

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 бакалавр

зі спеціальності 171 Електроніка

освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **Принципи функціонування і параметри елементів гнучкої
сенсорної електроніки**

здобувача групи ЕП-91

Могилевського Володимира Вікторовича

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

Володимир МОГИЛЕВСЬКИЙ

Керівник професор кафедри електроніки, загальної та
прикладної фізики, д-р ф.-м.н., професор

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

_____ І.Ю.Проценко

«16» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Могилевського Володимира Вікторовича

Тема роботи **ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І ПАРАМЕТРИ
ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ СЕНСОРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

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

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 12 червня 2023 року _____

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Актуальність тематики обумовлена поступовим переходом до нових мікроелектронних елементів та приладів: малогабаритні пристрої зберігання та відображення інформації, фотогальванічні панелі і реконфігуровані антени, гнучкі біологічні електронні імплантати, друковані батареї живлення та акумулятори. Перевагами приладів гнучкої електроніки є прозорість, стабільність, низький коефіцієнт термічного розширення, еластичність тощо.

Мета кваліфікаційної роботи полягала у систематизації та аналізі властивостей матеріалів і елементів гнучкої сенсорної електроніки; вивченні тензоефекту в одношарових металевих плівках з низьким коефіцієнтом тензочутливості.

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

1. Фізичні принципи та конструктивно-технологічні особливості елементів сенсорної електроніки.

2. Переваги, недоліки та перспективи розвитку приладів гнучкої електроніки.

3. Розрахунок коефіцієнта тензочутливості одношарової металеві плівки.

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

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи, методи досліджень.

Слайди № 4-9. Гнучкі функціональні сенсорні елементи: класифікація, конструкція, галузі застосування.

Слайди № 10-11. Гнучкі елементи живлення та сонячні батареї.

Слайди № 12-13. Методика і техніка експерименту. Результати вимірювань та розрахунків.

Слайд №14. Висновки.

Слайд №15. Публікації.

6. Дата видачі завдання 16.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 04.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 11.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	21.06.2023 р., 10-00 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Могилевський В.В.

Керівник

Однодворець Л.В.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра викладена на 26 сторінках, містить 8 рисунків, 12 використаних джерел.

Актуальність теми роботи обумовлена поступовим переходом до нових мікроелектронних елементів та приладів: малогабаритні пристрої зберігання та відображення інформації, фотогальванічні панелі і реконфігуровані антени, гнучкі біологічні електронні імплантати, друковані батареї живлення та акумулятори. Перевагами приладів гнучкої електроніки є прозорість, стабільність параметрів, еластичність.

Мета роботи: систематизація та аналіз властивостей матеріалів і елементів гнучкої сенсорної електроніки; вивчення тензоефекту в одношарових металевих плівках з низьким коефіцієнтом тензочутливості.

Методи: тензорезистивний метод; розрахунок коефіцієнтів тензочутливості на основі деформаційних залежностей опору.

Отримані результати:

1. Систематизація та аналіз властивостей матеріалів та елементів гнучкої сенсорної електроніки полягає в класифікації і вивченні фізичних та хімічних властивостей матеріалів, що використовуються для створення сенсорів та електронних компонентів, які мають стабільність параметрів при деформації, гнучкість, прозорість та еластичність.

2. Результати експериментальних вимірювань коефіцієнтів тензочутливості одношарових плівок Pd товщиною від 10 до 50 нм показують, що плівки Pd практично нечутливі до деформації, що говорить про перспективність плівок благородних металів для гнучкої електроніки.

Ключові слова: гнучка електроніка, сенсори, гнучкі сонячні елементи, деформація, коефіцієнт тензочутливості.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 МАТЕРІАЛИ І ПРИЛАДИ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ...	6
1.1 Класифікація основних матеріалів гнучкої електроніки.....	6
1.2 П'єзоелектричні, резистивні, ємнісні та оптичні сенсори	9
1.3 Параметри гнучких сенсорів.....	11
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ.....	12
2.1 Додаткові можливості: інтеграція в одяг, медичні прилади, портативні технології	12
2.2 Гнучкі сонячні елементи	15
2.3 Переваги та недоліки.....	16
2.3.1 Надійність та стійкість елементів до зношування.....	17
2.3.2 Складність виробництва.....	17
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ	19
3.1 Методика вимірювання коефіцієнта тензочутливості плівкових матеріалів	19
3.2 Результати вимірювань та розрахунків.....	22
ВИСНОВКИ.....	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	25

РОЗДІЛ 1

МАТЕРІАЛИ І ПРИЛАДИ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Класифікація основних матеріалів гнучкої електроніки

Гнучка електроніка передбачає використання матеріалів з високою гнучкістю та еластичністю, що дозволяє їм зберігати свої функції при різних формах та розмірах. Основні матеріали, які використовуються в гнучкій електроніці, можна класифікувати наступним чином [1, 2]:

Органічні матеріали: органічні матеріали, такі як пластик, папір та текстиль, є найбільш поширеними матеріалами для гнучкої електроніки. Органічні матеріали є однією з основних груп матеріалів, які використовуються в гнучкій електроніці. Вони включають в себе різні полімерні сполуки, такі як поліакрилати, полістироли, поліуретани, поліетилен терефталат та інші. Органічні матеріали мають ряд переваг у порівнянні з іншими матеріалами, зокрема:

- дешевші та більш доступні для виробництва.
- легкі та гнучкі, що дозволяє їх використовувати в гнучких електронних пристроях.
- можуть мати різні властивості, включаючи провідність, ізоляцію та підсвічування, що робить їх більш універсальними для різних застосувань.
- органічні матеріали можуть бути легко перероблені та рецикловані, що дозволяє знизити негативний вплив на довкілля.
- органічні матеріали використовуються в різних електронних пристроях, таких як OLED-дисплеї, сонячні батареї, сенсорні панелі та інші. Вони є однією з ключових складових гнучкої електроніки і відіграють важливу роль у її розвитку.

- наноматеріали, такі як кремнієва наноінженерія та нанотрубки вуглецю, можуть бути використані для створення гнучких транзисторів та інших електронних пристроїв. Вони мають високу електричну провідність та можуть бути виготовлені з високою точністю. Наноматеріали - це матеріали, які мають розміри від 1 до 100 нанометрів включно, тобто від 1 до 100 мільйонних часток міліметра. Ці матеріали мають унікальні фізичні та хімічні властивості, які різняться від властивостей більш крупних матеріалів того ж складу. Наприклад, наночастинки золота мають інший колір та більшу активність у порівнянні з більш крупним золотом.

- наноматеріали застосовуються в гнучкій електроніці для створення електронних пристроїв, які мають низьку споживану енергію та високу продуктивність. Наночастинки з металів та напівпровідників використовуються для створення тонких плівок та провідників, які мають високу електричну провідність та прозорість. Наноматеріали також використовуються для створення сенсорів, екранів, батарей та інших компонентів гнучкої електроніки.

- однією з основних переваг наноматеріалів є їхня велика поверхня у порівнянні з об'ємом, що забезпечує високу реактивність та ефективність взаємодії з іншими матеріалами. Однак, з використанням наноматеріалів пов'язані певні виклики, пов'язані з безпекою та ризиками здоров'я. Тому важливо проводити дослідження та розробляти відповідні стандарти для безпечного використання наноматеріалів в гнучкій електроніці та інших сферах.

Металеві матеріали: металеві матеріали, такі як алюміній та мідь, можуть бути використані для створення гнучких провідників та антен. Вони мають високу електричну провідність та можуть бути легко виготовлені за допомогою технології друку.

Металеві матеріали є одним з основних класів матеріалів, що використовуються в гнучкій електроніці. Вони мають високу електропровідність та механічну міцність, яка дозволяє їм зберігати свою форму при гнучкому згинанні. Одним з найпоширеніших металевих матеріалів в гнучкій електроніці

є мідь. Вона має високу електропровідність та добре піддається обробці, тому її можна легко виготовляти у вигляді тонких плівок для застосування в електронних пристроях. Інші металеві матеріали, такі як алюміній та золото, також використовуються в гнучкій електроніці, але їхні властивості можуть бути менш сприятливими для деяких застосувань. Наприклад, алюміній має меншу електропровідність, а золото - високу вартість.

Загалом, металеві матеріали використовуються в гнучкій електроніці для створення провідників, електродів, контактів та інших компонентів, які вимагають високої електропровідності та механічної міцності. Однак, металеві матеріали можуть бути менш прозорими та менш гнучкими, ніж деякі інші класи матеріалів, такі як органічні матеріали та наноматеріали [3, 4].

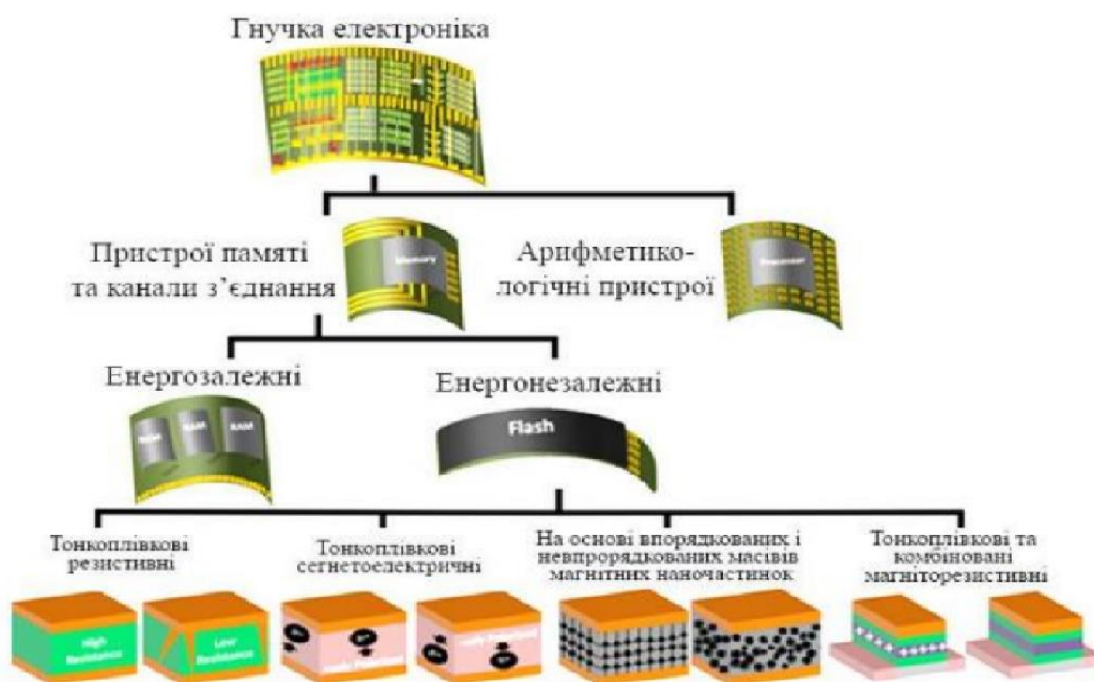


Рис.1.1. Класифікація пристроїв гнучкої електроніки, яка базується на використанні тонких плівок металів та масивів наночастинок з магнітними властивостями

Склопластик є матеріалом з високою міцністю та гнучкістю, який може бути використаний для створення гнучких дисплеїв та сенсорів. Він має високу опору до зносу та корозії, що робить його ідеальним для використання у зовнішніх умовах. Науково-технічна класифікація матеріалів гнучкої електроніки може включати склопластик, який є композитним матеріалом зі скловолокон та полімерної матриці. Склопластик має багато переваг, таких як висока міцність та жорсткість при малій вазі, стійкість до вологи, тепла та корозії. Склопластик може використовуватись для створення гнучких електронних пристроїв, таких як гнучкі сенсорні панелі, органічні світлодіоди та гнучкі батареї. У гнучких електронних пристроях, склопластик забезпечує стійкість та міцність матеріалу, що дозволяє їм працювати у різноманітних умовах. Він також може бути легко формований та вирізаний на будь-яку форму, що дозволяє створювати гнучкі електронні пристрої різної конфігурації та розміру.

1.2 П'єзоелектричні, резистивні, ємнісні та оптичні сенсори

Принципи роботи гнучких датчиків включають різні чутливі механізми, такі як п'єзоелектричні, резистивні, ємнісні та оптичні [1, 5-7]. П'єзоелектричні датчики працюють, використовуючи кристали, які змінюють форму під впливом зовнішнього тиску, що створює зміну електричного поля, яке можна виміряти спеціальними електродами. Резистивні датчики змінюють свій опір при деформації, що можна виміряти за змінами електропровідності матеріалу. Ємнісні датчики працюють, вимірюючи зміни в електричному полі між двома провідними пластинами, тоді як оптичні датчики виявляють зміни інтенсивності світла або довжини хвилі. Гнучкі сенсори працюють на основі різних принципів, в залежності від їх конструкції та застосування.

П'єзоелектричні сенсори: Гнучкі п'єзоелектричні сенсори використовують п'єзоелектричний ефект для вимірювання деформації. Під дією зовнішньої сили, кристали п'єзокераміки генерують електричний заряд, який може бути вимірянний

і використаний для визначення механічних параметрів. При зміні форми п'єзоматеріалу виникає електричний сигнал, який може бути використаний для вимірювання механічних параметрів, таких як сила, тиск, деформація тощо.

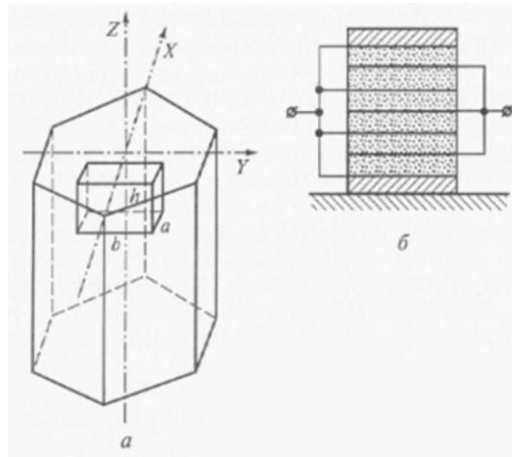


Рис.1.2. П'єзочутливий елемент (а) і перетворювач (б)

Пластина з п'єзоматеріалу, що містить п'єзоелектричний перетворювач тиску, має дві грані, на які нанесені електроди. Ці електроди використовуються для зняття заряду або напруги. У відсутності навантаження, на обкладинках пластини не спостерігається напруги.

Гнучкі резистивні сенсори використовують резистивний ефект для вимірювання деформації. Резисторні елементи розташовані на гнучкій пластині, і їх опір змінюється при деформації. Це може бути виміряно та використано для визначення механічних параметрів. Часто такі сенсори виготовляють з резистивних матеріалів, таких як полімери, карбонні нанотрубки, графен, метали тощо.

Гнучкі ємнісні сенсори використовують зміну ємності між електродами для вимірювання деформації. Якщо електроди розташовані на гнучкій пластині, то деформація може змінити відстань між ними, що змінює ємність. і сенсори часто

виготовляють з діелектричних матеріалів, таких як полімери, що змінюють свою діелектричну проникність при дії механічного напруження.

Гнучкі оптичні сенсори використовують зміну оптичних властивостей матеріалів для вимірювання деформації. Оптичні властивості матеріалів, такі як індекс заломлення, можуть змінюватися при деформації, і це може бути виміряно оптичними методами сенсори можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як оптичні волокна, плівки з квантових точок, полімерні матеріали тощо.

Переваги гнучких датчиків включають їх здатність інтегруватися в одяг, медичні пристрої, портативні технології та різні промислові застосування. Вони легкі, тонкі та зручні, тому їх легко носити та використовувати в різноманітних середовищах. Незважаючи на переваги гнучкої сенсорної електроніки, існують також проблеми та обмеження. Це проблеми з надійністю, зносостійкістю та складністю виготовлення. Проте постійні дослідження та розробки спрямовані на пошук шляхів вирішення цих проблем і розкриття повного потенціалу цієї технології.

1.3 Параметри гнучких сенсорів

Параметри гнучких сенсорів мають велике значення для їх ефективної роботи та відповідності потребам застосування. Основні параметри гнучких сенсорів включають: чутливість - це здатність сенсора виявляти малі зміни величини вимірюваного параметра. Чутливість гнучких сенсорів залежить від типу матеріалу, з якого вони зроблені, а також від їх конструкції. Чутливість гнучкого сенсора визначає, наскільки добре він може вимірювати деформацію або інші параметри. Це може бути виміряно в одиницях деформації на одиницю сигналу, наприклад, мікрвольти на мікрон деформації [8-10].

Лінійність - властивість сенсора зберігати лінійну залежність між величиною вимірюваного параметра та електричним сигналом, який він генерує. Якщо сенсор не є лінійним, то його відповідь на зміну параметра може бути

неточною та спотвореною. Лінійність гнучкого сенсора визначає, наскільки добре він відповідає лінійному закону. Ідеальний сенсор має лінійну відповідь на деформацію або інші вимірювання, але багато сенсорів можуть мати неточності у відповіді на великі деформації або сильні сигнали.

Гістерезис- це явище, коли значення вимірюваного параметра змінюється, а сенсор зберігає попереднє значення в електричному сигналі. Гістерезис може бути причиною неточних вимірювань та повільної реакції сенсора на зміни параметра. Гістерезис гнучкого сенсора визначає, наскільки його відповідь залежить від напрямку деформації. Гістерезис може бути причиною неточностей у вимірюваннях, якщо деформація змінюється в обидва напрямки.

Час реакції- це час, необхідний для того, щоб сенсор zareагував на зміну вимірюваного параметра та згенерував електричний сигнал. Час реакції залежить від типу сенсора та властивостей матеріалів, з яких він зроблений. Час реакції гнучкого сенсора визначає, як швидко він може відповісти на зміну деформації. Швидкість реакції може бути важливою для деяких застосувань, таких як вимірювання швидкості руху або вібрації.

Температурні умови експлуатації - це діапазон температур, при яких сенсор може працювати надійно та точно. Температурні умови експлуатації залежать від типу матеріалу та конструкції сенсора. Гнучкі сенсори можуть бути експлуатовані в широкому діапазоні температур [3, 5, 9].

РОЗДІЛ 2

ЗАСТОСУВАННЯ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Додаткові можливості: інтеграція в одяг, медичні прилади, портативні технології

Гнучка сенсорна електроніка відкриває безліч можливостей для застосування у різних галузях. Однією з цих можливостей є інтеграція в одяг, що відкриває шлях до розвитку так званого "портативного здоров'я" та "портативного спорту". Гнучкі сенсори можуть бути використані для вимірювання різних фізіологічних параметрів, таких як пульс, кров'яний тиск, температура тіла тощо. Це дозволить розробити портативні медичні прилади, що можуть використовуватись для моніторингу здоров'я та діагностики різних захворювань.

Крім того, гнучкі сенсори можуть бути використані в портативних технологіях, таких як смартфони, планшети та годинники. Вони можуть бути використані для вимірювання різних параметрів, таких як зміщення, тиск, вібрація та інші, що може допомогти в розробці більш інноваційних та функціональних пристроїв.

Гнучкі сенсори також можуть бути використані для розробки різноманітних медичних пристроїв, таких як браслети для моніторингу сну, реабілітаційні пристрої та інші. Вони можуть допомогти покращити якість життя людей та сприяти розвитку медичної технології [1, 6].

Гнучкі сенсори мають значний потенціал для розширення функціональності різних пристроїв та систем, зокрема для їх інтеграції в одяг, медичні прилади та портативні технології. Інтеграція в одяг: Гнучкі сенсори можуть бути інтегровані в одяг для вимірювання пульсу, температури тіла, віддалі від стін та інших параметрів. Це може забезпечити більш точну та зручну моніторингову систему для спортсменів, медичних пацієнтів та інших людей [1, 4, 9].

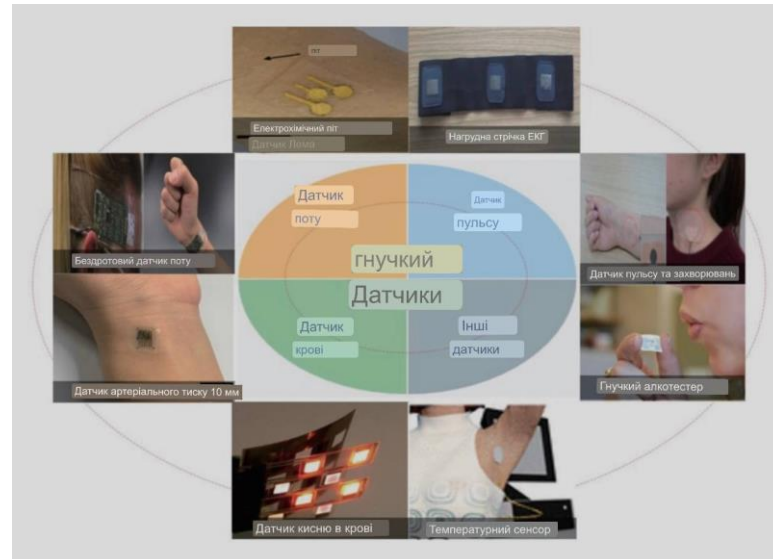


Рис.2.1. Діаграма гнучких датчиків, що можна носити для моніторингу фізіологічних сигналів: датчик кисню у крові, бездротовий датчик поту; датчик кров'яного тиску, датчик температури. Адаптовано із роботи [5]

Медичні прилади: Гнучкі сенсори можуть бути використані для вимірювання різних параметрів здоров'я, таких як кров'яний тиск, рівень кисню в крові, частота серцевих скорочень та інші. Це може допомогти медичним працівникам контролювати стан пацієнтів та надавати більш точну та ефективну допомогу.

Портативні технології: Гнучкі сенсори можуть бути використані для створення портативних пристроїв, таких як смартфони, планшети та інші, які можуть вимірювати різні параметри, такі як температура, віддалі, відстань та інші. Це може покращити функціональність та зручність використання таких пристроїв.

Спорт: Гнучкі сенсори можуть бути використані для моніторингу різних параметрів, таких як пульс, віддалі, кроки, калорії, рівень глюкози та інші, що допомагає спортсменам вдосконалювати свої тренування та досягати кращих результатів.

Промисловість: Гнучкі сенсори можуть бути використані для моніторингу різних параметрів у виробництві, таких як тиск, вібрація, температура та інші,

що дозволяє контролювати процеси виробництва та покращувати ефективність роботи.

Гнучкі сенсори можуть бути використані для досліджень в різних наукових областях, включаючи фізику, хімію, біологію та інші. Вони можуть допомагати вимірювати різні параметри та збирати дані для подальшого аналізу; створення електронних шкір, що дозволяє роботам та іншим пристроям взаємодіяти з оточуючим середовищем та розпізнавати різні об'єкти

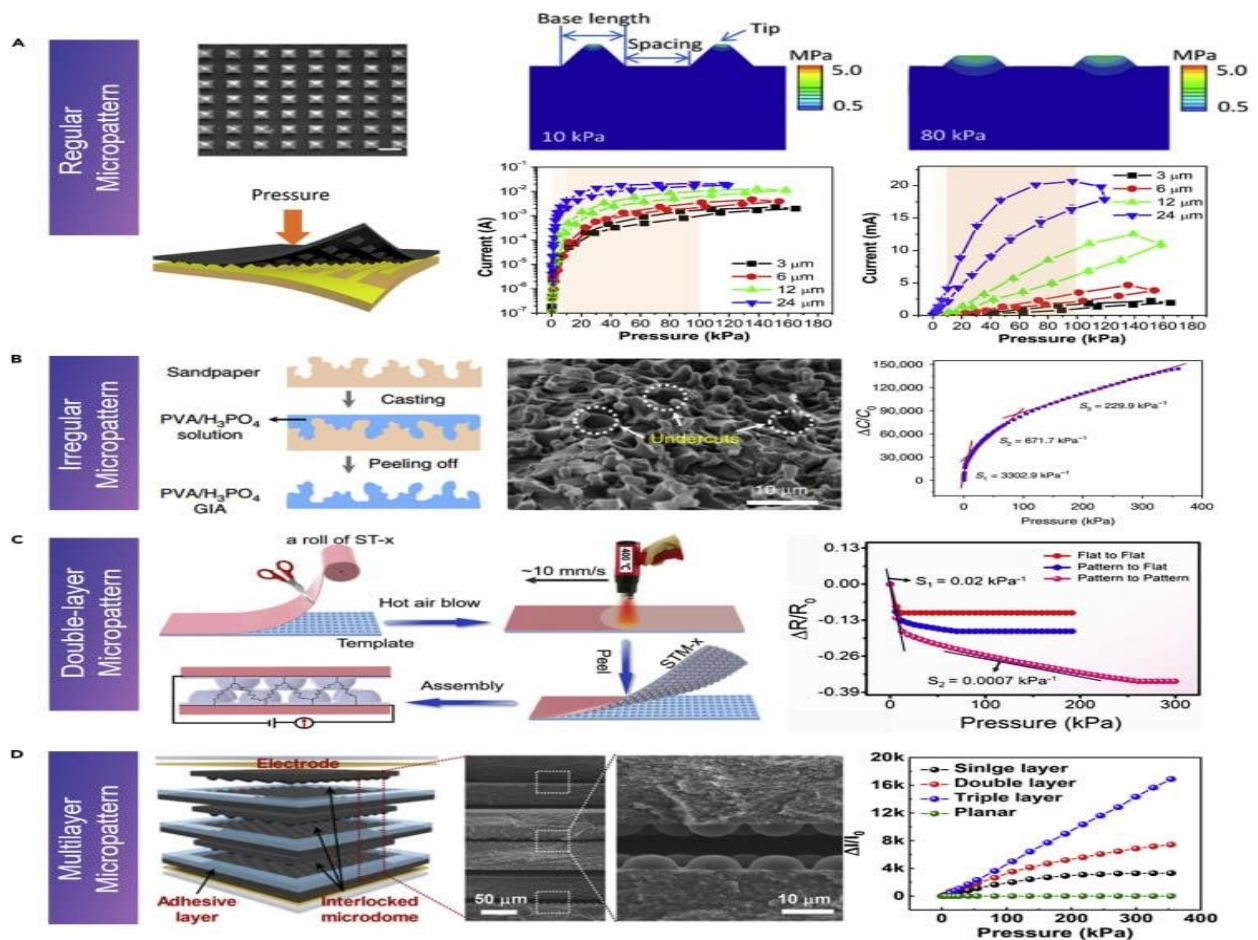


Рис 2.2. До пояснення фізичних принципів роботи гнучких датчиків тиску

2.2 Гнучкі сонячні елементи

Гнучкі сонячні елементи - це елементи сонячної батареї, які можуть бути виготовлені з гнучких матеріалів, таких як полімери. Вони відрізняються від традиційних сонячних елементів, які зазвичай виготовляються з кристалів кремнію або інших напівпровідникових матеріалів, зазвичай за допомогою складних процесів виробництва.

Гнучкі сонячні елементи можуть бути виготовлені з високої ефективністю конвертування сонячної енергії в електричну енергію і вони можуть бути використані в різних додатках, таких як портативні пристрої, одяг, будівельні матеріали, транспортні засоби тощо.



Рис 2.3. Гнучка сонячна панель

Такого типу сонячні панелі мають високу ефективність та енерговиробітництво, що дозволяє їм генерувати більше енергії на одиницю поверхні, ніж звичайні сонячні панелі. Вони мають високу витривалість та стійкість до погодних умов та корозії, можуть бути виготовлені у різних кольорах та дизайнах, що дозволяє їх інтегрувати у різні архітектурні стилі та дизайни будівель.

Гнучкі сонячні елементи є інноваційним та універсальним рішенням для генерації енергії, що може бути використано у різних галузях, включаючи будівництво, транспорт, комунікації та багато іншого.

Переваги гнучкої сенсорної електроніки:

- може прогинатися, згинатися і розтягуватися, що дозволяє їй пристосовуватися до різноманітних поверхонь і форм.
- виготовляється з легких матеріалів, що дозволяє їх використовувати в портативних технологіях та вбудовувати в одяг.
- дозволяє здійснювати вимірювання з високою чутливістю та точністю.
- може бути використана в різних галузях: наука, промисловість, медицина.

Недоліки гнучкої сенсорної електроніки:

- обмеження за температурним режимом;
- гнучкі сенсори можуть бути менш надійними в порівнянні з традиційною електронікою через складність їх виробництва та властивості матеріалів.
- складні технології виробництва, що може збільшувати їх вартість.
- менш стійки до зносу та деградації, особливо при довготривалому використанні або у важких умовах експлуатації.

2.3 Надійність та стійкість елементів до зношування

Одним із найбільших викликів гнучкої сенсорної електроніки є забезпечення надійності та стійкості елементів до зношування. При виготовленні гнучких сенсорів використовуються матеріали, які можуть змінювати свою форму під дією зовнішніх впливів, таких як згинання, розтягнення або стиснення. Однак, такі впливи можуть призвести до пошкодження матеріалу та зменшення його функціональності.

Для забезпечення надійності та стійкості гнучких сенсорів до зношування, виробники використовують різні технології та матеріали, такі як полімерні

композити, металеві сплави, кремнієві компоненти та інші. Крім того, важливо враховувати умови експлуатації гнучких сенсорів, такі як температура, вологість, вплив зовнішніх механічних чинників тощо.

Недоліком гнучких сенсорів є те, що їх надійність та стійкість до зношування зазвичай менша, ніж у традиційних електронних компонентів, зокрема, у зв'язку з тим, що гнучкі матеріали мають меншу міцність та стійкість до деформації. Також важко забезпечити стабільну роботу гнучких сенсорів при високих температурах, що обмежує їх використання в деяких областях, наприклад, в авіаційній техніці.

2.4 Складність виробництва

Виробництво гнучких сенсорів вимагає високої технологічності та точності процесу виготовлення. На відміну від традиційних електронних компонентів, гнучкі сенсори виготовляються з м'яких, гнучких полімерних матеріалів.

Однією з проблем виробництва є підвищена вимога до чистоти виробничого середовища, оскільки будь-яка домішка може вплинути на якість та функціональність сенсора. Однак, з розвитком технологій та оптимізацією процесів, виробництво гнучкої електроніки стає все більш доступним і ефективним.

Крім того, виробництво гнучких сенсорів може бути витратним та складним процесом, що збільшує їх вартість порівняно з традиційними електронними компонентами. Виробники гнучкої електроніки повинні враховувати взаємодію різних компонентів, які можуть впливати на функціонування пристрою, що збільшує складність та вимагає більш детальної настройки та контролю процесу виробництва, а також може потребувати використання спеціальних матеріалів та технологій з метою підвищення вартості виробництва та зменшення доступності для широкого кола споживачів.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ ОДНОШАРОВИХ ПЛІВОК ДЛЯ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Для отримання одношарових плівок використовувались вакуумна установка типу ВУП-5М ($p \sim 10^{-3}$ - 10^{-4} Па). Конденсація проводилась з використанням випарників двох типів: тиглів із Al_2O_3 та молібденових човників або дротин. Плівкові матеріали формувалися терморезистивним методом. Швидкість осадження металу регулювалася зміною величини електричного струму (прилад SM 7020-D) і складала 1 – 1,5 нм/с (див., наприклад, [11]).

Пристрої для отримання плівкових зразків та подальшого їх дослідження розміщувались в корпусі робочої камери (Рис.3.1). За допомогою цифрових мультиметрів типу UT70D та UT70B контролювалися відповідно електричний опір (точність $\pm 0,05\%$) плівок та температура (точність ± 1 К) підкладки, при використанні хромель – алюмелевої термопари. Експериментальні дані з мультиметрів через інтерфейс RS232 (RS485) передавалися на комп'ютер.

Товщина плівок контролювалась *in situ* методом кварцового резонатора (точність 10 %), для чого використовувалися промисловий резонатор типу РГ-08 з частотою 10 МГц, генератор електричних коливань.

Товщина сконденсованої плівки визначалась за співвідношенням:

$$d = \frac{N_a \cdot D_q}{D_f \cdot f_q^2} \cdot (f_q - f),$$

де $N_a = 1,668 \cdot 10^3$ Гц·м – частотна стала для кварцової пластини;

D_q та D_f – густина кварцу і речовини, яка конденсується, відповідно;

f_q, f – резонансна частота кварцу до і після конденсації металу.

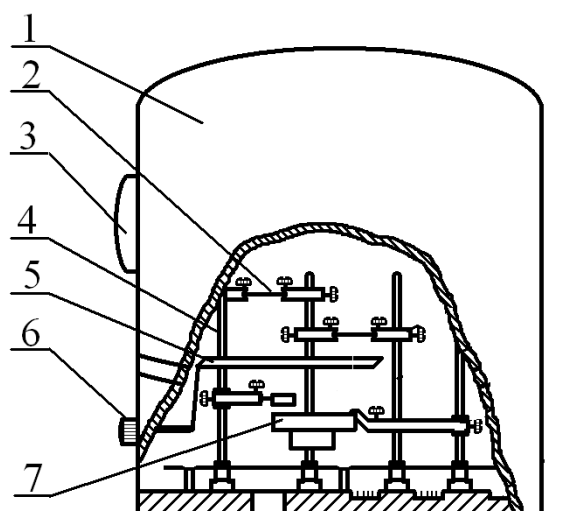
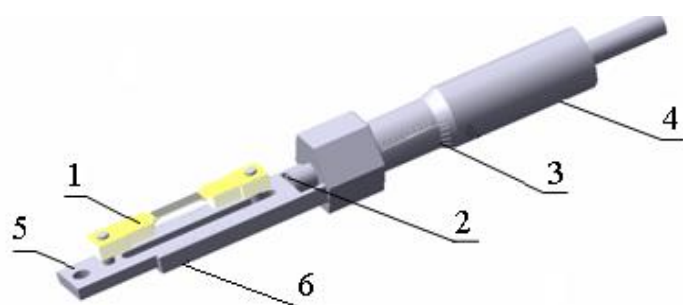
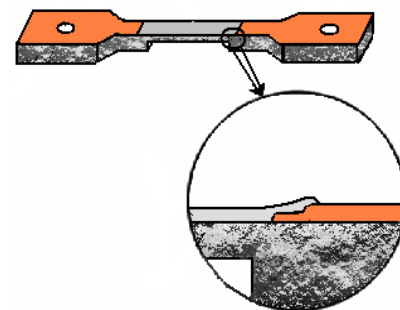


Рис. 3.1. Схема робочої камери ВУП-5М (а): 1 – корпус робочої камери; 2 – випаровувачі; 3 – спостережувальне віконце; 4 – стійка; 5 – захисна маска; 6 – обертова ручка маски; 7 – столик для відпалювання зразків



а



б

Рис. 3.2. Схема деформаційного пристрою (а) та підкладки (б):

1 – закріплена підкладка; 2 – рухомий шток; 3 – мікрометрична шкала;
4 – мікрогвинт; 5 – повзун; 6 – поздовжня напрямна повзуна

Тензорезистивні властивості металевих плівок на тефлонових підкладках в області пружної і пластичної деформації досліджували за допомогою деформаційного пристрою, сконструйованого на базі мікрометра (рис.2.3а). При дослідженні поздовжньої тензочутливості необхідно мати на увазі, що у процесі деформації (до $\varepsilon_1 \cong 2\%$) відносна зміна опору плівкових зразків складає величину $\sim 1-10\%$, тому при використанні спеціальних масок, формувалася сходинкоподібна (2 - 3 ступені) геометрія контактів (плівок Си загальною товщиною близько 50 нм). До плівкових контактів гвинтом притискалися пластини з фольгованого міддю текстоліту. Вимірювання загального електроопору контактів показало, що він складав величину $\sim 0,1$ Ом.

Поздовжня деформація визначається співвідношенням:

$$\Delta\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_n},$$

де l_n – довжина плівки до деформації;

Δl – абсолютне видовження плівки, яке визначали за показниками мікрогвинта.

Розміри плівки витримувались постійними (довжина $l = 15$ мм, ширина $a = 5$ мм).

Для визначення коефіцієнта поздовжньої тензочутливості в області пружної і пластичної деформації в інтервалі $\Delta\varepsilon_l$ були побудовані деформаційні залежності $\Delta R/R_n$ від поздовжньої деформації ε_l для перших чотирьох або п'яти деформаційних циклів "навантаження-зняття навантаження". Розрахунок величини середнього коефіцієнта поздовжньої тензочутливості γ_l здійснювався за тангенсом кута нахилу деформаційних залежностей (рис.2.4) або усереднення миттєвих значень γ_{lm} по усьому деформаційному інтервалу.

Середній та миттєвий коефіцієнти тензочутливості визначались за співвідношеннями:

$$\gamma_l = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(\varepsilon_l) - R(0)}{R(0)} \quad \text{і} \quad \gamma_{lm} = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{dR}{d\varepsilon_l}, \quad (2.2)$$

де $R(\varepsilon_l)$ – опір плівки при деформації ε_l ;

$R(0)$ – опір недеформованого зразка.

Дослідження тензорезистивних властивостей плівок [12] в інтервалі деформацій $\Delta\varepsilon_l = (0 - 2)\%$ (рис.2.2) проводилося за допомогою розробленої [245] автоматизованої системи, що дало можливість здійснити велику кількість деформаційних циклів у статичному і динамічному режимах роботи при швидкості деформації від 0 до 0,1%/с.

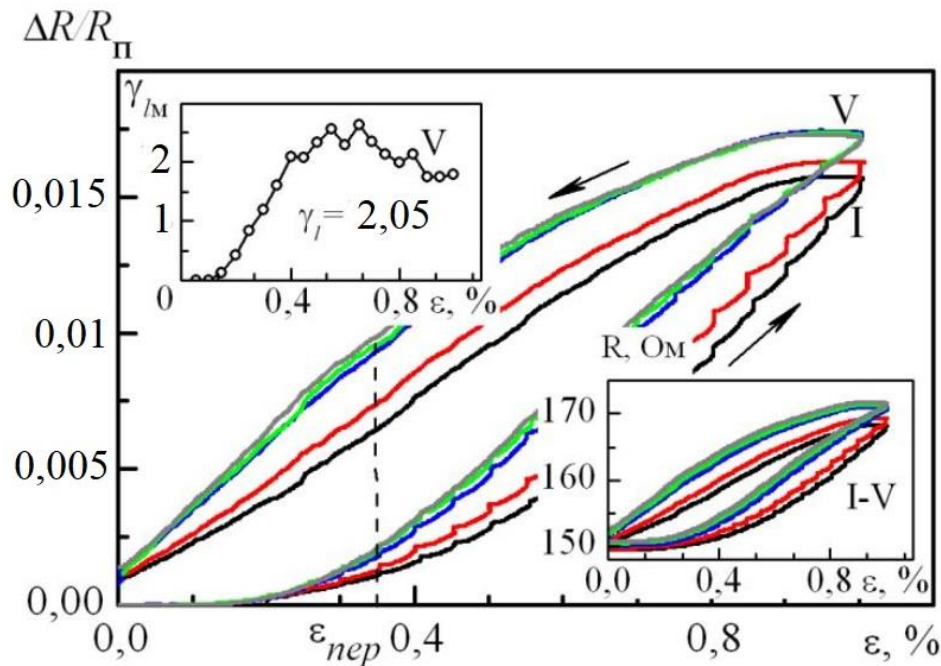


Рис.3.3 – Деформаційні залежності опору для плівки Pd(30нм)/Пі (Пі - підкладка)

Апаратну основу системи становлять частотомір, 8-канальний 16-бітний сигма-дельта АЦП ADAM-4018, за допомогою якого проводиться вимірювання опору зразка; релейний модуль ADAM-4068 – джерело керуючої напруги електродвигуна; перетворювач інтерфейсів USB→RS232/422/485 ADAM-4561; асинхронний конденсаторний електродвигун і веб-камера Creative Labs. Управління експериментом і обробка результатів здійснювалася на основі програмного забезпечення, розробленого в середовищі LabVIEW 8.50 з використанням модуля машинного зору. На основі залежностей $\gamma_{lm}(\varepsilon_l)$ для

першого деформаційного циклу були визначені деформації переходу пружна (квазіпружна)/пластична деформація.

Результати вимірювань вказують на низьке значення коефіцієнта тензочутливості для плівок Pd (від 1,8 до 2,2 одиниць) при товщині плівок від 20 до 50 нм [12]. Це говорить про те, що такі плівкові матеріали можуть бути використані як елементи гнучкої електроніки, оскільки їх електричні властивості і практично не чутливі до деформації.

ВИСНОВКИ

1. Гнучка сенсорна електроніка – напрям сенсорики, перспективна галузь розробки електронних пристроїв з унікальними властивостями та перевагами на основі полімерних, металевих та напівпровідникових матеріалів.
2. Показано, що однією з головних переваг гнучкої сенсорної електроніки є її здатність адаптуватися до форми навколишнього середовища, що дозволяє використовувати її в широкому діапазоні застосувань, де традиційні жорсткі датчики були б непридатними. Крім того, ці пристрої можна виготовляти за допомогою економічно ефективних процесів, таких як друк і обробка з рулону на рулон, що робить їх привабливим варіантом для великомасштабного виробництва.
3. До проблем гнучкої електроніки слід віднести підвищення чутливості, надійності, здатності витримувати високі на низькі температури, сильні деформації.
4. Систематизація та аналіз властивостей матеріалів та елементів гнучкої сенсорної електроніки полягає в класифікації та вивченні фізичних та хімічних властивостей матеріалів, що використовуються для створення сенсорів та електронних компонентів, які мають гнучкість та можуть згинатися без пошкодження.
5. Результати експериментальних вимірювань коефіцієнтів тензочутливості одношарових плівок Pd товщиною від 10 до 50 нм показують, що плівки Pd практично нечутливі до деформації, що говорить про перспективність плівок благородних металів для гнучкої електроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вбудовані біомедичні системи та бездротові сенсорні мережі: навчальний посібник. / А. В. Пархоменко, А.В. Туленков, О. М. Гладкова, Я. І. Залюбовський – Житомир: ПП «Євро-Волинь», 2021. – 200 с.
2. Hwang, G.T., Park, J.Y., Kang, B., Kim, K.Y., and Cho, K. (2019). A review of flexible and stretchable tactile sensors for wearable electronics. *Journal of Electronic Materials*, 48(10), 6681-6693.
3. High-performance magnetic sensorics for printable and flexible electronics / D. Karnaushenko, D. Makarov, M. Stöber et al. // *Adv. Mater.* – 2015. – V. 27, No 5. – P. 880-885.
4. Zegeye S. M. A Review Paper on Spintronics and Its Role to Improve Electronic Devices // *American Journal of Quantum Chemistry and Molecular Spectroscopy.* – 2019. – V. 3, No 2. – P. 41-47.
5. Review on spintronics: Principles and device applications / A. Hirohataa, K. Yamadab, Y. Nakatanic, I. -L. Prejbeanud, B. Diényd, P. Pirroe, B. Hillebrandse // *J. Mag. Mater.* – 2020. – V. 509, No 1. – P. 166711.
6. Bang K., Son G.-C., Son M., Jun J.-H., Effects of Li doping on the structural and electrical properties of solution-processed ZnO films for high-performance thin-film transistors // *Chem. Rev.* – 2018, V. 12. P. 41 – 46.
7. Wang, S., Xu, J., Wang, W., Wang, G., Rastak, R., Molina-Lopez, F. Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array / *Nature* – 2018. - V. 555, No. 7694. – P.83-88.
8. Stretchable magnetoelectronics / M. Melzer, D. Makarov, A. Calvimontes // *Nano Lett.* – 2011. – V. 11. – P. 2522.
9. Flexible spintronic devices on Kapton / A. Bedoya-Pinto, M. Donolato, M. Gobbi et al // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – V. 104. – P. 062412.

10. High-performance magnetic sensorics for printable and flexible electronics. / D. Karнаushenko, D. Makarov, M. Stober et al // Adv. Mater. – 2015. – Vol. 27, No 5. – P. 80-5.
11. Шабельник Ю.М., Чешко І.В., Логвинов А.М., Ткач О.П., Проценко С.І., Патент на корисну модель «Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-клапанного типу» No 136613 (27.08.2019 р.).
12. Толстіков Д.І., Пушкар С.О., Могилевський В.В., Ткач О.П., Однодворець Л.В. Функціональні плівкові матеріали на основі Fe, Pd та Cu як елементи гнучкої електроніки / Матеріали і програма Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2023». – Суми: СумДУ. – С.49-50.