

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАБІЛЬНОСТІ
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ
ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

студента гр.ЕП-41

М. В. Васюхно

Науковий керівник,
к. ф.-м. н., доцент

І. В. Чешко

Суми – 2018

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження — принципи реалізації та функціонування інформаційної системи контролю електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки

Мета роботи полягала у розробці та дослідженні інформаційної системи контролю електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки.

У результаті виконання роботи були проведені експерименти вимірювання тензорезистивних властивостей тонких плівок та дослідженню стабільності гнучких зразків до деформації. Розроблено автоматизовану систему для дослідження тензорезистивних властивостей плівок на розтяг та згин.

При виконанні роботи були використані такі методи як метод електронно-променевого випаровування для отримання тонких плівок міді; метод кварцового резонатора для виміру товщини плівки; вимірювання деформації на розтяг та згин для обчислень отриманих даних.

Апаратна частина системи контролю складалась з апаратної платформи Arduino та програмного забезпечення LabVIEW для обміну даними з комп'ютером та контролю за інформаційною системою стабільності електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки.

Робота викладена на 40 сторінках, у тому числі містить 34 рисунки та список літератури із 35 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕМЕНТИ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, ARDUINO, LABVIEW.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1_СТАБІЛЬНІСТЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	5
1.1 Загальна інформація про елементи гнучкої електроніки	5
1.1.1 Матеріали гнучкої електроніки	9
1.1.2 Гнучкі електричні елементи.....	10
1.2 Дослідження стабільності електрофізичних властивостей елементів електроніки	14
1.2.1 Тензоефект	14
1.2.2 Методики вимірювання тензоефекту	16
РОЗДІЛ 2_АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	18
2.1 Методика дослідження тонкоплівкових зразків	18
2.1.1 Метод електронно-променевого випаровування	18
2.1.2 Метод кварцового резонатора.....	20
2.1.3 Методика вимірювання деформації на розтяг	23
2.1.4 Методика вимірювання деформації на згин.....	23
2.2 Апаратна частина системи контролю	26
2.3 Вибір програмного забезпечення	30
2.4. Результати вимірювання.....	32
2.5 Інформаційна система контролю стабільності електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки.....	32
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Гнучка електроніка пов'язана із сферою фізики, хімії та технологій, яка займається створенням електронних пристроїв на основі нових напівпровідникових матеріалів. У цій сфері однаково активно ведуться лабораторні розробки, перенесення технологій з лабораторії у виробництво, інжиніринг кінцевих пристроїв і комерціалізація нових продуктів. Таким чином, сфера гнучкою електроніки є безперервний процес створення та реалізації нових ідей, пристроїв і технологій [1-3].

Під гнучкою електронікою розуміють сукупність всіх технологій, які можуть потенційно забезпечити гнучкість пристроїв. Перевагою таких технологій є більш прості і дешеві виробничі процеси, які дозволяють знизити вартість кінцевих пристроїв в порівнянні з традиційними технологіями електроніки. Так, можна знизити кількість циклів фотолітографії, уникнути високотемпературних процесів і спеціальних вакуумних умов. Крім того, для виготовлення пристроїв гнучкою електроніки можна використовувати розчинні і друковані методи, що значно знижує вартість технологічних процесів і збільшує їх продуктивність. Використання матеріалів гнучкою електроніки дозволяє не тільки знизити вартість одного пристрою, але також робити пристрої великої площі, знизивши при цьому вартість одиниці площі. Це відіграє велику роль у виробництві дисплеїв і сенсорних інтерфейсів. Механічні властивості – гнучкість, розтяжність мають велике значення при інтеграції електроніки в застосування, не доступні при використанні кремнієвої електроніки. Переваги кінцевих пристроїв на основі технологій гнучкої електроніки можуть бути дуже різноманітними в залежності від використовуваних матеріалів і компонентів [4].

Мета даної роботи полягає в розробці та дослідженні інформаційної системи контролю електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки.

РОЗДІЛ 1

СТАБІЛЬНІСТЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Загальна інформація про елементи гнучкої електроніки

Технології обробки напівпровідникових матеріалів є ключовими в електроніці. Відмітна особливість напівпровідникових матеріалів, використовуваних в гнучкою електроніці – це простота їх нанесення. Органічні, нановуглецеві, метал – оксидні напівпровідники є основними матеріалами гнучкою електроніки, які забезпечують простоту процесів виготовлення електронних пристроїв. Щоб розібратися в перевагах матеріалів гнучкою електроніки, звернемося до традиційних напівпровідників, широко використовуваних в сучасній промисловості. При виготовленні пристроїв на основі традиційного монокристалічного кремнію використовуються складні технологічні процеси росту кристалу, та його різання, легування, зменшення товщини. Для створення інтегральної схеми (ІС) необхідні десятки циклів фотолітографії, для кожного з яких потрібно кілька технологічних операцій, а також попереднє виготовлення дорогих масок. У готовій інтегральній схемою кремній одночасно грає роль і підкладки, і активного шару з різними типами провідності. Напівпровідникові матеріали гнучкою електроніки наносяться на підкладку і виконують роль лише активного шару. Підкладка і вся структура пристрою на ній при цьому може бути краще, ніж мінімально можлива товщина кремнієвої інтегральної схеми. Крім того, механічні властивості кремнієвих ІС визначаються властивостями кристалічного кремнію. При зменшенні товщини або збільшенні площі кремнієва ІС може пошкоджуватися, в той час як в пристроях гнучкою електроніки механічні властивості визначаються вибором підкладки, який може бути довільним і залежати від потреб кінцевого застосування. Таким чином, ІС на гнучкій електроніці може бути товщиною в

один-два десятка мікрметрів, володіти гнучкістю, що забезпечить більшу інтегрованість ІС, стійкість до механічних пошкоджень, дозволить створювати тонкі ІС і матриці пристроїв навіть на великих площах використання матеріалів і технологій гнучкої електроніки дозволяє покривати великі площі напівпровідниковими речовинами, не знижуючи їх продуктивність в порівнянні з малими площами. Вершиною технологічної досконалості, досягнутої на даний момент в сфері технологій гнучкої електроніки, є дисплеї на основі напівпровідникового матеріалу – оксиду індію, галію і цинку (IGZO) [5–7].

Інтеграція транзисторних матриць на основі IGZO і відображає шари на основі іншої технології гнучкої електроніки – органічних світлодіодів (OLED) – дозволить створити гнучкі дисплеї з максимальною роздільною здатністю і найбільш натуральної передачею кольору. В даний момент ці технології існують окремо і вже комерціалізовані. Будова і принципи функціонування OLED –дисплеїв значно відрізняються від найбільш поширених на сьогоднішній день рідкокристалічних (LCD) дисплеїв [8].

Телевізори, смартфони і смарт – годинник з OLED-дисплеями використовують технологію AMOLED (активної матриці на органічних світлодіодах). У LCD дисплеях використовується загальна для всіх пікселів підсвічування і чорні пікселі будуть просто фільтрувати підсвічування так, щоб показувати чорний колір. Саме з метою енергозбереження компанія Apple вибрала AMOLED-дисплей для свого мініатюрного продукту [9].

Органічні і оксидні напівпровідники використовуються не тільки в дисплеях. На основі органічних і IGZO транзисторів розробляються і виробляються найрізноманітніші пристрої. Одним з них є радіочастотні мітки для маркування об'єктів. Такі мітки дозволяє зчитувати інформацію про об'єкт за допомогою різних пристроїв, в тому числі смартфонів. Радіомітки використовуються всюди починаючи з маркування одягу в магазинах і закінчуючи маркуванням тварин [10].



Рис. 1.1. Зображення 18-дюймового OLED-дисплея на пластиковій підкладці від LG [11]

Так, вартість радіопозначки на основі гнучкої електроніки може бути близько одного цента, а значить такі мітки зможуть використовуватися, наприклад, для маркування товарів в супермаркеті. Технологія радіоміток дозволить пробивати всі продукти одноразово, просто відхиливши кошик покупця повз зчитувача [12].

Гнучка електроніка широко застосовується для розробки сенсорних пристроїв. На основі матеріалів гнучкою електроніки створюються сенсори температури, газів, вологості, тиску, фотосенсори для детекції зображення, оптичні сенсори для застосування в пульсометра. Одним з найбільш цікавих застосувань гнучких сенсорів є електронна шкіра - поверхня з нанесеними на неї гнучкими розтягуються сенсорами тиску і температури, яка може забезпечити не тільки чутливість протезів і систем робототехніки, а й максимальну схожість з людською шкірою [12].

Сенсори в області медицини і біометрії також зараз розробляються і включають пульсометри, сенсори температури, сенсори електрофізіологічних сигналів, в тому числі, м'язової активності. На основі гнучкої електроніки створюються нейроінтерфейси для відстеження активностей головного мозку, відновлення рухових функцій за допомогою стимуляції спинного мозку, відновлення зору. Гнучка електроніка в різних галузях суспільства, зокрема: охорона здоров'я; автомобільна промисловість; людсько-машинні інтерфейси; мобільний зв'язок та обчислювальні платформи; вбудовані системи як у живій, так і в ворожому середовищі; а також спеціальні програми, такі як: Гнучкі системи електроніки наступного покоління та основні відповідні сектори – основні матеріали, такі як прониклива промисловість, історично значимі та стандартні алюміній, кремній, германій та срібло, а також більш екзотичні

низькорозмірні матеріали, включаючи нанопроволоки, квантові точки, і нанотрубки – все це буде необхідним для полегшення розробки та експлуатації руйнівних застосувань у сферах людської інтерактивності, обчислень, дисплеїв, генерації та зберігання енергії, а також електронного текстилю [13].

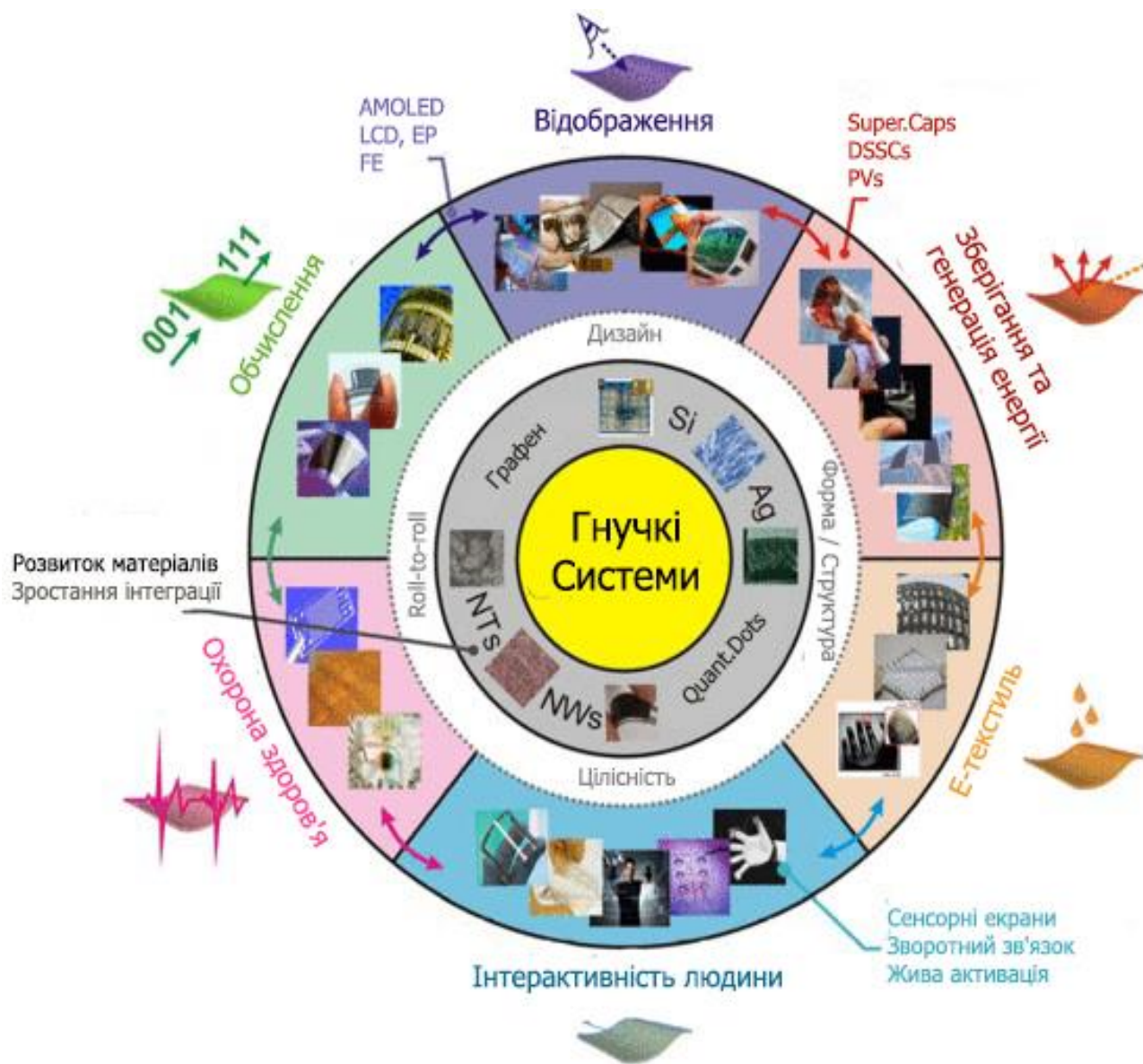


Рис. 1.2. Схематичне зображення систем гнучкої електроніки [14]

1.1.1 Матеріали гнучкої електроніки

Фундаментальні властивості тонкоплівкових матеріалів, а також якість різних інтерфейсів пристроїв призводять до обмежених характеристик пристрою [15]. Незважаючи на те, що бажано використовувати тонкоплівкові матеріали з максимальною мобільністю, питання витрат та масштабованості грають важливу роль у виборі матеріалів. Наприклад, два найпоширеніших матеріала – це полікристалічний кремній (полі – Si) та напівпровідникові оксиди металів (MO_x). В даний час MO_x є дорогими через глобальну локалізацію та дефіцит індію. Незважаючи на наявність недорогого Si, процес виготовлення також досить дорогий завдяки вимогам обробки постпозиції у великих областях застосування [16].

Застосування нанониток, вуглецевих нанотрубок, графену та інших наноматеріалів у напівпровідникових тонких плівках дозволяє поширювати їх властивості. Пристрої, що базуються на таких композитах, як правило, демонструють підвищену електричну продуктивність, наприклад, підвищену рухливість польових ефектів та підпорогові нахили, що призводить до зниження робочих напруг, що є важливим фактором у конструкції малої потужності. Більше того, складна природа тонких плівок впливає на їх механічні властивості, а також на довговічність TFT при механічному навантаженні: необхідна вимога до дійсно гнучкої електроніки [17].

Останнім часом нові методи виготовлення дозволили TFT використовувати потенціал 1-D напівпровідників, таких як CNT та NW, а також 2-D напівпровідників та діелектриків, таких як графен і дисульфід молібдену (MoS_2) та гексагональних моношарів з нітриду бору (h-BN) .

Ці пристрої демонструють чудові властивості, хоча подальший прогрес є критичним, перш ніж вони можуть бути включені у гнучких схемах та інтегрованих системах [17].

1.1.2 Гнучкі електричні елементи

Прогрес у технології тонкоплівкових батарей використовує наноструктури для підвищення щільності, а гібридний суперконденсатор дозволив збільшити густину енергії та потужності. Легкі підкладки, такі як поліетилентерефталат (ПЕТ) та папір, призвели до зниження ваги акумулятора. Крім того, останні події в структурі батарей призвели до їх бездоганної інтеграції в карбонові волокна в електричних транспортних засобах, що призводить до значної загальної ваги та економії місця. Гнучка технологія тонкоплівкових технологій є особливо корисною у цьому випадку, оскільки це дозволяє виготовляти акумулятори у відповідних формах за відносно низькими витратами [18].

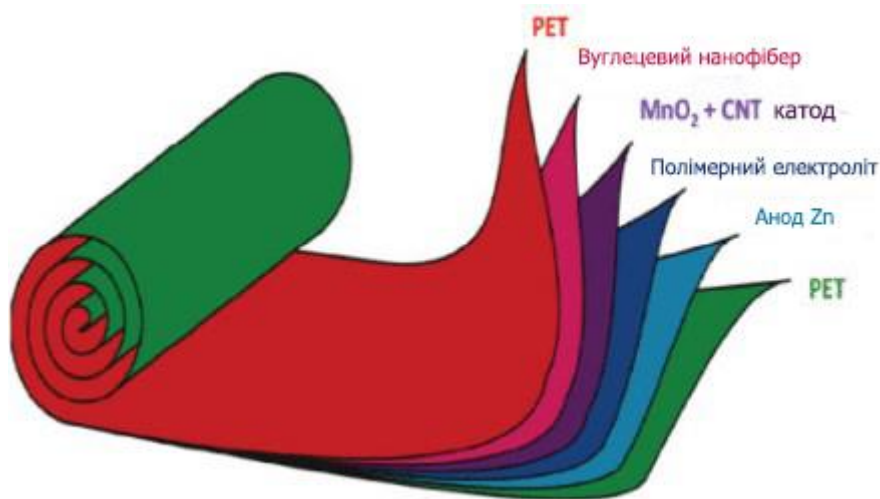


Рис. 1.3. Схематичне зображення структури гнучкого акумулятора [19]

Гнучкі тонкоплівкові технології можуть також знаходити застосування в дорожніх знаках та маркуванні. Інтелектуальні дороги будуть розроблені з метою покращення безпеки дорожнього руху, зниження завантаженості доріг та енергоспоживання [20].

Великий попит на портативну енергію надходить від споживчих електронних пристроїв, таких як маркування радіочастотної

ідентифікації RFID, мобільні телефони, ноутбуки, нетбуки, планшети та портативні музичні програвачі. Батареї, та електрохімічні конденсатори останнім часом, були єдиним рішенням. В останні роки було досягнуто багато досягнень у технологічний розвиток акумуляторів, причому дослідження спрямовані переважно на два потоки. Один з них був спрямований на: збільшення густини енергії та енергії за допомогою нової хімії; нові матеріали або оптимізація поточних систем; зменшення відношення неактивних до активних компонентів для підвищення густини енергії; підвищення ефективності конверсії та покращення можливостей; а також підвищення безпеки та екологічних характеристик [20].

З іншого боку, велика увага приділяється розробці альтернативних форм-факторів, що відходять від твердого компонентного компонента до тонких, гнучких та навіть розтяжних та прозорих пристроїв [20].

Поява нанотехнологій сприяє розвитку конверсії та зберігання енергії. Наприклад, графен уже експлуатується для різних енергетичних застосувань, таких як батареї, суперконденсатори, розщеплення води. Великий доступний коефіцієнт поверхні до об'єму графена робить його дуже привабливим для таких пристроїв завдяки їх високій стабільності в електрохімічних середовищах, механічній гнучкості, відмінному електронному та оптичним властивостям [21].

Незважаючи на те, що використання графена в енергетичних областях тільки розпочато, останні результати є перспективними. Наприклад, суперконденсатори на основі графена перевершують ті, що базуються на активованому вугіллі, при цьому густина енергії порівнянна з комерційно доступними батареями [22].

Крім того, графен може бути використаний для нового покоління енергозберігаючих наноустройств, таких як нанооптичні електромеханічні системи (NOEMS). Вони можуть отримати доступ до джерел енергії, що виникають на наномасштабі, перетворюючи енергію з джерел навколишнього

середовища, таких як навколишній шум або електромагнітне випромінювання, до механічних коливань [23].

Цей маршрут відкриває багато можливостей, де деформація пристрою дозволяє трансформувати та забезпечити нові взаємодії з користувачем, наприклад, в Nokia Morph Concept (рис 1.4). Отже, джерело енергії має важливе значення. Вони відкривають панораму для багатьох нових можливостей, включаючи інтеграцію гнучких тонких плівок в енергію [23].

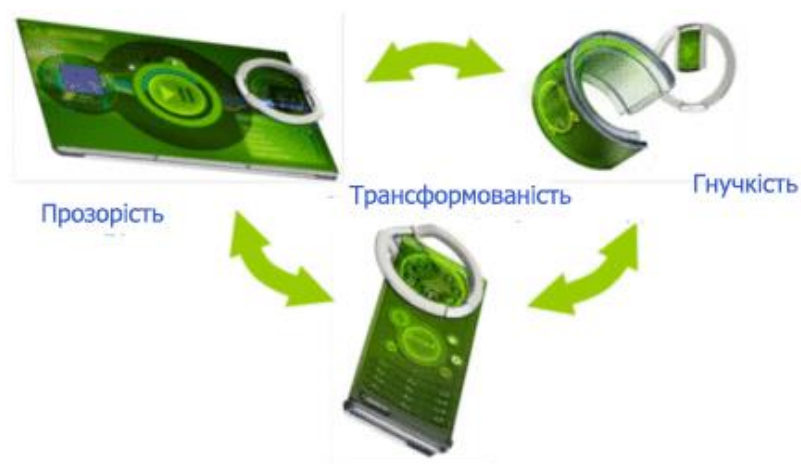


Рис. 1.4. Зображення мобільного телефону Morph [24]



Рис. 1.5. Зображення гнучких смартфонів " Philips " [25]

Зростаюча кількість мініатюрних інтегрованих пристроїв збільшила загальну потужність поточних мобільних телефонів, головним чином завдяки потужності обробки, дисплеям та інтерфейсам РЧ. Майбутні пристрої можуть вимагати постійно зростаючої потужності та тривалого періоду очікування. Звичайні батареї наразі не забезпечують достатню щільність енергії для задоволення цих вимог, як це раніше було зазначено в попередньо. Більш того, потреба в автономних пристроях, призначених для тривалої роботи без підключення електроживлення, швидко зростає. Таким чином, збирання та зберігання енергії є однією з проблем, з якими стикаються виробники мобільних пристроїв [26].

Сьогодні літєві батареї широко використовуються. Необхідність все більш струнких пристроїв веде перехід до суперконденсаторів (рис. 6).

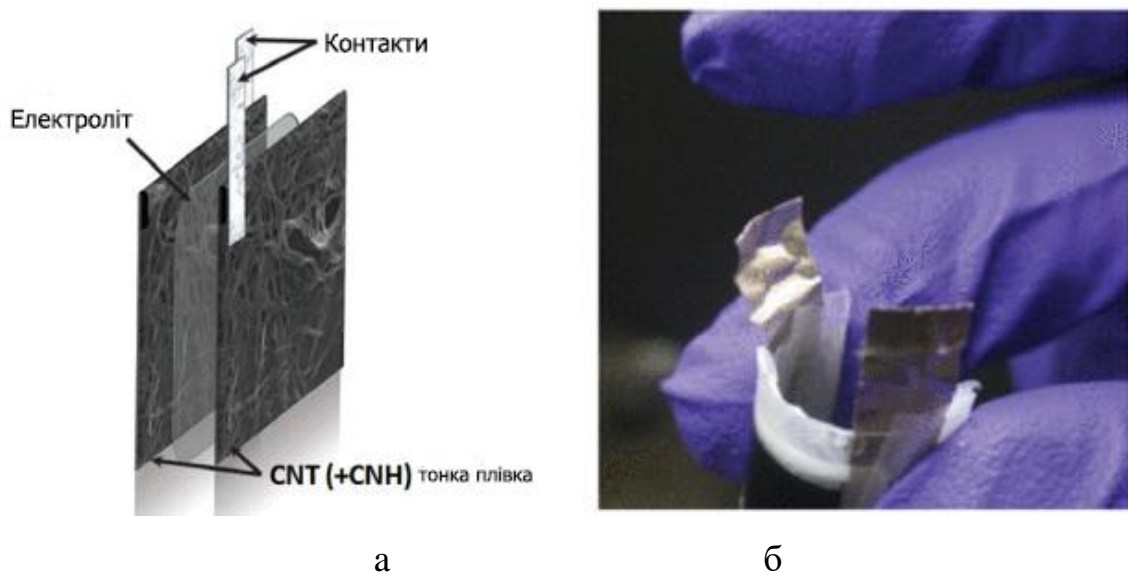


Рис. 1.6. Схема (а) зовнішній вигляд (б) гнучкого суперконденсатора [27]

Велика увага приділяється до розрахунку та виміру тензочутливості. Загалом технології пов'язані з гнучкою електронікою зараз дуже стрімко розвиваються і їм приділяють та покладають великі надії.

1.2 Дослідження стабільності електрофізичних властивостей елементів електроніки

1.2.1 Тензоефект

Тензоефект – це властивість матеріала при деформації змінювати свій опір. Вважається, що опір провідника або напівпровідника залежить (при незмінному об’ємі) від його довжини [28].

Елементи, у яких є зміна деформації в сигнал, реалізується за допомогою тензорезисторів. Спосіб вимірювання деформації за допомогою тензорезистора є те, що при деформації змінюється електричний опір. Проаналізувавши це явище з точки процесів електронного розсіювання, є два можливі випадки : масивний монокристалічний або плівковий високодисперсний тензорезистор. У першому випадку основний внесок у тензоефект дає зміна середня довжина вільного пробігу електронів (СДВП) за рахунок деформації фононного спектра та зміна геометричних розмірів резистора. Якщо довжина резистора l , площа перерізу $S = a \cdot d$ (a – ширина, d – товщина), то електричний опір резистора пов’язаний з його питомим опором (ρ) співвідношенням :

$$R = \rho \frac{l}{a \times d}, \quad (1.1)$$

Узявши диференціал від логарифма лівої і правої частин, отримуємо

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{dd}{d}, \quad (1.2)$$

або після винесення за дужки деформації $\frac{dl}{l}$ отримуємо

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \cdot \frac{dl}{l}, \quad (1.3)$$

де $\mu = -\frac{da/a}{dl/l} = -\frac{dd/d}{dl/l}$ коефіцієнт Пуасона для матеріалу тензорезистора.

Якщо тензорезистор перебуває у вільному стані, то із (1.3) отримуємо

$$K = \frac{dR}{Rd\varepsilon} = m + 1 + 2\mu, \quad (1.4)$$

де K і m – коефіцієнт тензочутливості, виражений через R або ρ відповідно [28].

Необхідно відмітити, що у практичній і теоретичній тензометрії прийняті різні позначення коефіцієнтів K , m та деяких інших параметрів. Зокрема, в теорії тензочутливості розрізняють два види коефіцієнтів повздовжньої (γ_l) та поперечної (γ_t) тензочутливості; якщо ці величини виразити через питомий опір, то позначають γ^p і γ^r . Необхідно мати на увазі, що в теорії тензоефекту вивчаються вільні тензорезистори, тому розглядають деформації ε_l і ε_t (у практичній тензометрії розглядають окремо деформацію конструкції (ε) і чутливого елемента (ε_c)). Ситуація змінилася при переході до виготовлення чутливих елементів у вигляді тонкоплівкової системи, оскільки стало не порівняним до деяких параметрів (наприклад, у коефіцієнті передачі інформації $K_{пер}$) [28].

У випадку, коли масивний тензорезистор приєднаний до конструкції, співвідношення (1.4) необхідно записати у вигляді:

$$\frac{dR}{R} = K_{npt} \frac{dl}{l}, \quad (1.5)$$

де $K_{npt} = 1 + 2\mu + m$ – коефіцієнт перетворення деформації конструкції (ε) за допомогою тензорезистора.

Між коефіцієнтами K і K_{npt} існує зв'язок

$$K = K_{пер.ч} \cdot K_{npt}, \quad (1.6)$$

то $K = K_{npt}$ лише за умови, що коефіцієнт передачі деформації ε зв'язуючою речовиною до чутливого елемента $K_{пер.ч}$ ($K_{пер.ч} = \varepsilon_c / \varepsilon$, де ε_c – істинна деформація чутливого елемента дорівнює одиниці [28]).

Якщо чутливий елемент виготовлений у вигляді полікристалічної плівкової системи (одно чи багатосарової), то зміна СДВП, як і у випадку ТКО (співвідношення (1.6)), відбувається не тільки за рахунок деформаційних змін фононного спектра, а й коефіцієнтів r , p і у випадку багатосарової плівки, величини Q [28].

1.2.2 Методики вимірювання тензоефекту

Будемо користуватися наступною методикою вимірювання деформації на згин. Для визначення коефіцієнтів поздовжньої та поперечної тензочутливості можна скористатись наступним співвідношенням:

$$\frac{\Delta R}{R_n} = \gamma_l \varepsilon_l \text{ та } \frac{\Delta R}{R_n} = \gamma_t \varepsilon_t.$$

Звідси можна побудувати залежність зміни опору зразка в процесі деформації в координатах $\frac{\Delta R}{R_n}$ від ε , то тангенс кута нахилу цієї залежності дасть величину γ_i або γ_t .

Необхідно відмітити, що деформаційна залежність має лінійний характер лише в певних інтервалах деформації. Тому при визначенні коефіцієнтів тензочутливості необхідно розглядати лінійні ділянки або проводити усереднення кривої.

Більш складною проблемою в даному випадку є визначення величини деформації. Можливі два способи деформації: метод згину та метод розтягу.

При першому способі деформації і зазначеній конфігурації контактів $\varepsilon_l = \varepsilon_t$.

Виходячи із геометрії (рис. 1.7) можна знайти співвідношення для цієї деформації:

$$\varepsilon_l = \frac{AB - A_0B_0}{A_0B_0} = \frac{R - R_0}{R_0} = \frac{D/2}{R_0}, \quad (1.7)$$

$$(R_0 - h)^2 + R_0^2 = R_0^2 = \frac{h^2 + l_n^2}{2h}, \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_l = \frac{D/2}{R_0} = \frac{D \cdot 2}{l_n^2} \quad (1.9)$$

У другому випадку необхідно незалежно обчислювати деформації як $\varepsilon_l = \Delta l / l_n$ і $\varepsilon_t = \Delta a / a_n$, але на практиці достатньо точності $\varepsilon_t = |\mu_s \cdot \varepsilon_l|$.

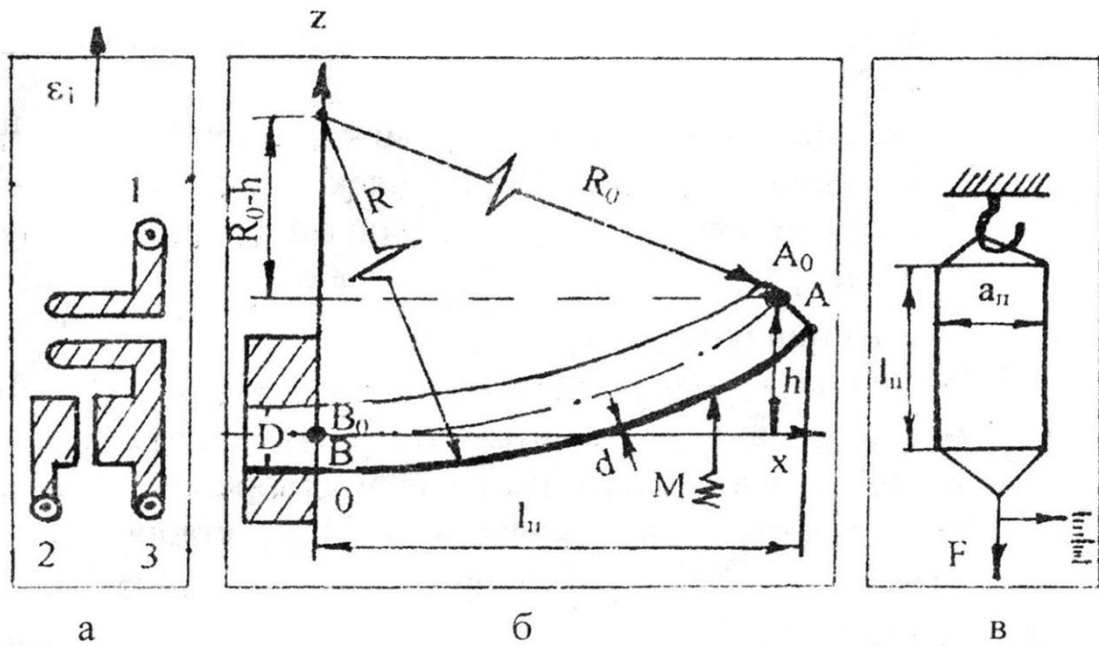


Рис. 1.7. Схема контактів (а) для вимірювання повздовжньої та поперечного опорів і схема деформації плівки на згин (б) та розтяг (в) : A_0B_0 – слід нейтральної поверхні, R – її радіус, Ox – базова лінія, h – максимальний прогин; D і d – товщина підкладки і плівки ; l і a – початкові довжина та ширина плівки; M – мікрогвинт ; F – сила. Із роботи [28]

РОЗДІЛ 2

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Методика дослідження тонкоплівкових зразків

2.1.1 Метод електронно-променевого випаровування

Метод електронно-променевого випаровування – це спосіб використання електронних пучків, утворених з джерела електронів у вакуумі, щоб опромінювати матеріал для випаровування, випаровуючий матеріал утворює тонку плівку на підкладці.

Цей пристрій складається з двох основних частин; джерело електронів (катод), яке розміщується у вакуумному випарному пристрої і генерує електрони, прискорює електронний промінь; і тигель (анод), який тримає матеріал, що випаровується. Між катодом та анодом прикладається висока напруга, яка прискорює електрони, які генерує катод. Електрони бомбардують матеріал, він розпилюється та осаджується на підкладку.

Характеристика методу електронно-променевого випаровування. Оскільки джерелом тепла є кінетична енергія електронів, матеріал швидко нагрівається та безпосередньо випаровується. Щільність електроенергії електронного пучка велика, і можливе випаровування різних матеріалів, включаючи метали високої температури плавлення, а також сполуки оксидів та сублимовані речовини.

Електронний промінь можна точно контролювати за допомогою електричних та магнітних полів. Електронний промінь можна сканувати на високій швидкості в межах заданої зони, і пучок може бути опромінений оптимальною електричною щільністю матеріалу, що випаровується.

Електронні промені відхиляються на 270 градусів або 180 градусів і опромінюються на випарний матеріал. Матеріал знаходиться у високому вакуумі

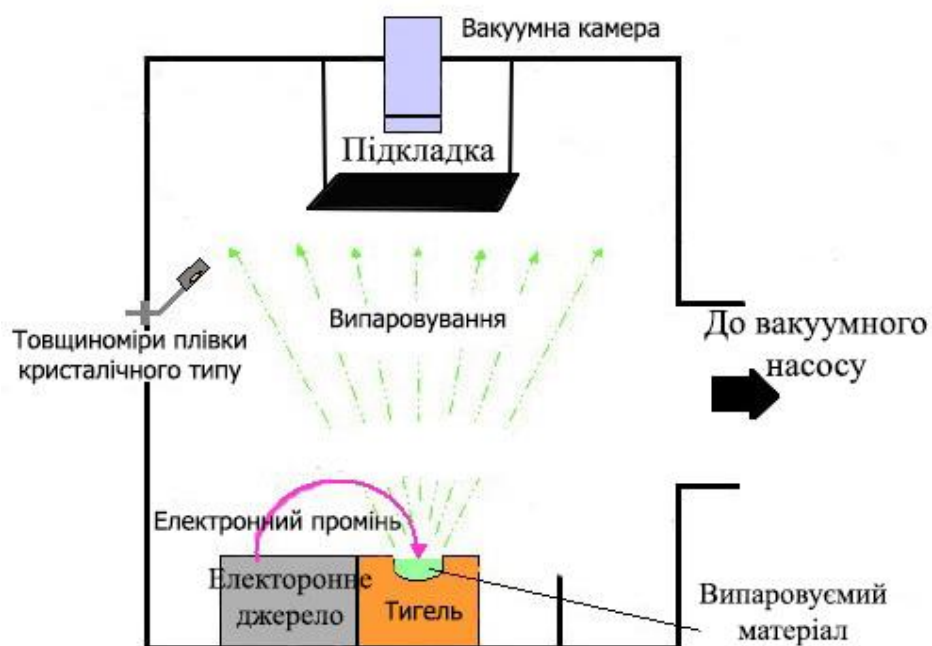


Рис. 2.1. Зображення структури пристрою випаровування електронного пучка [29]

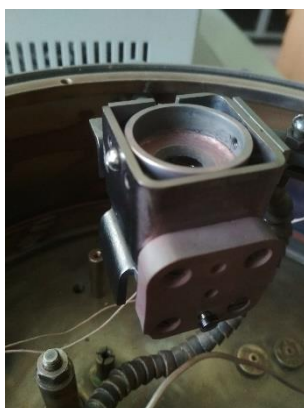


Рис. 2.2. Зображення електронно-променевої гармати

(10^{-3} Па до 10^{-4} Па). Використовуючи декілька тиглів та джерел випаровування, можна зробити багат шарову плівку в одному циклі.

2.1.2 Метод кварцового резонатора

Найбільш поширеним методом контролю процесу напилення в сучасних промислових установках для отримання тонких плівок став метод “кварцового резонатора”, який вирізняється серед інших універсальністю та простотою проведення необхідних вимірів. Ним можна вимірювати як товщини плівок, так і швидкість нарощування плівок різних матеріалів – металів, діелектриків, напівпровідників. Перевага його полягає також у можливості контролю товщини та швидкості нарощування безпосередньо в процесі напилення. В основі методу лежить вимірювання відхилення резонансної частоти кварцового кристалічного резонатора, зумовленого зміною маси кварцової пластини. При збільшенні маси пластини механічного резонатора, подібно до кристалу кварца, внаслідок нанесення речовини на його поверхню, резонансна частота зміщується. Можна показати, що

$$j_n^2 = j_{0n}^2 \frac{1}{1 + \frac{K_n \times 2m}{\rho A t}}, \quad (2.1)$$

де j_n та j_{0n} – резонансні частоти збуреного та незбуреного кристалу; t – товщина пластинки; ρ – густина покриття; m – повна маса, що нанесена на площу A ;

K_m – постійна; n – порядок обертогу. Таким чином,

$$\frac{\Delta j}{j_{0n}} = - \frac{K_m}{\rho A t}, \quad (2.2)$$

і для основної частоти $n = 1$ маємо

$$\frac{m}{A} = - \frac{\rho t \Delta j}{K j}, \quad (2.3)$$

Введемо постійну N , що визначається як $N = j \cdot t$,

$$\Delta j = -\frac{j}{t} \times \frac{K}{\rho} \times \frac{m}{A} = \frac{A^2 K m}{N \rho A} = C_j \frac{m}{A}. \quad (2.4)$$

Тут C_j – постійна, що називається “масовою чутливістю” кристалу. Знак мінус показує, що приріст маси викликає зменшення резонансної частоти. На практиці для кожного кристалу кварцу величину C_j визначають експериментально. Однак є інша можливість визначити залежність зсуву частоти від товщини плівки. Запишемо залежність між зсувом частоти і зміною маси кварцевого резонатора:

$$\frac{\Delta j}{j_0} = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2.5)$$

Якщо маса напиленої плівки Δm , її густина ρ , площа, яку займає плівка на кварцовій пластині S , то можна записати:

$$h = \frac{\Delta m}{\rho S} \text{ або } h = \frac{m_0}{j_0 S \rho} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \Delta j. \quad (2.6)$$

На практиці зручно представити залежність товщини не від зсуву частоти, а від вимірюваної частоти кварцевого датчика. Оскільки $\Delta j = j_0 - j$, то після перетворень маємо:

$$h = \frac{m_0}{S \rho} - \frac{m_0}{j_0 S \rho} \cdot j. \quad (2.7)$$

Отже, залежність $h = \phi(t)$ є прямою з кутовим коефіцієнтом $\frac{m_0}{j_0 S \rho}$.

Пропорційність між зсувом частоти та масою покриття зберігається при зміщенні частоти Δj до 5% від основного значення. Точність методу визначається точністю вимірювання частоти та зсуву частоти і при застосуванні сучасної радіоапаратури може досягти часток процента. Практично точність вимірювань лімітується точністю визначення постійної C_j . Однак кварцові кристали дуже чутливі до зміни температури, що є основним джерелом помилок при визначенні товщини. Крім цього, певне значення має адгезія до кварцу матеріалу, що напилюється, оскільки при високих ($j \sim 10^7$ Гц) частотах

відбувається самоочищення поверхні кварцової пластинки від бруду та сторонніх частинок. Слід відзначити також, що густина плівок, знання якої необхідне для визначення товщини h , може відрізнятися від значення, властивого масивним зразкам. Це особливо проявляється при малих товщинах (порядку десятків ангстрем), де густина плівки – функція товщини.

Сьогодні більше уваги приділяється дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів таких як напівпровідникові чи масивні матеріали. Це обумовлено рядом важливих властивостей цієї групи матеріалів. По – перше, вони мають високу стабільність до зміни температури; по – друге, хоча і поступаються напівпровідниковим у величинах КТ, але поряд з цим у значній мірі випереджають за даним параметром масивні та товстоплівкові матеріали. В подальшому ці плівкові матеріали можуть використовуватися при розробці та створенні надчутливих тензодатчиків мікроелектронної апаратури [30].

Для вирішення поставленої задачі була також використана автоматизована система дослідження тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів. Ця система мала механізм фіксації та обробки даних з використанням комп'ютера.

Управління ходом експерименту та обробка результатів (побудова графіків, таблиць) здійснюється за допомогою програмного забезпечення розробленого у середовищі LabVIEW з використанням модуля машинного зору LabVIEW Vision Development Module [30].

На програмному рівні обробка зображень відбувається за допомогою функцій LabVIEW. Перша задає параметри на знаходження зразка (IMAQ Setup Match Pattern), а інша знаходить по зразку поділки (IMAQ Match Pattern) і далі за допомогою стандартних функцій визначаються їх координати. Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту наведено на рис. 2.3. При дослідженні тензоефекту підкладка із системою контактів і зразком одним кінцем фіксувалася консольно, а другим – кріпилася до штоку мікрогвинта (ціна поділки – 0,02 мм), який через редуктор приєднується до електродвигуна, напрям обертання якого задається сигналом з релейного модуля ADAM-4068.

Web-камера розміщується біля мікрогвинта і фіксує його зображення із частотою 10 кадрів/с. Автоматизована система дозволяє вивчати тензоефект у динамічному або статичному режимі зі швидкістю деформації від 0 до 0,1 %/с у інтервалах пружної ($\Delta\varepsilon_l = 0 - 1\%$) або пластичної деформації ($\Delta\varepsilon_l = 1 - 2\%$) зразків. Деформація зразків у інтервалі $\Delta\varepsilon_{l2}$ здійснювалася лише після VII-го деформаційного циклу в інтервалі $\Delta\varepsilon_l$ [30].

2.1.3 Методика вимірювання деформації на розтяг

Поміщаємо підкладку в конструкцію для виміру деформації розтягу методом навантаження. Потім закріплюємо конструкцію в ВУП – 5М та одежуємо зразок шляхом термічного випаровування на полістиролову підкладку, як це показано на рис. 2.5. У процесі конденсації плівки визначаємо товщину плівки методом кварцевого резонатора. По градуйованій шкалі на мікрогвинті заміряємо значення деформацій. Отримані дані деформацій записуються в таблицю. За отриманими даними будуємо графік залежності відносної зміни опору від деформації. Розраховуємо коефіцієнт тензочутливості.

2.1.4 Методика вимірювання деформації на згин

На алюмінієві накладки фіксуємо полістиролову підкладку, на яку в подальшому будуть напилені мідні контактні майданчики та досліджуваний зразок. Розміри полістиролової пластини наведені на рис. 2.6.

Отриману підкладку поміщаємо у вакуумну камеру, попередньо очистивши спиртом від залишкових забруднень для забезпечення кращої адгезії плівок Cu та досліджуваного зразка з підкладкою. Методом термічного випаровування наносимо мідні контактні майданчики. В одному циклі можна зконденсувати Cu на декілька підготовлених підкладок (до 10 шт). Товщина мідних контактів становить до 200 нм.

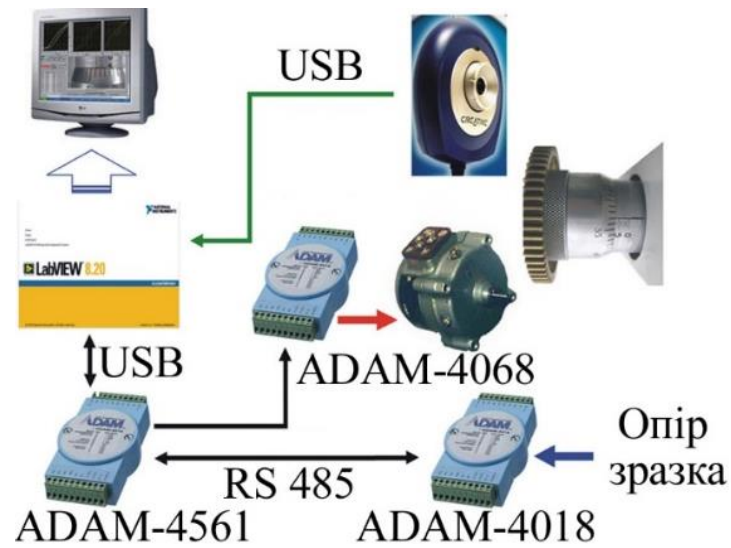


Рис. 2.3. Структурна схема автоматизованої системи дослідження тензоефекту [30]

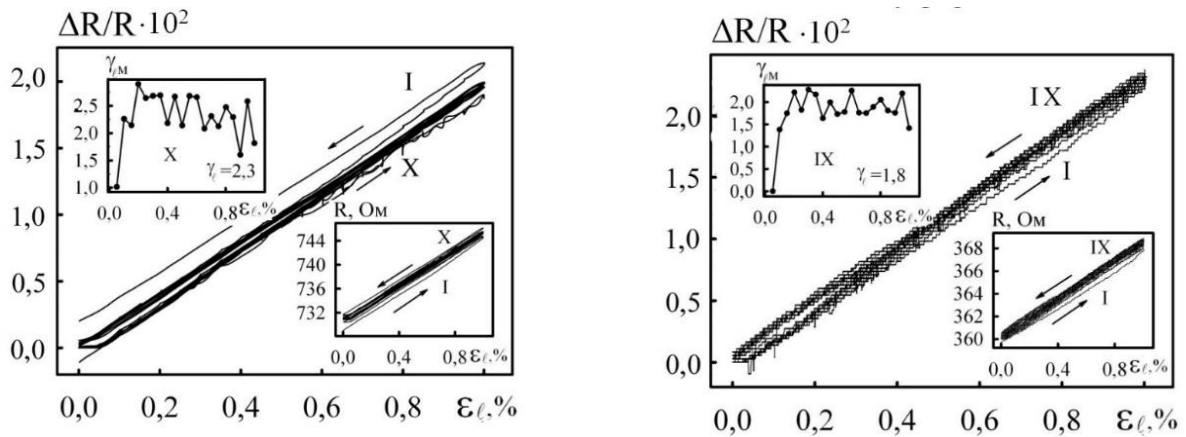


Рис. 2.4. Залежність $\Delta R/R_\pi$, R і $\gamma_{\ell M}$ від ϵ_ℓ для плівки Pt(15)/Π (а) та Pt(25)/Π (б) у інтервалі деформації $\Delta \epsilon_\ell = 0 - 1\%$. I-X – номери деформаційних циклів „навантаження – зняття навантаження” [30]

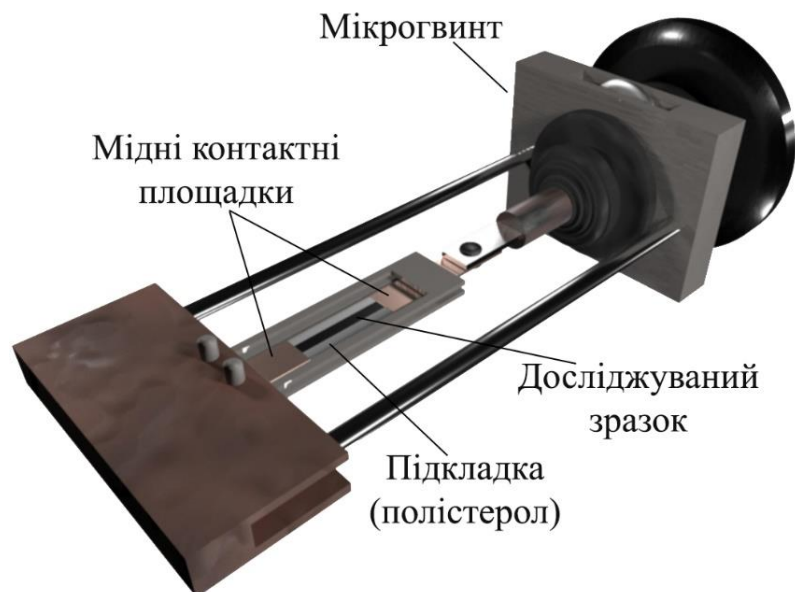


Рис. 2.5. Схематичне зображення конструкції для дослідженні деформації методом навантаження (розтягу)

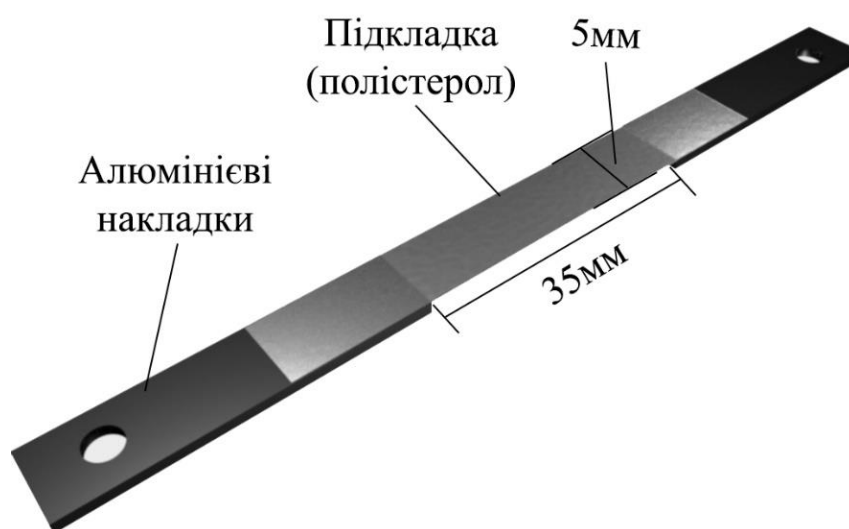


Рис. 2.6. Схематичне зображення розмірів досліджуваного зразка

Підкладку фіксуємо в конструкції для вимірювання деформації. Через спеціальну маску конденсуємо одно- або багат шарову плівку методом електронно-променевого випарування. Товщину шарів контролюємо методом кварцового резонатора. Після термостабілізації (до 1 години) починаємо процес дослідження тездорезистивних властивостей отриманого зразка при деформації на згин (рис. 2.9). Значення деформації визначаємо за допомогою шкали мікрогвинта, помноживши на відповідний коефіцієнт. Значення деформації розраховуємо за формулою (1.3) (рис.2.10). Зміну опору вимірюємо за допомогою цифрового пристрою АРРА 109, який дозволяє записувати отримані значення в оперативну пам'ять та відправляти на персональний комп'ютер.

2.2 Апаратна частина системи контролю

Arduino – апаратна обчислювальна платформа, що складається з двох основних компонентів: плата вводу – виводу і середу розробки мовою Processing/Wiring. Arduino зручна для розробки електронних пристроїв як для новачків, так і для професіоналів. Ця платформа користується величезною популярністю в усьому світі через прості мови програмування, відкритої архітектури і програмного коду. Особливість даної платформи є те що вона програмується без використання програматорів через USB. За допомогою Arduino комп'ютер може вийти за рамки віртуального світу в фізичний, завдяки безлічі датчиків які можна підключити до плати. Датчики можуть отримувати інформацію про навколишнє середовище, а також управляти різними виконавчими пристроями. Може і взаємодіяти з програмним забезпеченням на комп'ютері (наприклад, Flash, Processing, MaxMSP).

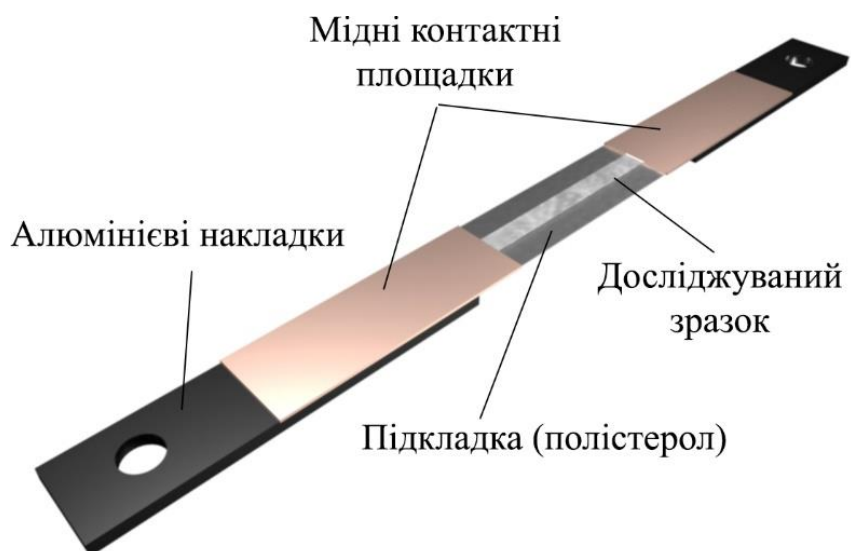


Рис. 2.7. Схематичне зображення складових досліджуваного зразка

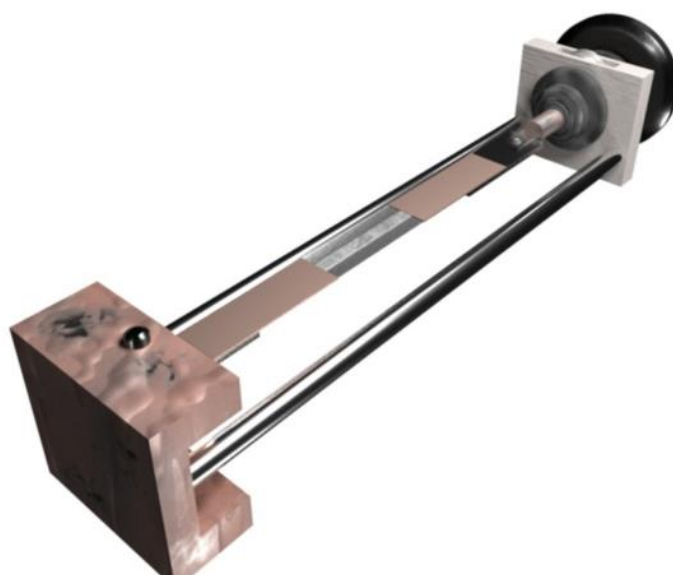


Рис. 2.8. Зображення конструкції досліджуваного зразка методом навантаження (згину)

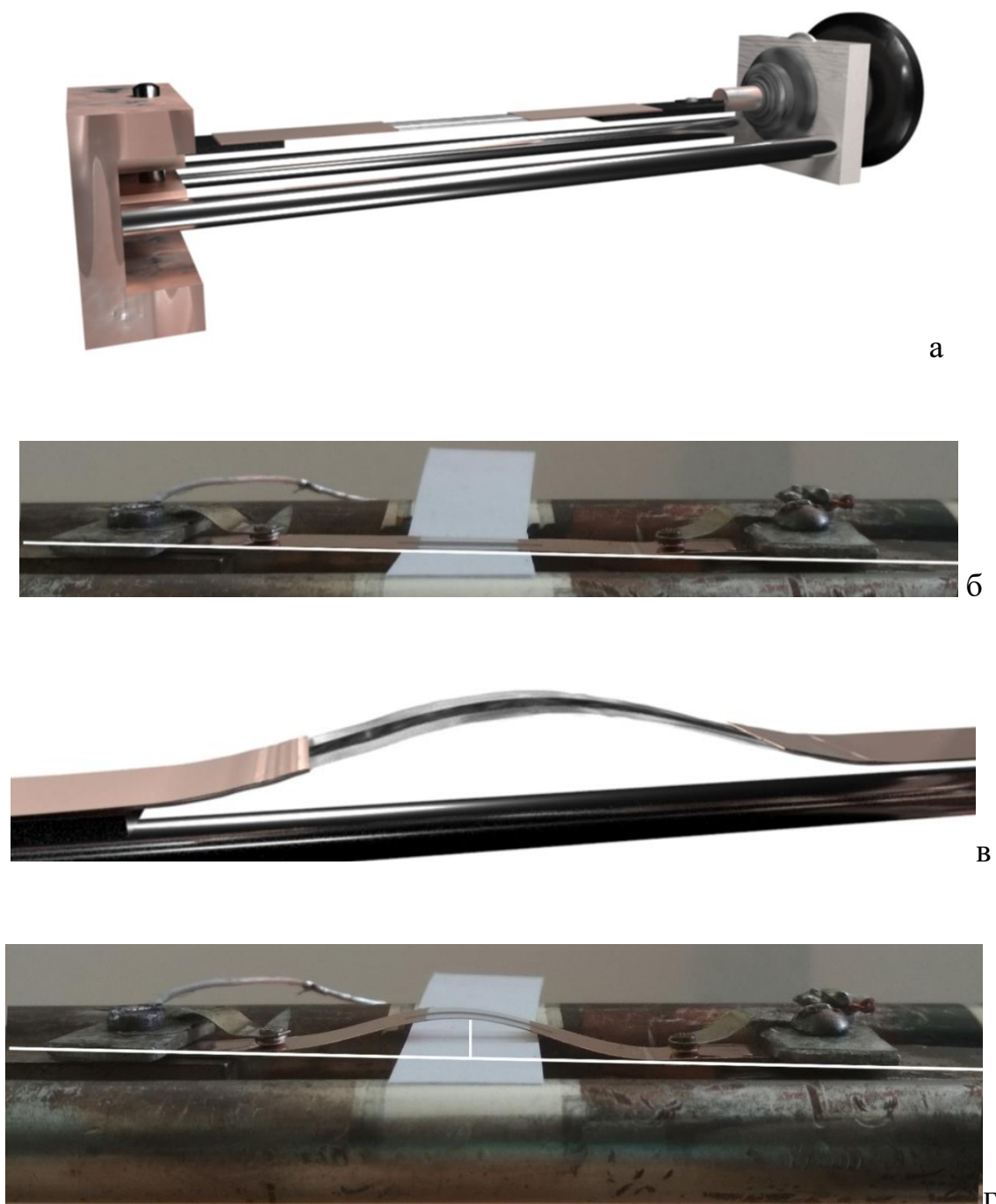


Рис. 2.9. Моделі (а, в) та зображення(б, г) зразка при дослідженні на згин:
а, б – без деформації;
в, г – при проміжній деформації

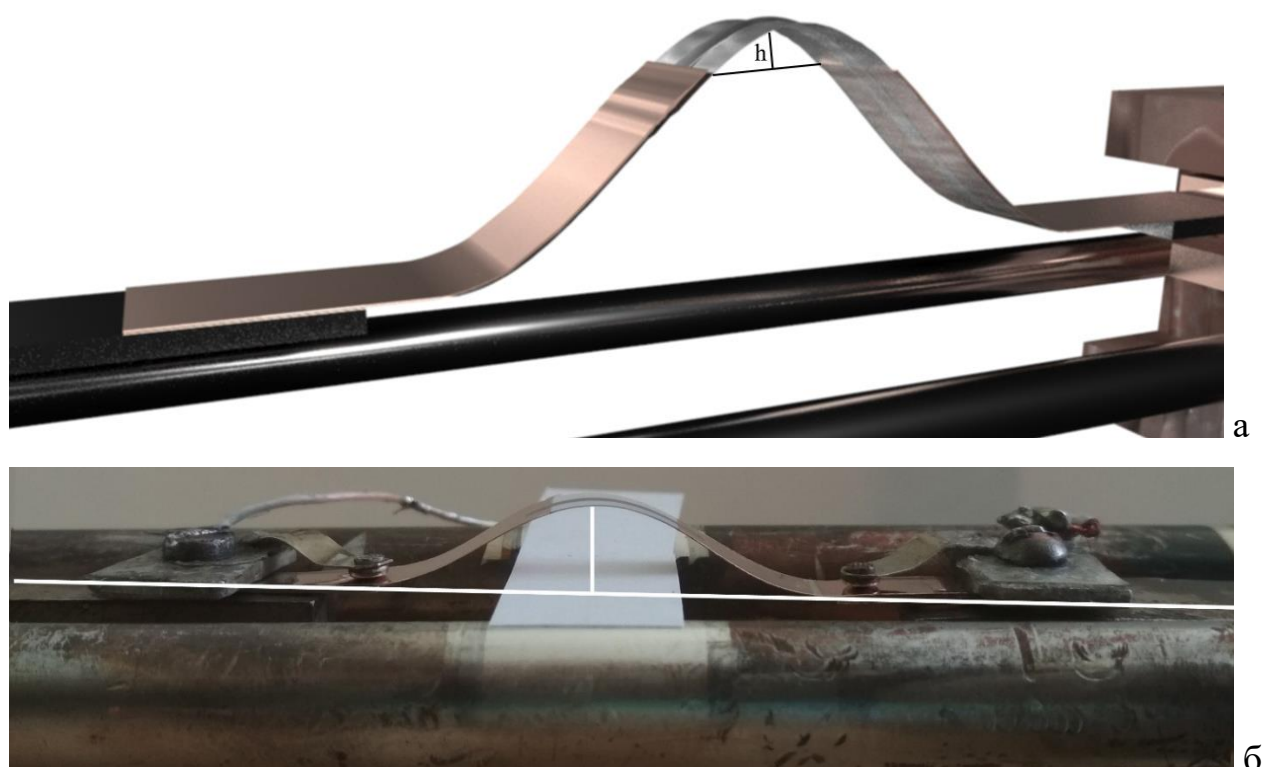


Рис. 2.10. Модель (а) та зображення (б) зразка при деформації на згин при максимальній деформації

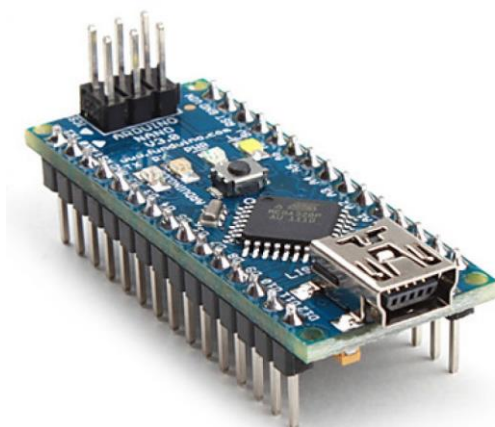


Рис. 2.11 Зображення апаратної обчислювальної платформи Arduino [31]

Плата Arduino складається з мікроконтролера і елементів обв'язки для програмування та інтеграції з іншими схемами. На багатьох платах так само є лінійний стабілізатор напруги. Тактирование здійснюється на частоті 16 або 8 МГц кварцовим резонатором (прилад, в якому пьезокристалічний ефект і явище механічного резонансу використовується для побудови (властивість коливальної системи, що визначає смугу резонансу і показує, у скільки разів запаси енергії в системі більше, ніж втрати енергії за один період коливань) резонансного елемента електронної схеми. В мікроконтролер попередньо прошивається завантажувач (програма відповідає за завантаження виконавчих файлів і запуск нових процесів) BootLoader, тому зовнішній програматор не потрібен. Плата Arduino містить інвертуючу схему для конвертації рівнів сигналів RS – 232 (Recommended Standart 232, фізичний рівень для асинхронного інтерфейсу) в рівні TTL (Транзисторно-транзисторна логіка-різновид цифрових логічних мікросхем, побудованих на основі біполярних транзисторів (трёхелектродний напівпровідниковий прилад і резисторів), і навпаки.

Інтегроване середовище розробки Arduino – це кросплатформений додаток на Java, що включає в себе редактор коду, компілятор і модуль передачі прошивки в плату. Мова програмування для Arduino дуже схожа на C++, доповнена деякими бібліотеками. Обробка програм здійснюється за допомогою препроцесора, а компілюється за допомогою AVR-GCC.

2.3 Вибір програмного забезпечення

LabVIEW – візуальна мова програмування для розробки власних програм користувача, дуже схожа з мовами C, або National Instruments LabWindows/CVI. Проте, LabVIEW відрізняється від цих програм в одному важливому відношенні. Інші системи програмування використовують текстово-орієнтовані мови для створення рядків вихідного коду програм, тоді як LabVIEW

використовує графічну мову програмування, під кодовою назвою "G", для створення програм у формі блок-схеми.

LabVIEW, подібно мовам C, є універсальною системою програмування з великими бібліотеками функцій для різних задач програмування. LabVIEW включає бібліотеки інструментів для : збору даних; обміну даними з пристроями по GPIB (Багатофункціональний Інтерфейс фірми HP); обміну даними з пристроями по стандарту RS-232; аналізу даних; представлення даних; зберігання оброблених даних на носіях різного типу.

LabVIEW також включає стандартні засоби автоматичного проектування програм, що дозволяють встановлювати контрольні точки і представляти у вигляді стендової моделі виконання програми, так, щоб бачити, як дані проходять через програму крок за кроком, для спрощення розуміння процесу виконання програми.

LabVIEW – універсальна система програмування, але також включає бібліотеки функцій і засоби проектування, розроблені винятково для збору даних і інструментів управління, обробки даних. Програми LabVIEW називаються віртуальними інструментами (VIs), тому що їх дії і зовнішній вигляд може імітувати реальні прилади. У той же час, VIs подібні функціям стандартних мов програмування. Разом з тим VIs мають ряд переваг перед функціям стандартних мов програмування:

VIs більш наочні, прості для конструювання вимірювальних модулів і взаємодії з оператором; внутрішня структура VIs для користувача є скритою з відомими входами і виходами, що спрощує застосування VIs і забезпечує автоматичну сумісність різних VIs.

VI складається з інтерактивного інтерфейсу користувача, діаграми проходження даних, яка служить вихідним текстом, і піктограми з'єднання (входи і виходи), яка дозволяє VI бути викликаними з VIs вищого рівня.

За наявності всіх цих властивостей, LabVIEW однозначно є засобом візуального модульного проектування. Можливий варіант розбиття алгоритму програми на ряд субалгоритмів, які в свою чергу також можна розбити ще раз,

до тих пір, поки складний алгоритм програми не перетвориться на ряд простих підзадач. Для виконання кожної підзадачі формується свій VI, а потім об'єднуючи ці VIs на іншій блок-схемі, розв'язується глобальна задача. У результаті основний VI містить сукупність subVIs, які є сукупностями функцій LabVIEW.

Відладка алгоритму набагато полегшується тим, що можна виконувати кожен subVI окремо від решти частини прикладної задачі. Крім того, багато subVIs низького рівня часто виконують типові дії.

2.4. Результати вимірювання

Для дослідження залежності зміни опору від деформації було взято три зразка (Cu) з різними товщинами, а саме 13 нм, 15 нм, 20 нм. На рис. 2.12 приведені зображення цих зразків. Проведені вимірювання величини h для кожного зразка у процесі трьох циклів вимірювання. На основі отриманих даних побудовано деформаційні залежності (рис. 2.13 – 2.14).

2.5 Інформаційна система контролю стабільності електрофізичних властивостей елементів гнучкої електроніки

Для підвищення достовірності отриманих результатів експериментальних досліджень тензоефекту у тонких плівках нами був розроблений програмно-апаратний комплекс, що дозволяє виконувати вимірювання зміни опору при деформації зразків протягом великої кількості циклів навантаження-зняття навантаження за наперед заданим сценарієм. Для реалізації поставленої задачі було використано деформаційну машинку на базі мікрогвинта, яка приводиться в дію за допомогою асинхронного двигуна D-219П1 (рис. 2.16 а). Всі складові системи представлено на рис. 2.15 -2.19.

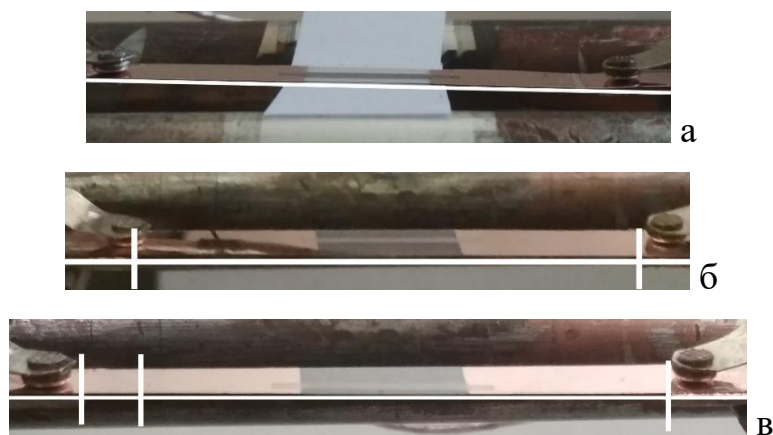


Рис. 2.12. Зображення досліджуваних зразків (а) 13 нм (б) 15 нм (в) 20 нм

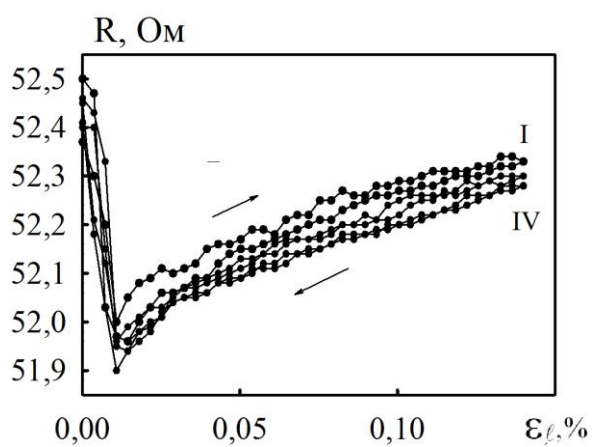


Рис. 2.13. Графік залежності опору від деформації на згин зразка Cu(20 нм)/Π

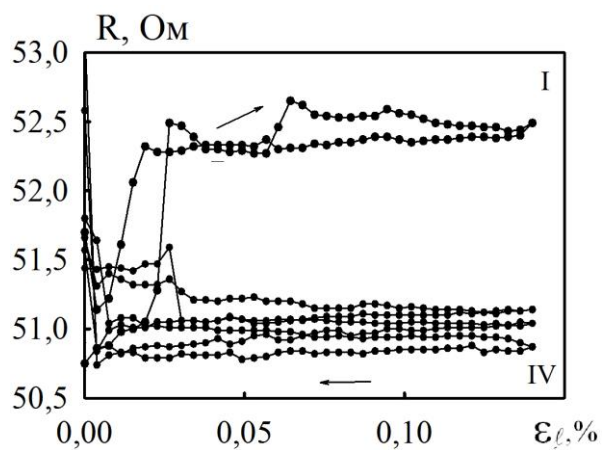


Рис. 2.14. Графік залежності опору від деформації на згин зразка Cu(10 нм)/Π

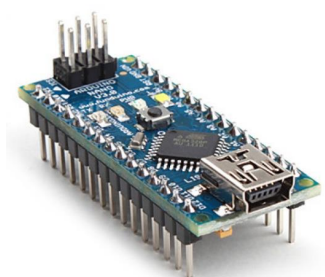


а



б

Рис. 2.15. Зображення асинхронного двигуна (D-219П1) (із [32]) (а) та зображення енкодера (із [33]) (б)



а



б

Рис. 2.16. Зображення (а) платформа Arduino Nano [31] (б) релейний модуль [34]

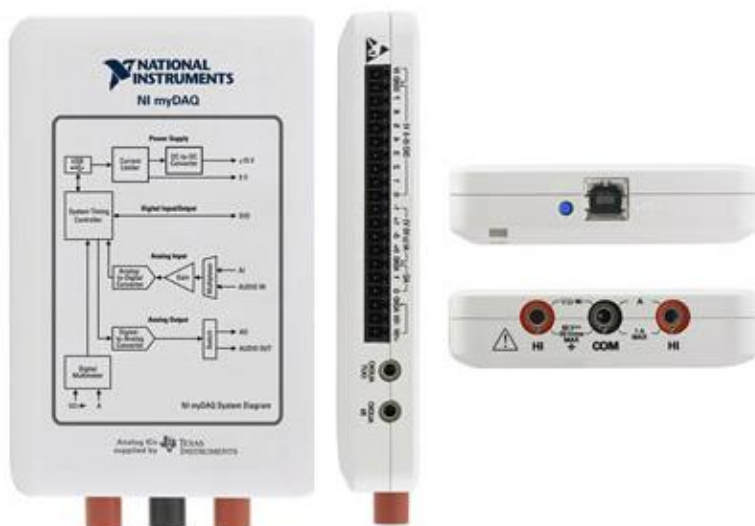


Рис. 2.17. Зображення універсального модулю збору даних NI MyDAQ [35]

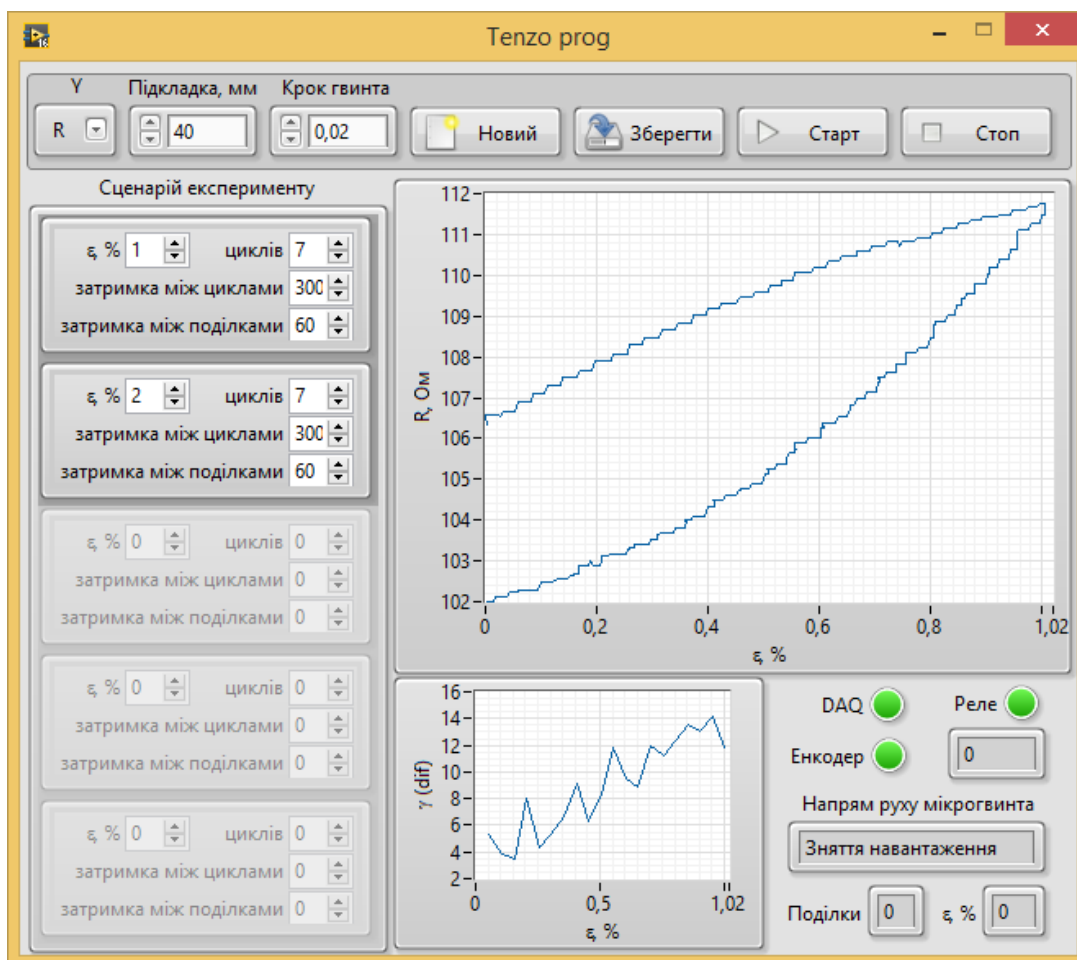


Рис. 2.18. Зображення інтерфейсу керування експериментом розробленого у середовищі LabVIEW



Рис. 2.19. Зображення загальної схеми інформаційної система контролю для дослідження тензорезистивних властивостей тонких плівок

Контроль положення мікрогвинта в процесі деформації здійснювався за допомогою інкрементального енкодера власної конструкції. Енкодер (рис.2.15 б) конструктивно виконаний із зведеного оптотранзистора та світлодіода, між якими розміщується зубчате колесо.

Обробивши вихідні імпульси оптотранзисторів можна визначити кут повороту та напрямок обертання зубчатого колеса. Для реалізації обробки імпульсів з енкодера було використано платформу Arduino Nano (рис. 2.16 а) на базі мікроконтролера AVR ATmega 328P. Також Arduino здійснює керування приводом двигуна за допомогою під'єданого до нього блоку електромеханічних реле (рис. 2.16 б).

Для забезпечення високої точності вимірювання опору нами було використано універсальний модуль збору даних NI MyDAQ (рис. 2.17) із двохканальним 16-бітним аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

Підвищення перешкодозахищеності і зменшення втрат у вимірювальній схемі досягається використанням чотирьохточкової схеми вимірювання опору, за якої відбувається не безпосереднє вимірювання опору а падіння напруги і струм що проходить через зразок. Керування експериментом здійснювалось за допомогою комп'ютера із використанням програмного забезпечення (ПЗ) розробленого у середовищі LabVIEW (рис. 2.18).

На апаратному рівні програма забезпечує зв'язок із модулем збору даних NI MyDAQ та Arduino. Архітектурно ПЗ побудована із використанням асинхронного кінцевого автомата на базі черги (рис. 2.19), що дозволяє виконувати роботу із апаратним забезпеченням і обробку даних у паралельних потоках і унеможлиблює втрату інформації в процесі збору даних. Інтерфейс програми забезпечує написання так званого сценарію експерименту: є можливість вказати кількість деформаційних циклів, інтервал деформації, затримку між циклами та інші технологічні параметри. На панелі розміщені графіки інтегрального та диференціального коефіцієнтів тензочутливості досліджуваного зразка та набір кнопок керування (початок та закінчення вимірювання, збереження даних та початку нового експерименту).

ВИСНОВКИ

1. Властивості тонкоплівкової гнучкої електроніки, такі як мала вага, механічна гнучкість і довговічність, проста інтеграція пристроїв, а також низька вартість та висока технологічність обробки даних дозволяють використовувати їх у широкому діапазоні застосувань.
2. Однією із важливих експлуатаційних характеристик сучасних плівкових матеріалів функціональної електроніки є їх стабільність роботи під впливом механічних навантажень (стискання, розтягування, згин та вигін).
3. Контроль стабільності роботи функціональних приладових структур можна здійснювати шляхом вимірювання тензорезистивних властивостей плівкових матеріалів, що стануть основою для гнучких пристроїв, розробивши та протестувавши інформаційну систему контролю електрофізичних властивостей плівок.
4. Інформаційна система контролю розроблена на основі вакуумної установки ВУП-5М та мікрогвинта для дослідження явища тензоефекту на розтяг.
5. Електронно-апаратна частина інформаційної системи була реалізована на основі універсальної апаратної обчислювальної платформи Arduino, що під'єднується до комп'ютера з метою напівавтоматичного керування за допомогою програмного пакету LabVIEW.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лучинин В.В. Мультидисциплинарные технологии. Гибкая электроника и фотоника. – Нано- и микросистемная техника, № 12 (161). – 2013. – С. 2-7.
2. Афанасьев П., Бохов О., Лучинин В. Научно-технологический комплекс экспресс- прототипирования изделий гибкой электроники и фотоники // Наноиндустрия, № 6 (44). – 2013. – С. 94-104.
3. Зимина Т.М., Соловьев А.В., Лучинин В.В., Муратова Е.Н., Краева Л.А., Хамдулаева Г.Н. Принципы создания гибридных миниатюрных приборов для выращивания колоний микробных клеток на основе пористого анодного оксида алюминия // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – С.19-34.
4. Stott J., Kumatani A., Minari T., Tsukagoshi K., Heutz S., Aeppli G., Nathan A. Bottom-Contact Pentacene Thin-Film Transistors on Silicon Nitride // Electron. Device Lett. – 2016, V. 32. – P.1305 – 1307.
5. Shao F., Chen X.-J., Barnes C. J., Henson B. // Proc. Inst. Mech. Eng. H. – 2010, V. 224. – P. 97 – 105.
6. Lu J., Li L., Park J. B., Sun Y. K., Wu F., Amine, K. Aprotic and aqueous Li-O₂ batteries // Chem. Rev. – 2014, V. 114. – P. 5611–5640.
7. 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.
8. Lee W., Kim J., Kim Y.-H., High-performance InO_x/GaO_x bilayer channel thin-film transistors made using persistent high-surface-energy induced by photochemical activation // Nano Lett. – 2017, V. 18. – P. 627 – 632.
9. Xu F., Durham J. W., Wiley B. J., Zhu Y. // ACS Nano. – 2011, V.5. – P. 1556– 1563.
10. Xia F., Farmer D. B., Lin Y.-M., Avouris P. Graphene field-effect transistors with high on/off current ratio and large transport band gap at room temperature // Nano- Lett. – 2010, V. 10. – P. 715–718.
11. http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/pics/126.files/126_img_52.jpg
[Электронный ресурс] – Дата доступа : 05.04.2018.

12. Torrisi F., Hasan T., Wu W., Sun Z., Lombardo A., Kulmala T., Hshieh G. W., Jung S. J., Bonaccorso F., Paul P. J., Chu D. P., Ferrari A. C. Ink-jet printed graphene electronics // *ACS Nano*. –2012, V. 6. – P. 2992–3006.
13. Guenther T., Lovell N.H., Suaning G.J. Bionic vision: system architectures: a review // *Expert Rev. Med. Devices*. – 2012. – V. 10. – P. 33–48.
14. <http://ieeexplore.ieee.org/mediastore/IEEE/content/media/5/6259910/6198376/6198376-fig-1-small.gif> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 06.04.2018.
15. Yao M., Okuno K., Iwaki T., Awazu T., Sakai T. Long cycle-life LiFePO₄/Cu–Sn lithium ion battery using foam-type three-dimensional current collector // *J. Power Sources*. – 2010, V. 195. – P. 2077–2081.
16. Martins R., Nathan A., Barros R., Pereira L., Barquinha P., Correia N., Costa R., Ahnood A., Ferreira I., Fortunato E. Complementary metal oxide semiconductor technology with and on paper // *Lab Chip*. – 2011, V. 23. – P. 4491–4496.
17. Focke M., Kosse D., Muller C., Reinecke H., Zengerle R. Lab-on-a-Foil: Microfluidics on thin and flexible films // *Lab Chip*. – 2010, V. 25. – P. 230–250.
18. Xinli X., Qiu X., Kong D., Zhang W., Liu Y., Leng J., Optically transparent high temperature shape memory polymers // *Soft. Matter*. – 2016, V. 15. – P. 2894-2900.
19. <http://ieeexplore.ieee.org/mediastore/IEEE/content/media/5/6259910/6198376/6198376-fig-13-small.gif> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 07.04.2018.
20. Yang T.-H., Pyo D., Kim S.-Y., Cho Y.-J., Bae Y. D., Lee Y. M., Lee J. S., Lee E. H., Kwon D.-S. A new subminiature impact actuator for mobile devices // *IEEE World Haptics Conference*. – 2011, V. 12. – P. 21–24.
21. Bau O., Poupyrev I., Israr A., Harrison C., TeslaTouch: Electro vibration for touch surfaces / *Proc. User Interface Software and Technology*. – 2010, V.10. –P. 29–40.
22. Hiralal P., Wang H., Unalan H. E., Liu Y., Rouvala M., Wei D., Andrew P., Amaratunga G. A. J., Enhanced supercapacitors from hierarchical carbon nanotube and nanohorn architectures // *J. Mater. Chem.*– 2011, V. 18. – P. 50–74.
23. Ryhnen T. *Nanotechnologies for Future Mobile Devices*. – U.K. Cambridge: Cambridge Univ. Press. – 2010, V. 7. – P. 101–204.

24. <http://ieeexplore.ieee.org/mediastore/IEEE/content/media/5/6259910/6198376/6198376-fig-15-small.gif> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 07.04.2018.
25. <http://ieeexplore.ieee.org/mediastore/IEEE/content/media/5/6259910/6198376/6198376-fig-6-small.gif> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 07.04.2018.
26. Jang B. Z., Liu C., Neff D., Yu Z., Wang M. C., Xiong W., Graphene surface-enabled lithium ion-exchanging cells: Next-generation high-power energy storage devices // *Nano. Lett.* – 2011, V. 6. – P. 150–200.
27. Zhu Y., Murali S., Stoller M. D., Ganesh K. J., Cai W., Ferreira P. J., Pirkle A., Wallace R. M., Cychosz K. A., Thommes M., Su D., Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene // *Science.* – 2011, V. 22. – P. 65–90.
28. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості). – Суми: СумДУ, 2002.
29. https://www.jeol.co.jp/en/science/product_file/file/en_sc20-2.jpg [Электронный ресурс] – Дата доступа : 07.04.2018.
30. Тищенко К.В., Великодний Д.В., Проценко С.И. Комплекс для автоматического исследования тензорезистивных свойств тонкопленочных структур // Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». – 2010. – С. 304 – 306.
31. <https://potentiallabs.com/cart/buy-arduino-nano-online-hyderabad-india> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 01.06.2018.
32. <http://tech.ay.by/promyshlennoe-i-biznes-oborudovanie/dvigateli/> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 01.06.2018.
33. <https://prom.ua/p400555336-enkoder-040-modul.html> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 01.06.2018.
34. <https://prom.ua/p555480897-kanalnyj-relejnyj-modul.html>[Электронный ресурс] – Дата доступа : 01.06.2018.
35. <http://physics.wku.edu/phys318/resources/mydaq/> [Электронный ресурс] – Дата доступа : 01.06.2018.