

2.1. Принцип дії наносенсорів

Принцип дії наносенсорів полягає в їх здатності реагувати на зміни фізико-хімічних властивостей досліджуваного об'єкта за допомогою специфічних рецепторів, які взаємодіють з молекулами цього об'єкта. Наприклад, наносенсори, що використовуються для виявлення вірусів, можуть містити спеціальні біологічні рецептори, які взаємодіють з молекулами вірусу і викликають зміни електричних, оптичних або інших властивостей наносенсора.

Наносенсори можуть мати різну структуру залежно від їхнього призначення та принципів роботи. Однак загалом наносенсори складаються з трьох основних компонентів: датчика, перетворювача та детектору (рис.2.1.).

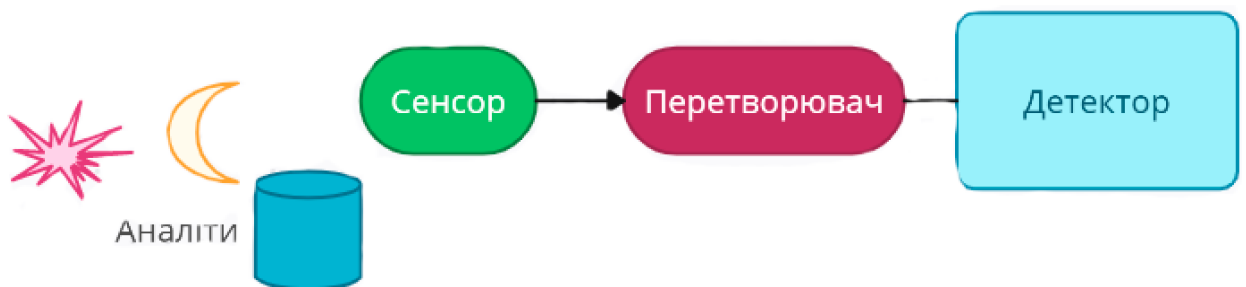


Рисунок 2.1 – Основні компоненти наносенсора [8]

Сенсор - це основна частина наносенсора, яка взаємодіє з аналізованим матеріалом (речовиною, властивості якої вимірюються) і відповідає за збір сигналів про вимірювані властивості.

Перетворювач - це частина наносенсора, яка перетворює сигнал, зібраний з датчика, у вимірювальний сигнал, який може бути записаний або відображений. Перетворювачі можуть бути механічними, електричними або оптичними.

Детектор - це частини наносенсора, які обробляють вимірювальний сигнал для отримання бажаної інформації про властивості аналізованої речовини. Це може бути електронна схема або програмне забезпечення, що використовується для обробки даних.

Залежно від типу наносенсора, ці компоненти можуть мати різну структуру та конфігурацію. Наприклад, сенсори можуть складатися з наночастинок, нанотрубок і нанодротів, а перетворювачі можуть бути п'єзоелектричними, оптичними або електрохімічними.

2.1.1. Хімічні наносенсори

Хімічні наносенсори — це пристрої, призначені для виявлення та вимірювання концентрації різних хімічних речовин у зразку на нанорозмірному рівні. Ці сенсори розроблені таким чином, щоб бути високочутливими, селективними і специфічними для певної хімічної речовини або групи хімічних речовин таких як : In_2O_3 , SWNT_s , ZnO та SnO_2 (рис.2.2). Існує кілька типів хімічних наносенсорів, включаючи польові транзистори на основі нанотрубок або графену, квантово-провідні точки, нанодроти, нанодротові матриці та наночастинкові сенсори. Кожен з цих типів має свої унікальні властивості і застосування.

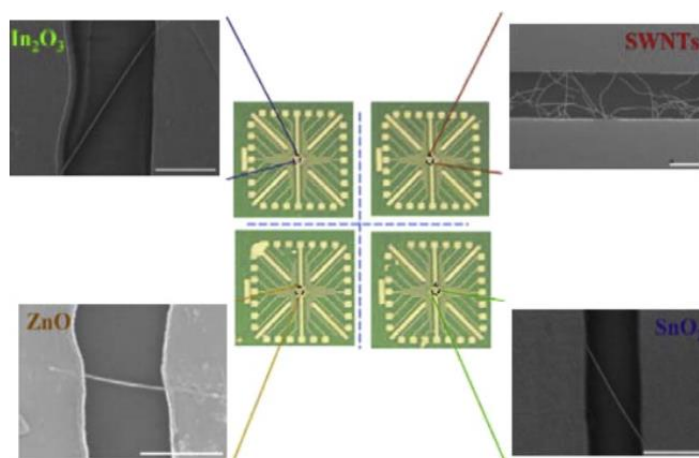


Рисунок 2.2 – Гібридний масив хімічних датчиків, що складається з чотирьох окремих хімічних датчиків з різними нанодротоми [9]

Хімічні наносенсори можуть використовувати різні типи плівок залежно від їхніх конкретних застосувань і вимог. Типи плівок, які часто застосовуються [10]:

- 1) Полімерні плівки використовуються для захоплення інтеракції з хімічними сполуками. Ці плівки можуть бути функціоналізовані для виявлення конкретних речовин або груп речовин. Полімери можуть бути нанесені на поверхню сенсора шляхом покриття, друку або нанесення в розчині.
- 2) Плівки наночастинок такі як наночастинки золота або квантово-провідні точки, можуть бути використані для створення плівок, які виявляють зміни у своїй оптичній або електричній властивості при взаємодії з хімічними сполуками. Ці плівки можуть бути нанесені на підкладку або інтегровані безпосередньо в пристрій.
- 3) Тонкі плівки напівпровідників, такі як оксиди металів (наприклад, оксид цинку або оксид індію-олова) або тонкі плівки напівпровідникових матеріалів, можуть бути використані для виявлення хімічних речовин шляхом вимірювання змін у електричних властивостях.
- 5) Плівки з наноструктурних матеріалами, такими як нанодроти, нанотрубки або нанодротові матриці, можуть використовуватися для створення наносенсорів з високою чутливістю до хімічних змін. Ці наноструктуровані плівки можуть бути вирощені або виготовлені за допомогою різних методів, таких як літографія або хімічний відклад. Вибір плівки залежить від характеристик потрібного сенсора, типу хімічних речовин, які треба виявити.

Хімічні наносенсори працюють за рахунок зміни електричних, оптичних і механічних властивостей матеріалу сенсора, коли він контактує з цільовим аналітом. Взаємодія між сенсором і аналітом дає вимірюваний сигнал, який може бути використаний для визначення присутності та концентрації цільової речовини [11]. Існує широкий спектр конструкцій і принципів наносенсорів, ось деякі загальні формули, які використовуються в хімічних наносенсорах:

1) Чутливість (S) є мірою того, наскільки наносенсор реагує на зміни концентрації аналіту. Зазвичай він виражається як відношення вихідного сигналу до зміни концентрації аналіту, формула чутливості:

$$S = \Delta O / \Delta C \quad , \quad (2.1)$$

де ΔO — зміна вихідного сигналу, а ΔC — зміна концентрації аналіту.

2) Межа виявлення (DL) — це найменша концентрація аналіту, яку можна надійно виявити наносенсором. Його часто визначають як відношення сигнал/шум на заданому рівні. Формула межі виявлення:

$$DL = (3 \times SD) / S , \quad (2.2)$$

де SD — стандартне відхилення шуму, а S — чутливість.

3) Ізотерма Ленгмюра зазвичай використовується для опису адсорбції молекул аналіту на поверхні наносенсора. Він пов'язує покриття поверхні (θ) аналіту з його концентрацією (C) у навколишньому середовищі. Рівняння ізотерми Ленгмюра має вигляд:

$$\theta = (K \times C) / (1 + K \times C ,) \quad (2.3)$$

де K — стала Ленгмюра.

4) Рівняння Штерна-Фолмера часто використовується в наносенсорах на основі флуоресценції, щоб зв'язати інтенсивність флуоресценції флуорофора з концентрацією аналіту, що гасить. Це виражається як:

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{SV} * [Q] \quad (2.4)$$

де F_0 — інтенсивність флуоресценції за відсутності гасника, F — інтенсивність флуоресценції за наявності гасника, K_{SV} — константа гасіння Штерна-Фольмера, [Q] — концентрація гасника.

5) Рівняння Нернста використовується в електрохімічних наносенсорах, зокрема на основі іоноселективних електродів. Він пов'язує вимірний потенціал (E) електрода з концентрацією (C) іона аналіту. Рівняння Нернста:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln(C) \quad (2.5)$$

де E^0 — стандартний електродний потенціал, R — газова постійна, T — температура, n — кількість електронів, що беруть участь в електродній реакції, F — постійна Фарадея.

Один з поширених типів хімічних наносенсорів заснований на поверхневому плазмонному резонансі (SPR). У сенсорі SPR на поверхню наноситься тонка

металева плівка, на яку спрямовується світло. Коли цільова молекула зв'язується з поверхнею, це викликає зміну показника заломлення металевої плівки, що призводить до зміщення довжини хвилі відбитого світла. Вимірюючи цей зсув, можна визначити концентрацію цільової молекули.

Іншим типом хімічних наносенсорів є нанодротяний датчик. У нанодротяному датчику нанорозмірний дріт покритий шаром матеріалу, який може зв'язуватися з цільовою молекулою. Коли молекула зв'язується з покриттям, це викликає зміну електропровідності дроту, яку можна виміряти для визначення концентрації цільової молекули.

Інші типи хімічних наносенсорів включають датчики квантових точок, датчики вуглецевих нанотрубок і датчики наночастинок. Усі ці датчики розроблені для виявлення конкретних типів молекул або іонів у зразку.

Хімічні наносенсиори мають широкий спектр застосування в різних галузях, включаючи моніторинг навколишнього середовища, безпеку харчових продуктів, біомедичну діагностику та безпеку. Вони мають низку переваг над традиційними аналітичними методами, серед яких є їх висока чутливість та специфічність, що дозволяє детектувати дуже низькі концентрації речовин в середовищі. Також, хімічні наносенсиори можуть бути використані для вимірювання різних фізико-хімічних параметрів, таких як температура, рН та тиск.

Хімічні наносенсиори можуть мати декілька недоліків. Одним з них є можлива взаємодія з іншими хімічними сполуками, що може впливати на їхню точність та надійність. Крім того, деякі хімічні наносенсиори можуть бути дуже складними у виготовленні та вимагати високої технологічної кваліфікації для їхньої експлуатації та обслуговування. Деякі хімічні наносенсиори можуть бути дорогими у виробництві та експлуатації.

Усі ці фактори потрібно враховувати при використанні хімічних наносенсорів у різних дослідженнях та практичних застосуваннях.

2.1.2. Оптичні наносенсиори

Оптичні наносенсори – це тип наносенсорів, які використовують світло для виявлення та вимірювання змін у навколишньому середовищі. Зазвичай вони складаються з наночастинок або нанорозмірної структури, яка була розроблена для взаємодії з певним аналітом, таким як молекула або іон, і перетворювача, який перетворює отриманий оптичний сигнал у вимірний вихід.

Оптичні наносенсори використовують різні оптичні явища для виявлення та аналізу аналітів на нанорозмірі. Поширені формули, які використовуються в оптичних наносенсорах:

1) Закон Бір-Ламберта описує зв'язок між поглинанням світла зразком і концентрацією поглинаючих речовин. Він зазвичай використовується в оптичних наносенсорах на основі поглинання. Формула:

$$A = \varepsilon \times c \times l, \quad (2.6)$$

де A – поглинання, ε – молярний коефіцієнт поглинання або коефіцієнт екстинкції, c – концентрація аналіту, а l – довжина шляху зразка.

2) Інтенсивність флуоресценції (I) і квантовий вихід (Φ): наносенсори на основі флуоресценції часто вимірюють інтенсивність випромінюваної флуоресценції, щоб визначити концентрацію аналіту. Інтенсивність флуоресценції визначається як:

$$I = \Phi \times \varepsilon \times c \times l, \quad (2.7)$$

де I – інтенсивність флуоресценції, Φ – квантовий вихід, ε – молярний коефіцієнт поглинання, c – концентрація аналіту, l – довжина шляху зразка.

3) Ефективність резонансної передачі енергії Фьорстера (FRET)— це явище, яке використовується в наносенсорах на основі флуоресценції для вимірювання відстані між донорним флуорофором і акцепторною молекулою. Ефективність FRET (E) визначається як:

$$E = 1 / (1 + (R/R_0)^6), \quad (2.8)$$

де R — відстань між молекулами донора й акцептора, а R_0 — відстань Ферстера, яка є характерною відстанню, на якій ефективність FRET становить 50 %.

4) Поперечний переріз розсіювання (σ): оптичні наносенсиори на основі розсіювання покладаються на розсіювання світла наночастинками або наноструктурами. Поперечний переріз розсіювання представляє ефективну площу, яка взаємодіє з падаючим світлом, і визначається як:

$$\sigma = (k^4 / 6\pi) \times |\alpha_0|^2, \quad (2.9)$$

де k - хвильове число падаючого світла, α_0 - поляризованість об'єкта, що розсіює.

Використовувані конкретні формули залежатимуть від чутливого механізму, конструкції та конфігурації оптичного наносенсора.

У оптичних наносенсорах для вимірювання хімічних речовин використовуються різні типи плівок, які мають властивості взаємодії зі світлом. Ось декілька прикладів таких плівок [12]: 1) Плівки покриття- це тонкі шари матеріалів, які наносяться на поверхню сенсора і використовуються для функціоналізації та забезпечення взаємодії з хімічними аналітами. 2) Плівки плумбісилікатів. Це скляні матеріали, які містять домішки плумбу, кремнія та інших елементів. Вони мають здатність взаємодіяти з оптичним випромінюванням та змінювати свої оптичні властивості при контакті з хімічними речовинами. Це може виявлятися у зміні кольору, поглинання або випромінювання світла. 3) Плівки фторофорів- це плівки, що містять спеціальні фторофори - речовини, які можуть поглинати світло і випромінювати його з іншою довжиною хвилі. При взаємодії з хімічними аналітами, ці плівки можуть змінювати інтенсивність або спектр емісії світла, що використовується для виявлення присутності цих речовин. 4) Плівки діелектриків: Деякі діелектричні матеріали, такі як оксиди кремнію або оксиди металів, можуть використовуватися як плівки для оптичних наносенсорів. Їх оптичні властивості, такі як індекс заломлення, можуть змінюватися під впливом хімічних аналітів, що дозволяє виявляти їх присутність.

Вибір конкретної плівки залежить від багатьох факторів, таких як тип хімічних аналітів, оптичні властивості, технологічні вимоги та бюджет.

Одним із прикладів оптичного наносенсора (рис. 2.3) є плазмонна наночастинка, яка може взаємодіяти зі світлом, створюючи ефект поверхневого

плазмонного резонансу (SPR). Коли аналіт зв'язується з наночастинкою, це викликає зміну SPR, яка може бути виявлена як зміщення довжини хвилі відбитого світла. Умова резонансу для SPR визначається як:

$$n_{\text{зразок}} = n_{\text{метал}} \quad (2.10)$$

де $n_{\text{зразок}}$ — показник заломлення зразка, а $n_{\text{метал}}$ — показник заломлення металу.

Інші типи оптичних наносенсорів включають флуоресцентні наночастинки, які випромінюють світло при збудженні певною довжиною хвилі, і фотонні кристали, які демонструють зміни своїх оптичних властивостей під впливом аналіту.

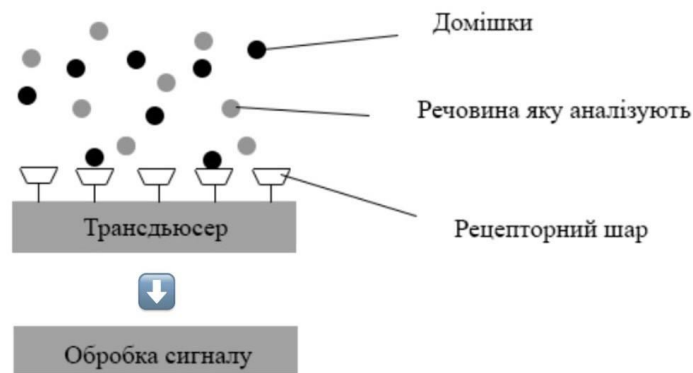


Рисунок 2.3 – Схема оптичного наносенсора [13].

Оптичні наносенсори мають широкий спектр потенційних застосувань, від медичної діагностики до моніторингу навколишнього середовища.

Основна перевага оптичних наносенсорів полягає в їхній високій чутливості та широкому діапазоні вимірювань, а також можливості використання у різних середовищах, включаючи рідини, гази та тверді тіла. Також, вони можуть бути дуже маленькими, що дозволяє їх використання в мікро- та наносистемах. Крім того, вони можуть бути дуже швидкими, маючи високу роздільну здатність і точність вимірювань.

Однак, оптичні наносенсори мають деякі недоліки. Одна з них полягає в тому, що вони можуть бути чутливі до зовнішнього освітлення, що може

призводити до погіршення якості вимірювань. Також, деякі оптичні наносенсори можуть бути чутливі до змін температури або рівня рН, що може впливати на їхню точність. Крім того, створення та використання оптичних наносенсорів може бути складним та вимагати високої технологічної кваліфікації. Іноді такі сенсори можуть бути досить дорогими у виробництві та експлуатації.

Усі ці фактори потрібно враховувати при використанні оптичних наносенсорів в різних дослідженнях та практичних застосуваннях.

Одним із перспективних застосувань оптичних наносенсорів є виявлення та моніторинг захворювань. Дослідники розробили оптичні наносенсори, які можуть виявляти біомаркери, пов'язані з раком або інфекційними захворюваннями, такими як віруси. Ці датчики можуть бути розроблені для націлювання на конкретні біомолекули, що забезпечує високо селективне та чутливе виявлення.

Окрім біомедичних застосувань, оптичні наносенсори також можна використовувати для моніторингу навколишнього середовища, для виявлення забруднюючих речовин або моніторингу якості води. Їх також можна використовувати в промислових умовах для моніторингу процесів і виявлення будь-яких змін в умовах, які можуть вказувати на проблему.

Загалом, розробка та використання оптичних наносенсорів має потенціал для революції в багатьох галузях, що призведе до більш точного та ефективного виявлення та моніторингу різних умов [14].

2.1.3. Електронні наносенсори

Електронні наносенсори — це пристрої, які використовують електронні схеми для виявлення та вимірювання змін у фізичних або хімічних властивостях середовища, в якому вони розміщені. Зазвичай вони складаються з чутливого елемента, який є матеріалом, який реагує на присутність конкретної цільової молекули або фізичного параметра, і перетворювача, який перетворює сигнал від чутливого елемента в електронний сигнал, який можна виміряти та проаналізувати (рис.2.4).

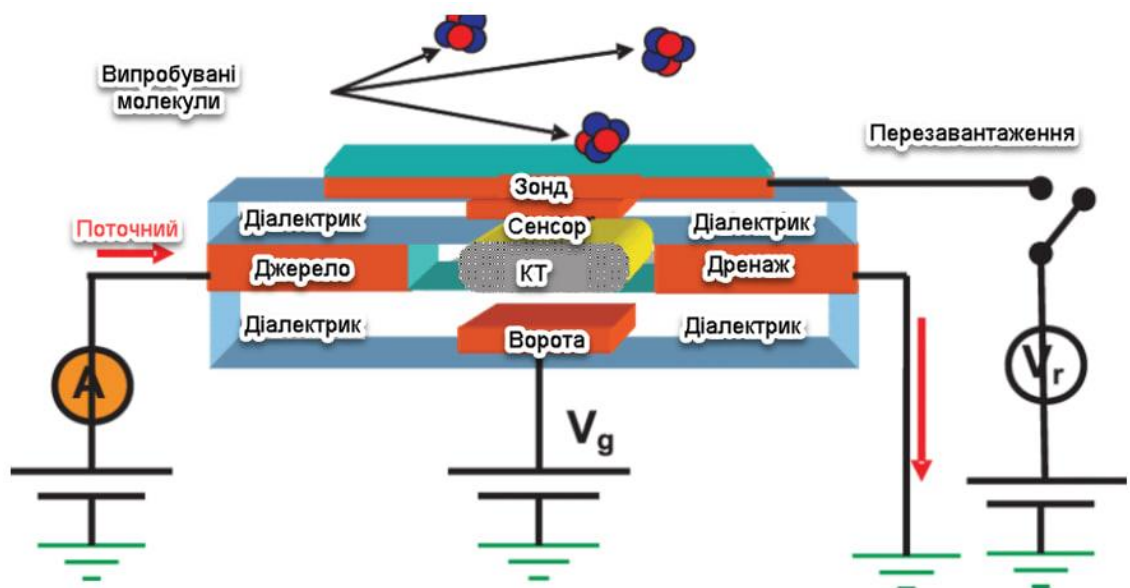


Рисунок 2.4 – Схема конструкції електронного наносенсорного пристрою. Основою функції є нанотранзистор з бістабільною провідністю [15].

Електронні наносенсори можна виготовити з використанням різних матеріалів і технологій [16]: 1) Полімерні плівки широко використовуються в електронних наносенсорах через свою гнучкість та здатність до функціоналізації. Полімерні матеріали, такі як полімери на основі поліетилену, полімери на основі поліпіролу або полімери на основі полікапролактону, можуть бути використані як плівки для детекції газів, біомаркерів та інших аналітів. 2) Оксиди металів, такі як оксид цинку (ZnO), оксид індію-олова (ІТО) та оксид титану (TiO₂), можуть бути використані як плівки у електронних наносенсорах. Вони мають хороші електричні та хімічні властивості і можуть використовуватися для виявлення газів, розчинників та інших хімічних аналітів. 3) Металеві плівки, такі як плівки золота (Au) або плівки платини (Pt), можуть бути використані для електродів у наносенсорах. Ці плівки забезпечують електричну провідність та можуть використовуватися для вимірювання змін опору, що пов'язані з хімічною реакцією на поверхні. 4) Напівпровідникові плівки, такі як плівки кремнію (Si), германію (Ge) або нітриду галію (GaN), можуть використовуватися у функціональних

елементах наносенсорів, таких як транзистори чутливості. Вони можуть забезпечити електричну провідність та можуть бути функціоналізовані для виявлення різних аналітів.

Електронні наносенсори використовують електронні властивості та явища для виявлення та аналізу аналітів на нанорозмірі. Поширені формули, які використовуються в електронних наносенсорах:

1) Провідність (G) є мірою здатності матеріалу або наносенсора проводити електричний струм. Це зворотна величина опору (R) і визначається як:

$$G = 1 / R, \quad (2.11)$$

Провідність часто використовується для характеристики реакції електронних наносенсорів на аналіти.

2) П'єзорезистивні наносенсори використовують зміну електричного опору матеріалу під механічною деформацією для виявлення аналітів або фізичних величин. П'єзорезистивне рівняння пов'язує опір (R) із деформацією (ϵ) та іншими параметрами:

$$\Delta R / R = S * \epsilon, \quad (2.12)$$

де ΔR – зміна опору, R – початковий опір, S – калібрувальний коефіцієнт або п'єзорезистивний коефіцієнт, а ϵ – деформація.

3) Рівняння дифузії описує рух частинок або аналітів через середовище на основі градієнтів концентрації. У наносенсорах на основі дифузії це рівняння часто використовується для моделювання дифузії аналітів до чутливого елемента. Рівняння дифузії:

$$\partial C / \partial t = D * \nabla^2 C \quad (2.13)$$

де $\partial C / \partial t$ — швидкість зміни концентрації з часом, D — коефіцієнт дифузії, а $\nabla^2 C$ — оператор Лапласа концентрації.

Вибір конкретної плівки залежить від багатьох факторів, таких як ціль застосування, тип детектованого аналіту, чутливість і стійкість до середовища.

Електронні наносенсори широко використовуються в різних сферах, включаючи моніторинг навколишнього середовища, охорону здоров'я та безпеку харчових продуктів.

Однією з головних переваг електронних наносенсорів є їхня висока чутливість, яка дозволяє виявляти надзвичайно низькі концентрації аналітів. Вони також можуть бути розроблені так, щоб бути високо селективними до конкретних аналітів, що робить їх корисними в ряді застосувань.

Однією з проблем розробки електронних наносенсорів є забезпечення їх стабільності та відтворюваності з часом. Властивості наноматеріалів можуть змінюватися через такі чинники, як окислення або забруднення, що може вплинути на їхні можливості сприйняття. Крім того, виготовлення та складання електронних наносенсорів може бути складним і вимагати точного контролю над матеріалами та виробничими процесами [17].

Незважаючи на ці проблеми, електронні наносенсори продовжують бути областю активних досліджень і розробок. Досліджуються нові матеріали та методи виробництва, щоб підвищити їх стабільність і продуктивність, а також постійно відкриваються нові сфери застосування. Завдяки своєму потенціалу для швидкого та чутливого виявлення широкого спектру аналітів електронні наносенсори, ймовірно, продовжуватимуть відігравати важливу роль у багатьох галузях у найближчі роки.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОСЕНСОРІВ

3.1. Застосування наносенсорів в електроніці та інформаційних технологіях

Наносенсори мають численні застосування в галузі електроніки та інформаційних технологій. Ці датчики надзвичайно чутливі та можуть виявляти навіть найменші зміни в навколишньому середовищі, що робить їх корисними в широкому діапазоні застосувань, від побутової електроніки до біомедичних пристроїв.

Одним з основних застосувань наносенсорів в електроніці є розробка нових датчиків і детекторів. Наносенсори можна використовувати для визначення різних фізичних і хімічних властивостей, таких як температура, тиск і концентрація газу, і перетворення їх в електричні сигнали. Ці датчики можна інтегрувати в електронні пристрої, такі як смартфони, переносні пристрої та інші пристрої Інтернет речей, щоб увімкнути нові функції, такі як зондування навколишнього середовища або моніторинг здоров'я. Крім того, наносенсори можуть бути використані для вимірювання електричного струму, що є важливим для контролю якості електронних пристроїв. Вони також можуть бути використані для вимірювання вологості, що дозволяє підтримувати оптимальну вологість в електронних пристроях та зменшує ризик їх несправності.

Наносенсори можуть бути використані для створення нових типів пристроїв, таких як гнучкі дисплеї, які здатні згинатися та складатися. Вони можуть бути використані для створення пристроїв, які можуть змінювати свій колір, яскравість та інші параметри залежно від умов роботи.

Наносенсори також можна використовувати для зберігання даних. Завдяки невеликому розміру та високій чутливості наносенсори можна використовувати для створення пристроїв зберігання високої щільності, які можуть зберігати великі обсяги даних у дуже малому просторі. Це особливо корисно для програм, які

вимагають зберігання великих обсягів даних на невеликому пристрої, наприклад смартфоні та інших мобільних пристроях,

Окрім зберігання даних, наносенсори можна використовувати для комунікаційних програм. Їх можна використовувати для виявлення та передачі інформації про навколишнє середовище, такої як температура чи вологість, бездротовим способом. Ця технологія має потенціал для створення нових програм, таких як розумні будинки (рис.3.1) та розумні міста, де інформація про навколишнє середовище використовується для підвищення ефективності та стійкості міської інфраструктури [18].



Рисунок 3.1 – Система «Розумний дім»[19].

Загалом, застосування наносенсорів в електроніці та інформаційних технологіях має потенціал для створення нових функціональних можливостей і покращення продуктивності існуючих пристроїв. Оскільки технологія продовжує розвиватися, цілком імовірно, що в найближчі роки ми побачимо багато нових і цікавих програм.

3.2. Застосування наносенсорів в промисловості та екології

Стрімкий прогрес харчової та сільськогосподарської промисловості висунув сферу нанотехнологій на передній план. Ця автономна технологія охоплює всі аспекти харчової промисловості, починаючи від виробництва до зберігання та комерційного прийняття. Сполучення між нанотехнологіями та біологією призводить до розробки нанобіосенсорів, які забезпечують низький час відгуку та високу чутливість до потенційних небезпек. Їх чутливість до виявлення неїстівних і токсичних компонентів у харчовому середовищі робить їх чудовими представниками нових технологій для приготування, обробки та зберігання харчових продуктів. Фальсифікація харчових продуктів також ефективно контролюється завдяки використанню методів флуоресценції на основі наноматеріалів. В додаток, Методології визначення важких металів були вдосконалені завдяки використанню різних форм металевих і вуглецевих наноматеріалів. Крім того, успішна прийнятність використовуваних на даний момент інтелектуальних нанотехнологій пакування в основних сегментах ринку, які мають властивості поглинати кисень і вологу, робить роль нанотехнологій незамінною в галузі харчової промисловості [18].

Одним із основних застосувань наносенсорів у промисловості є контроль і моніторинг процесів. Вимірюючи такі параметри, як температура, вологість, тиск і склад газу в режимі реального часу, наносенсори можуть допомогти оптимізувати промислові процеси, зменшити споживання енергії та підвищити якість продукції. Завдяки цим властивостям, у виробництві електронних пристроїв наносенсори можна використовувати для виявлення дефектів у виробничому процесі, забезпечуючи доставку клієнтам лише високоякісних пристроїв.

Окрім керування технологічними процесами, наносенсори також можна використовувати для моніторингу навколишнього середовища в промисловості. Виявляючи та вимірюючи забруднюючі речовини в повітрі та воді, наносенсори можуть допомогти визначити потенційну небезпеку для навколишнього середовища та підтримати зусилля з її пом'якшення [20]. У нафтовій і газовій

промисловості наносенсори можуть виявляти витіки та контролювати якість повітря, щоб гарантувати, що операції виконуються безпечно та відповідно до правил.

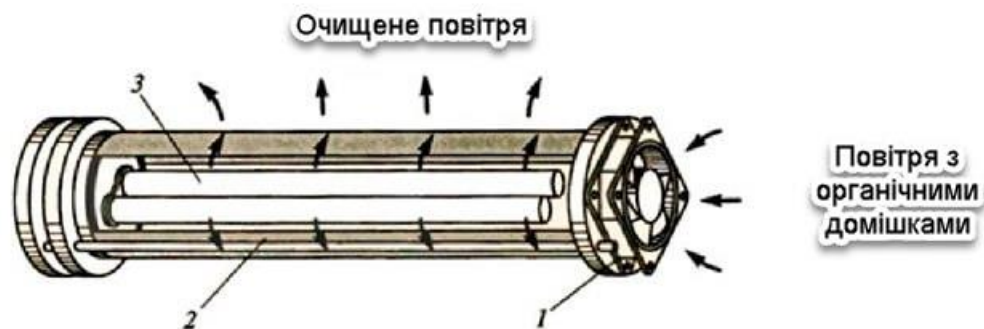


Рисунок 3.2 – Схема фотокаталітичного очисника повітря: 1 – вентилятор; 2 – фотокаталітичний елемент із покриттям з нанокристалічного TiO_2 ; 3 – ультрафіолетова лампа [21].

У сфері екології наносенсори можуть відігравати вирішальну роль у моніторингу та збереженні навколишнього середовища. Наносенсори можна використовувати для вимірювання концентрації забруднюючих речовин у повітрі, воді та ґрунті та відстеження міграції видів дикої природи. Ці датчики також можна використовувати для моніторингу зміни клімату шляхом вимірювання таких параметрів, як температура та вологість у віддалених місцях.

Загалом, застосування наносенсорів у промисловості та екології має потенціал для значного підвищення ефективності, безпеки та стійкості виробничих процесів та управління навколишнім середовищем. Хоча технологія все ще знаходиться на ранніх стадіях, постійні дослідження та розробки, ймовірно, приведуть до багатьох нових і цікавих застосувань у найближчі роки.

3.3. Застосування наносенсорів в медицині та біології

Гнучкі наносенсори BioPatch можна прикріплювати до біологічних поверхонь, таких як шкіра і тканини, для оцінки фізіологічних сигналів, таких як дихання, кров'яний тиск, температура, стрес і пульс, а також біохімічних сигналів, таких як рівень глюкози і кисню, сечової кислоти і дофаміну. В якості гнучких біопластичів можна використовувати різні синтетичні субстрати, в які можна вставляти наносенсори для виявлення потрібних біологічних або фізіологічних сигналів. Прототип Bio-Patch складається з пари електродів, надрукованих на аркуші фотопаперу, датчика системи на кристалі (SoC) та акумуляторної батареї. Наночіпи інтегровані з провідними елементами, такими як металеві наноструктури (Ag, Au та ін.), і створені на гнучкому пластичі Bio-Patch. Наносенсори Bio-Patch прикріплюються до поверхні шкіри і виявляють важливі фізіологічні дані. Біо-сенсор виявляє біологічні сигнали від тіла і перетворює їх у вимірювані сигнали, такі як електрохімічні, оптичні та п'єзоелектричні сигнали (рис. 3.3) [22].

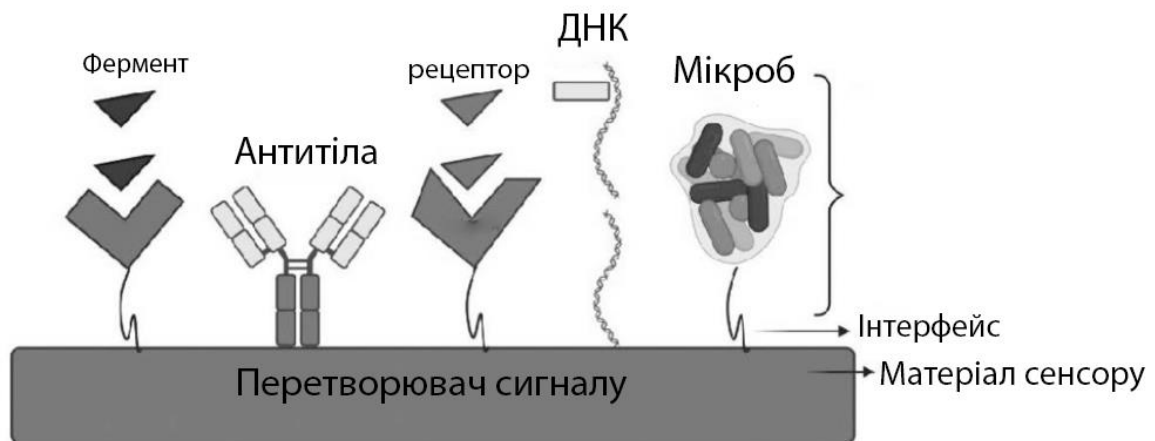


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення різних частин нанобіосенсора, який включає елемент біорозпізнавання, перетворювач, аналіт і детектор [22].

Після цього ці сигнали перевіряються та обробляються програмним забезпеченням у бездротовій мережі. Лікарі та пацієнти отримують результати в цифровому вигляді. BioPatch можна використовувати окремо або в поєднанні з

іншими BioPatch, використовуючи активні кабелі, надруковані на підкладці, для запису багатоканальних біологічних сигналів (рис. 3.4).

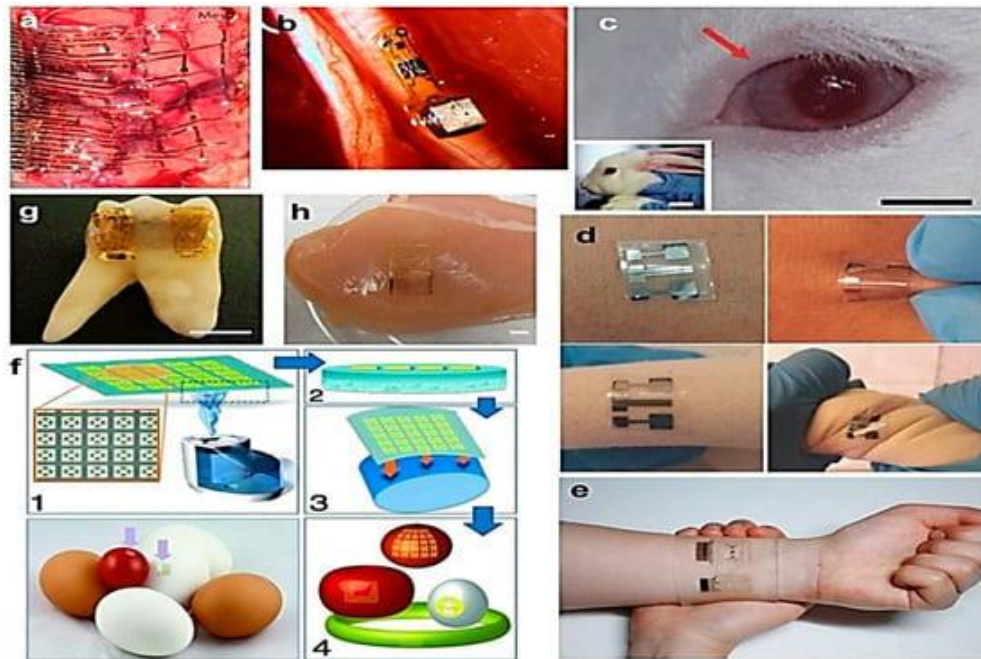


Рисунок 3.4 – Можливі місця, де можна використовувати гнучкий біопатч-наносенсор [23].

(а) Зображення виготовленого датчика; датчик можна прикріпити до поверхні м'яса або розмістити на внутрішній поверхні упаковки. За допомогою смартфона можна стежити за станом м'ясного продукту, сфотографувавши датчик. (б) Схематичне зображення багатофункціональної електронної шкіри з автономним живленням, яка використовується для безперервного моніторингу лактату, глюкози, сечової кислоти та сечовини в поті, спричиненому фізичними навантаженнями, за допомогою п'єзоелектричних пов'язаних ферментативних біосенсорів. Під час фізичних вправ цей пристрій працює без додаткового джерела живлення через п'єзоелектричну та ферментативну реакції. (с) Бездротовий датчик глюкози, вбудований у платформу для контактних лінз, із схемою бездротової передачі енергії та пікселями дисплея для повністю інтегрованої та прозорої платформи, яка не заважає зору. Цей пристрій виявляє коливання концентрації глюкози в сльозах

за допомогою ферментативного механізму на основі резистентності, продемонстрованого на моделі кролика. (d) Конфігурація та принцип роботи датчика глюкози на основі епідермального зворотного іонофоретичного татуювання із зображенням пристрою, застосованого до людини. Демонстрація підтвердження концепції датчика глюкози ISF на основі зворотного іонофоретичного татуювання. Це вказує на робочий електрод і електрод порівняння/протилежний електрод відповідно. (e) Іонофоретична паперова батарея та шкірний біосенсор для не інвазійного моніторингу рівня глюкози в крові, що застосовуються до людини. Включення гіалуронової кислоти сприяє покращеній екстракції ISF для підвищення надійності відбору проб глюкози ISF. (f) Схема етапів швидкого перенесення шовкових антен на вигнуті підкладки: (1) Водяна пара наноситься на тильну сторону шовкових плівок, утворюючи (2) плівку, в якій задня поверхня плівки була частково розплавлена. (3) Ця розплавлена поверхня конформно наноситься на довільні поверхні, утворюючи (4) прикладені функціональні датчики на різних поверхнях. Фотографії ТГц резонаторів з розділеним кільцем (SRR), виготовлених на шовковій підкладці, загорнутій у яблуко. (g) Датчик на основі капи для моніторингу глюкози в слині з застосуванням на тілі та аналізом підвищення концентрації глюкози. (h) Датчик геометричного штрих-коду для моніторингу псування курки за різних температурних умов.

Таблиця 3. Перелік застосувань гнучких біопатчів, крім якоря/субстрату, для гнучких наносенсорів [23].

| С. № | Тип використовуваного біопластира | Застосування датчика Bio-Patch |
|------|---|--|
| a | Одноразові фотовольтаїчні пластирі | Забезпечує електричну стимуляцію та сприяє регенерації для загоєння ран. |
| | Клітини теноцитів засівали колагенові плями | Сприяє загоєнню передньої хрестоподібної зв'язки (ACL). |

| | | |
|---|--|--|
| | Патч Si-NN PDMS | Цей пластир із мікроголками використовується для внутрішньо м'язових і внутрішньо тканинних наноін'єкцій біомолекул. |
| b | Пластир з мікроголками | Трансдермальна доставка подвійних мінералізованих пептидів для терапії цукрового діабету 2 типу. |
| | Мікроголкові пластирі з фіброїну шовку | Тривала трансдермальна доставка контрацептивного гормону левоноргестрелу, укладеного в мікроносії. |
| c | Гідрогелеві патчі F-GelMA, надруковані на 3D | Локальна доставка модельного нанопрепарату пегільованого ліпосомального доксорубіцину (DOX) проти раку. |
| d | Пластирі з мікроголками | Внутрішньо шкірна вакцинація інкапсульованими антигенами полі (молочної спільно гліколевої кислоти) (PLGA). |

Підводячи підсумки можна встановити, що використання наносенсорів у медицині та біології є дуже перспективним напрямком розвитку, що дозволяє покращити діагностику та лікування різних захворювань, а також вивчати фізіологічні процеси з високою точністю та деталізацією. Враховуючи стрімкий розвиток нанотехнологій, очікується подальше розширення застосування наносенсорів у медицині та біології.

3.4. Переваги та недоліки застосування наносенсорів порівняно з традиційними методами вимірювання

Наносенсори пропонують ряд переваг перед традиційними методами вимірювання, включаючи їх високу чутливість, специфічність і точність. Однак вони також мають деякі недоліки, які необхідно враховувати при виборі між різними методами вимірювання [24].

Переваги наносенсорів: 1) Наносенсори є високочутливими та можуть виявляти навіть незначні зміни в навколишньому середовищі, що робить їх

корисними для застосувань, де традиційні датчики можуть бути недостатньо чутливими. 2) Наносенсори можуть бути розроблені для виявлення конкретних молекул або властивостей, що робить їх високо специфічними та зменшує ймовірність помилкових спрацьовувань. 3) Наносенсори здатні виробляти високоточні вимірювання, що важливо для таких застосувань, як медична діагностика або моніторинг навколишнього середовища. 4) Наносенсори невеликі, їх можна інтегрувати в електронні пристрої, створюючи нові функції та додатки. 5) Наносенсори потребують дуже мало енергії, що робить їх корисними для застосувань, де енергоспоживання викликає занепокоєння.

Недоліки наносенсорів: 1) Виробництво наносенсорів може бути дорогим і не для всіх застосувань може бути економічно ефективним. 2) Наносенсори – це складні пристрої, для розробки та експлуатації яких потрібні спеціальні знання та обладнання. 3) Наносенсори можуть бути чутливі до перешкод від інших матеріалів або факторів навколишнього середовища, що може вплинути на їх точність і чутливість. 4) Деякі наносенсори можуть бути недостатньо міцними, щоб витримувати суворі умови навколишнього середовища або багаторазове використання, що може обмежити їхню корисність у певних програмах. 5) Наносенсори можуть вимагати частого калібрування для забезпечення точних і надійних вимірювань, що може зайняти багато часу та бути дорогим.

Порівнюючи наносенсори з іншими традиційними методами вимірювань можна підвести такі підсумки: наносенсори мають розміри які в 10 разів менші у порівнянні з іншими датчиками, їх чутливість може бути більшою в 2-3 рази, швидкість відгуку в наносенсора в 5-10 разів швидша за відгук у датчику.

Таким чином, наносенсори пропонують кілька переваг перед традиційними методами вимірювання, включаючи їх високу чутливість, специфічність, точність, мініатюрність і низьке енергоспоживання. Однак вони також мають деякі недоліки, включаючи їх вартість, складність, чутливість до перешкод, довговічність і вимоги до калібрування, які слід враховувати при виборі між різними методами вимірювання.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел стосовно наносенсорів встановлено, що наносенсиори широко використовуються для вимірювання, виявлення і моніторингу різних параметрів і властивостей різноманітних середовищ. Вони зазвичай мають розміри від кількох до декількох сотень нанометрів і можуть виявляти навіть найменші зміни у своєму оточенні.

2. На основі дослідження особливостей виготовлення наносенсорів встановлено основні етапи: вибір наноматеріалів з унікальними властивостями, застосування літографії, нанобробка, функціоналізація поверхні для взаємодії з молекулярним середовищем, інтеграція з електронікою та системами зчитування, контролю і характеристика для перевірки функціональних властивостей.

3. Встановлено, що наносенсиори взаємодіють з об'єктом вимірювання за допомогою хімічних процесів, таких як адсорбція, десорбція, хімічні реакції, а також за допомогою фізичних процесів, таких як оптична взаємодія, електрична взаємодія та механічна взаємодія. Ці процеси дозволяють наносенсорам вимірювати різні параметри об'єкта вимірювання та генерувати відповідні вимірювані сигнали. Встановлено принцип дії оптичних, хімічних та електричних наносенсорів і описано математичну обробку відповідних сигналів.

4. Порівнюючи наносенсиори з іншими традиційними методами вимірювань можна підвести такі підсумки: наносенсиори мають розміри які в 10 разів менші у порівнянні з іншими датчиками, їх чутливість може бути більшою в 2-3 рази, швидкість відгуку в наносенсора в 5-10 разів швидша за відгук у датчику.

5. Проаналізовано сферу застосування наносенсорів і встановлено, що сюди відноситься медицина, енергетика, електроніка та інші. Дослідження в цих областях відкриває нові можливості для вирішення різних проблем, зокрема, забезпечення більш точної діагностики хвороб, підвищення ефективності виробничих процесів та розробки нових матеріалів з властивостями, що задовольняють потреби сучасного ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nanosensors Market by Type. <https://www.alliedmarketresearch.com/nanosensors-market>(дата доступу: 10.05.2023 р.)
2. Sushma Dave, Jayashankar Das and Sougata Ghosh. *Advanced Nanomaterials for Point of Care Diagnosis and Therapy*. Kidlington: Elsevier, 2022. 594 p.
3. Muhammad Akram Chaudhry, Razaqat Hussain and Faheem K. Butt. *Metal Oxide-Carbon Hybrid Materials*. Kidlington: Elsevier, 2022. 588 p.
4. Vinod Kumar Khanna. *Nanosensors: physical, chemical, and biological*. Boca Raton: CRC Press, 2016. 666 p.
5. Sabu Thomas, Tuan Anh Nguyen, Mazaher Ahmadi, Ali Farmani, Ghulam Yasin. *Nanosensors for Smart Manufacturing*. Kidlington: Elsevier, 2021. 632 p.
6. Yaser Dahman. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*. . Kidlington: Elsevier, 1st edition, 2017. 282 p.
7. Aiguo Wu, Waheed S. Khan. *Nanobiosensors: from design to applications*. Weinheim: Wiley-VCH; 1st edition, 2020. 416 p.
8. Adil Denizli, Tuan Anh Nguyen, Ashok Kumar Nadda. *Nanosensors for Smart griculture*. Kidlington: Elsevier, 2021. 824 p.
9. Yolanda Pico. *Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications*. . London: Academic Press; 1st edition, 2016. 812 p.
10. “Nanosensor in Gas Monitoring: A Review”- Julkapli N. M. and Bagheri S., *Nanotechnology in Environmental Science Chapter 14*, 2018, DOI: 10.1002/9783527808854.ch14
11. Sibel A. Ozkan and Afzal Shah. *New Developments in Nanosensors for Pharmaceutical Analysis*. London: Academic Press; 1st edition, 2019. 430 p.
12. Kaushik Pal , Fernando Gomes. *Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications*. Kidlington: Elsevier, 2020. 472 p.
13. Vinod Kumar Khanna. *Optical Nanosensors*. Boca Raton: CRC Press, 2012. 62 p.
14. Manuela Reitzig , Julia Katzmann , Christiane Schuster , and Thomas Härtling. *Optical nanosensor technology – from basic research to industrial applications // AMA*

Conferences 2015 – SENSOR 2015 and IRS 2015. Dresden: Germany Institute for Solid State Electronics, 2015. 5 p.

15. Electronic Nanosensors Based On Nanotransistor With Bistability Behaviour. https://www.researchgate.net/figure/The-construction-diagram-for-a-electronic-nanosensor-devices-The-function-base-is-a_fig3_226433187(дата доступа: 8.05.2023

p.).

16. Adriana Marcia Graboski, Janine Martinazzo, Sandra Cristina Ballen, Juliana Steffens, Clarice Steffens. Nanotechnology in the Beverage Industry. Kidlington: Elsevier; 1st edition 2020. 744 p.

17. Francis Verpoort, Ikram Ahmad, Awais Ahmad, Anish Khan, Ching Chee. Nanomedicine Manufacturing and Applications. Kidlington: Elsevier, 2021. 406 p.

18. Baoguo Han, Vijay K. Tomer, Pradeep Kumar Singh. Nanosensors for Smart Cities. Kidlington: Elsevier, 2020. 962 p.

19. Adam Juniper. The Smart Smart Home Handbook: Control Your Home With Your Voice. London: Ilex Press, 2018. 160 p.

20. Xu, M.; Obodo, D.; Yadavalli, V.K. The design, fabrication, and applications of flexible biosensing devices. 2019, *124*, 96–114.

21. Pardeep Singh, Vijay Kumar, Mansi Bakshi, Chaudhery Mustansar Hussain. Environmental Applications of Microbial Nanotechnology: Emerging Trends in Environmental Remediation. Kidlington: Elsevier, 2022. 306 p.

22. Yoon, S.; Sim, J.K.; Cho, Y.-H. A Flexible and Wearable Human Stress Monitoring Patch. *Sci. Rep.* 2016, *6*, 23468.

23. Suresh Kaushik, Vijay Soni, Efstathia Skotti. Nanosensors for Futuristic Smart and Intelligent Healthcare Systems. Boca Raton: CRC Press, 2022. 414 p.

24. Chaudhery Mustansar Hussain, Suresh Kumar Kailasa. Handbook of Nanomaterials for Sensing Applications. Kidlington: Elsevier, 2021. 662 p.