

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

\_\_\_\_\_ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

17 травня 2024 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності 171 – Електроніка

освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ**

**ДЕФОРМАЦІЇ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ**

Здобувачки групи ЕП.м-21н Симоненко Марини Геннадіївни

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

\_\_\_\_\_ Марина СИМОНЕНКО

Керівник завдувачка кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики,  
докт. фіз-мат.наук, професор \_\_\_\_\_ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

**Суми – 2024**

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  
Л.В.Однодворець  
«01» травня 2024 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**Симоненко Марини Геннадіївни**

Тема роботи: **ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА СЕНСОРИ**  
**ДЕФОРМАЦІЇ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ**

затверджена наказом по університету від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Тензорезистивні перетворювачі та датчики деформацій (strain sensors) використовуються для вимірювання деформацій і механічних напружень у деталях машин і механізмів; фізичних параметрів (тиску, вібрації, прискорення та ін.); визначенні напруги, деформації, параметрів коливальних процесів та контролю продуктивності конвеєрів, вимірювання маси транспортних засобів (автомобілів, залізничних вагонів), деформацій мостів, будинків та інших споруд, а також у біомедичних вимірюваннях для фіксації біологічних параметрів людини і контролю його стану при фізичних навантаженнях [3 - 5].

Мета роботи полягала у вивченні фізичних основ роботи, конструктивно-технологічних та електричних параметрів, робочих характеристик і галузей застосування тензорезистивних перетворювачів та датчиків деформацій як компонент механічних та електронних систем; дослідженні тензоефекту в металевих нанорозмірних матеріалів для сенсорної електроніки.

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

1. Тензоефект: теоретичні основи та результати експериментів.

2. Конструктивно-технологічні особливості тензорезисторів та перетворювачів на їх основі.

3. Датчики деформації: конструкція, застосування.

4. Методика вимірювання коефіцієнту тензочутливості.

5. Результати розрахунків коефіцієнтів тензочутливості металевих плівок.

6. Висновки.

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

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 4-8. Фізичні основи тензорезистивного ефекту.

Слайди № 9-12 Конструкція та параметри тензорезистивних перетворювачів різних типів.

Слайди № 12-13. Датчики деформації.

Слайди № 14-15 Методика вимірювань і результати розрахунків.

Слайд №16. Висновки.

Слайд №17. Подяка.

6. Дата видачі завдання 01.05.2024 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 16.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	23.05.2024 р., 11-40 онлайн	

Здобувачка вищої освіти

Керівник

Симоненко М.Г.

Однодворець Л.В.

## АНОТАЦІЯ

**Обсяг роботи:** 43 сторінки, 17 рисунків, 3 таблиці, 20 використаних джерел.

**Актуальність теми роботи:**

Сучасні наукові розробки в галузях електронного приладобудування та сенсорної електроніки дозволили суттєво підвищити ефективність параметрів і робочих характеристик приладів для вимірювання: деформацій різноманітних об'єктів в інтервалі робочих температур від  $-270$  до  $1000$  °С; контролю тривалих статичних, динамічних і ударних навантажень; вимірювання пружних і пластичних деформацій та ін. Розвиток динамометрів і датчиків тиску сприяв конструюванню тензорезисторів і удосконалення методів їх конструювання та формування чутливих елементів датчиків, що забезпечують вимірювальним пристроям високу точність. Продовжується розробка нових функціональних матеріалів, технологій та принципів тензометрії як методів визначення напруженого стану мікро- і макрооб'єктів.

Тензорезистивні перетворювачі і датчики деформацій (strain sensors) використовуються для вимірювання деформацій і механічних напружень у деталях машин і механізмів; фізичних параметрів (тиску, вібрації, прискорення та ін.); визначенні напруги, деформації, параметрів коливальних процесів та контролю продуктивності конвеєрів, вимірювання маси транспортних засобів (автомобілів, залізничних вагонів), деформацій мостів, будинків та інших споруд, а також у біомедичних вимірюваннях для фіксації біологічних параметрів людини і контролю його стану при фізичних навантаженнях.

**Мета роботи:** вивчення фізичних основ роботи, конструктивно-технологічних та електричних параметрів, робочих характеристик і галузей застосування тензорезистивних перетворювачів та датчиків деформацій як компонент механічних та електронних систем; дослідженні тензоефекту в металевих нанорозмірних матеріалах сенсорної електроніки.

**Методи:** резистивний метод вимірювання тензорезистивного ефекту нанорозмірних плівкових матеріалів; розрахунки коефіцієнтів тензочутливості на основі деформаційних залежностей опору.

**Отримані результати:**

1. Кваліфікаційна робота магістра присвячена вивченню фізичних основ роботи, конструктивно-технологічних, електричних параметрів та робочих характеристик тензорезистивних перетворювачів і датчиків деформацій як компонент механічних та електронних систем.
2. Пояснена причина того, що властивості матеріалів дуже чутливі до зміни товщини плівки і розміру кристалітів, концентрації домішкових атомів і дефектів кристалічної будови, дії деформації, що обумовлює ряд структурних, розмірних фазових і концентраційних ефектів.
3. Сучасні тензорезистивні вимірювальні перетворювачі конструктивно представляють собою тензорезистор, чутливий елемент якого виконаний з тензочутливого матеріалу (плівки, дроту, фольги та ін.), сформованого на підкладці, яка розташована між чутливим елементом і деталлю, та захисний елемент, розташований поверх чутливого елемента.
4. Деформаційні інтелектуальні датчики розробляються при застосуванні мікросистемних технологій. Вони можуть бути реалізовані у вигляді мембран, в яких безпосередньо формують тензорезистори для перетворення механічної деформації в електричні сигнали.
5. На основі експериментальних деформаційних залежностей опору розраховані усереднені за деформаційним інтервалом значення коефіцієнтів тензочутливості залежно від номера деформаційного циклу для плівок Mo, W, Re, Fe, Ni і Cr, які підтвердили висновок про те, що в плівках при пружній деформації до 1 % всі релаксаційні процеси (частковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та інорідних атомів) відбуваються, в основному, після першого деформаційного циклу. Величина коефіцієнтів тензочутливості для одношарових металевих плівок від 2,2 до 13,7 одиниць.

**Рекомендації щодо використання:** врахування чутливості до деформації опору нанорозмірних півкових матеріалів при розробці сенсорів деформації та тензорезисторів.

**Публікація:** Результати кваліфікаційної роботи магістра були представлені та обговорені на Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2024» (м. Суми, Сумський державний університет).

**Ключові слова:** тензоефект, коефіцієнт тензочутливості, інтелектуальні датчики деформації, мікросистемні технології, мембрани.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ.....</b>	<b>5</b>
1.1. Фізичні основи тензорезистивного ефекту.....	5
1.1.1. Ефект зміни опору провідникових матеріалів.....	6
1.1.2. Повздовжня і поперечна тензочутливість.....	10
1.1.3. Тензорезистивний ефект у напівпровідниках.....	11
<b>РОЗДІЛ 2 ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ: КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБИВОСТІ ТА СХЕМИ.....</b>	<b>20</b>
2.1. Загальна характеристика тензодатчиків.....	20
2.2. Сучасні тензоперетворювачі та їх конструктивні особливості.....	23
2.3. Схеми включення тензодатчиків.....	24
2.4.1. Подільник напруги.....	24
2.4.2. Вимірювальний міст.....	25
<b>РОЗДІЛ 3 ДЕФОРМАЦІЙНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ДАТЧИКИ.....</b>	<b>27</b>
3.1. Основні типи деформаційних чутливих елементів.....	27
3.2. Застосування мікросистемних технологій.....	29
3.3. Методика вимірювання тензорезистивного ефекту.....	37
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>41</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>42</b>

# РОЗДІЛ 1

## ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ

### 1.1. Фізичні основи тензорезистивного ефекту

Перетворення вимірюваної деформації в зміну електричного опору відбувається в чутливому елементі тензорезистора внаслідок наявності тензорезистивного ефекту в провідникових і напівпровідникових матеріалах, тобто внаслідок їхньої властивості змінювати свій електричний опір при деформуванні.

Електричний опір тіла змінюється при деформації як за рахунок зміни його геометричних розмірів, так і за рахунок зміни питомого опору матеріалу. У випадку одноосьової напруги (наприклад, розтягання) відносна зміна опору  $dR/R$  елемента довжиною  $l$  з питомим опором  $\rho$  і коефіцієнтом Пуассона  $\mu$  буде

$$dR/R = (1 + 2\mu)dl/l + d\rho/\rho. \quad (1.1)$$

У рівнянні (1.1) перший член визначає зміну геометрії тіла, а другий – зміну питомого опору;  $\mu \leq 0,5$  і збільшення опору за рахунок геометрії не перевищує  $2dl/l$ .

Збільшення опору за рахунок зміни питомого опору залежить від структури й властивостей матеріалу і у деяких випадках може бути в кілька десятків і сотень раз більше, ніж зміна за рахунок геометрії.

У різних роботах є великий експериментальний і теоретичний матеріал по дослідженню впливу всебічного (гідростатичного) стиску на опір твердого тіла, з якого потрібно, що при деформації питомий опір твердого тіла змінюється внаслідок певних причин [6-8]:



- зміни взаємодії між електронами і пружними хвилями у кристалічній решітці в зв'язку з тим, що деформація спотворює порядок кристалічної решітки, змінює амплітуду коливання атомів біля їхніх нормальних положень і внаслідок цього змінюється довжина вільного пробігу електронів і їхня рухливість;

- зміни енергії Фермі, що приводить до зміни числа електронів – носіїв струму, тому що з теорії переносу відомо, що тільки електрони з енергією, близькою до енергії Фермі, визначають процеси провідності;

- зміни зонної структури, обумовленого зміною в перекритті або зближенням різних зон;

- виникнення нових кристалічних модифікацій.

### 1.1.1. Ефект зміни опору провідникових матеріалів

Розглядаючи зміни опору різних матеріалів при високих тисках, Бріджмен установив, що в більшості провідникових матеріалів (металів і сплавів) переважає ефект зміни опору внаслідок зміни розсіювання і відповідно рухливості електронів. Такі метали і сплави названі нормальними [1].

На основі моделі вільних електронів проведений теоретичний розрахунок залежності питомого опору нормальних металів від зміни їхнього об'єму при всебічному стисненні, що враховує тільки рухливість електронів. У цьому випадку при температурах, більших характеристичної температури,

$$\frac{d\rho/\rho}{dV/V} = 2\gamma, \quad (1.2)$$

де  $\gamma$  – постійна Грюнаїзена.

У випадку лінійної деформації ізотропного тіла, для якого

$$\frac{dl}{l} = \frac{dV}{V} / (1 - 2\mu), \quad (1.3)$$

збільшення питомого опору буде визначатися як

$$\frac{d\rho}{\rho} = 2\gamma(1 - 2\mu)\frac{dl}{l}.$$

Прийнято позначати  $dp/\rho = m dl/l$ , де  $m$  – константа. Таким чином, для провідникових ізотропних матеріалів

$$m = 2\gamma(1 - 2\mu). \quad (1.4)$$

Константу  $m$  можна виразити через постійну Бріджмена, певну при всебічному стисненні як  $\tilde{N}_A = \frac{dR}{R} / \frac{dV}{V}$  або  $\tilde{N}_A = \frac{d\rho}{\rho} / \frac{dV}{V} - \frac{1}{3}$ . Враховуючи вираз (1.3), отримуємо для ізотропного матеріалу:

$$m = \left(C_B + \frac{1}{3}\right)(1 - 2\mu). \quad (1.5)$$

Слід зазначити, що при деформації нормальних металів відбувається також зміна енергії Фермі і зв'язана з цим зміна числа  $n_a$  електронів провідності. Однак для нормальних провідникових матеріалів, у яких концентрація електронів провідності дуже велика ( $n_e \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ), а енергія Фермі досить висока (3–5 eВ), внесок у зміну опору за цей рахунок при деформації прийнято вважати малим [1]. Значення  $m$ , експериментально визначені при розтяганні вільно підвішених дротів деяких металів, і значення  $m$ , розраховані по формулах (1.4) та (1.5) для цих металів, наведені в таблиці 1.1. Значення  $C_B$  у розрахунках взяті з досліджень Бріджмена при всебічному стисненні металів і у всіх випадках  $\mu = 0,35$ .

Розрахункові і експериментальні значення  $m$  задовільно узгоджуються, що дозволяє використати великий матеріал по дослідженню в умовах всебічного стиснення різних металів і сплавів для оцінки властивостей коефіцієнтів перетворення чутливого елемента тензорезистора. Так, наприклад, експериментальні дослідження, проведені Бріджменом, указують на незалежність константи  $C_B$  для нормальних металів і сплавів від зміни об'єму при всебічному стисненні в досить широких межах.

Таблиця 1.1

Розрахункові і експериментальні значення  $m$  деяких металів

Метал	Діаметр дроту, мм	$m$		
		Експеримент	Розрахунок згідно (1.4)	Розрахунок згідно (1.5)
Al	0,250	1,40	1,29	1,03
Fe	0,226	0,44	0,96	1,30
Co	0,145	0,84	1,11	0,91
Mo	0,125	0,80	0,93	1,15
Ta	0,124	1,30	1,05	1,12
W	0,130	1,16	0,96	1,30
	0,014	1,16		
Cu	0,258	1,60	1,17	0,88
	0,129	1,55		
	0,550	1,20		
	0,026	0,90		
	0,011	0,90		

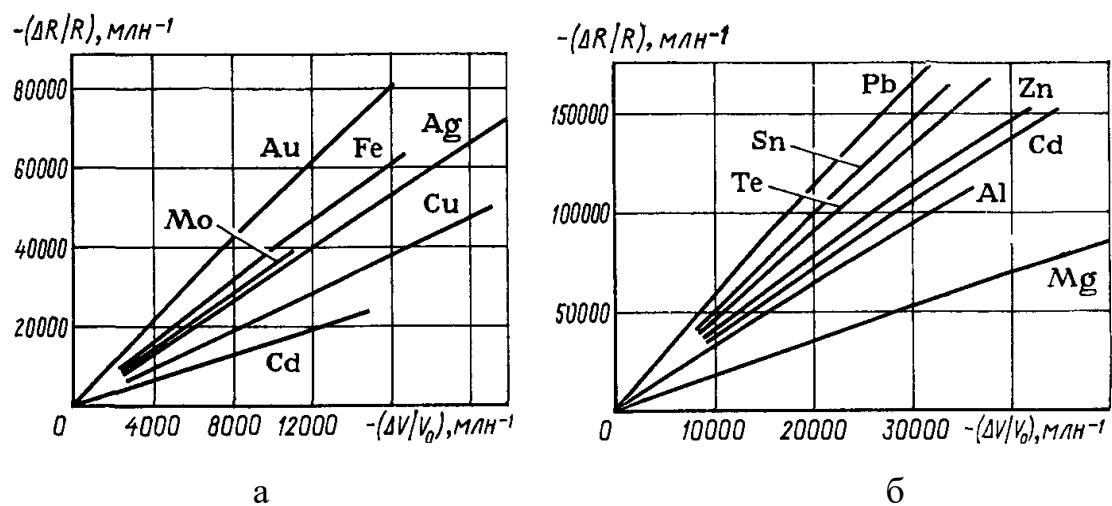


Рис. 1.1. Залежність відносної зміни опору матеріалу від зміни об'єму при всебічному гідростатичному стисненні [1]: а – метали з високою температурою плавлення; б – метали з низькою температурою плавлення

Виходячи із співвідношення(1.5), можна вважати, що константа  $m$  також не залежить від деформації в досить широких межах. Проведені дослідження показали, що збільшення опору дротів з різних металів і сплавів від деформації змінюються лінійно в області пружного розтягу. Тому рівняння (1.1) можна записати у вигляді:

$$\frac{dR}{R} = K_{\text{в}} \frac{dl}{l}, \quad (1.6)$$

де

$$K_{\text{в}} = 1 + 2\mu + m. \quad (1.7)$$

Для нормальних металів і сплавів в області пружної деформації  $K_{\text{пр}}$  невеликий і варіює від 0,6 до 5,5 (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

**Значення  $K_{\text{пр}}$  деяких металів і сплавів**

Матеріал	$K_{\text{пр}}$	Матеріал	$K_{\text{пр}}$
Константан	2,1	Платино-іридієвий сплав	5,0
Ніхром	2,1	Паладій	4,0
Манганін	0,6-0,8	Платино-родієвий сплав	5,5
Фосфатна бронза	1,9	Паладій-срібний сплав	0,8
Хромель	2,5		
Елінвар	3,5		
Ізоеластік	3,6		
Золото	3,1		

У пластичній області деформації відбувається тільки перегрупування кристалів, міжатомні відстані при цьому не змінюються і можна вважати, що в пластичній області деформацій  $m=0$  і тензоефект визначається тільки зміною геометрії провідника. Так як в пластичній області деформацій  $\mu = 0,5$ , то  $K_{пр}$  для всіх матеріалів буде однаковий і дорівнює приблизно 2 одиниці.

### 1.1.2. Поздовжня і поперечна тензочутливість

Кількісною характеристикою тензоефекту є коефіцієнти тензочутливості (КТ) як відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини (т.зв. поздовжня тензочутливість  $\gamma_l$ ) або ширини плівки (поперечна тензочутливість  $\gamma_t$ ):

$$\gamma_l = \frac{\Delta R/R_n}{\Delta l/l_n}, \quad \gamma_t = \frac{\Delta R/R_n}{\Delta a/a_n},$$

де  $\Delta l/l_n = \varepsilon_l$ ,  $\Delta a/a_n = \varepsilon_t$ . ( $l_n, a_n$  – початкові довжина і ширина).

Підкреслимо, що в першому випадку напрямок протікання електричного струму повинен збігатися з напрямком деформації, в той час як у другому випадку вони перпендикулярні. Це й обумовлює різні значення  $\gamma_l$  та  $\gamma_t$ . Для одержання теоретичних співвідношень для  $\gamma_l$  та  $\gamma_t$  розглянемо електричний опір плівки

$$R = \rho l(ad)^{-1} \text{ або } \ln R = \ln \rho + \ln l - \ln a - \ln d.$$

Після взяття диференціала одержуємо

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial l}{l} - \frac{\partial a}{a} - \frac{\partial d}{d}. \quad (1.8)$$

За визначенням можна записати

$$\gamma_l = \frac{dR/R_n}{dl/l_n} = \frac{\partial \rho/\rho_n}{\partial l/l_n} + (1 + 2\mu_f), \quad (1.9)$$

оскільки  $\frac{\partial a/a_n}{\partial l/l_n} = -\mu_f$  ( $\mu_f$  - коефіцієнт Пуассона для плівки).

Аналогічно для  $\gamma_t$  одержимо

$$\gamma_t = \frac{dR/R_n}{da/a_n} = \frac{\partial \rho / \rho_n}{\partial a / a_n} - 1. \quad (1.10)$$

К.Тельє, А.Тоссе, К.Пішар проаналізували РЕ в тензочутливості з точки зору лінеаризованої моделі МШ та моделі ефективної довжини вільного пробігу. У першому випадку одержане співвідношення має вигляд:

$$\gamma_t d \cong (\eta_t + 1) \cdot f(\alpha) d - \lambda_0 (1 - p) [(\eta_t + 1) f(\alpha) H(\alpha) - (1 - \mu') U(\alpha)], \quad (1.11)$$

де  $U(\alpha)$ , як і  $H(\alpha)$ , відома і протабульована функція, наприклад,  $U(0) = 0,400$ , а  $U(5) = 0,0045$ ;  $\mu' = \mu_s (1 - \mu_s) \cdot (1 - \mu_f)^{-1}$  ( $\mu', \mu_s$  – зведений і коефіцієнт Пуассона для підкладки).

Лінеаризоване співвідношення (1.11) дозволяє одержати параметри електроперенесення ( $\eta_t, \lambda_0, p$ ), якщо експериментальні результати побудувати в напрямних координатах  $\gamma_t \cdot d$  від  $d$ . Із моделі ефективного розсіювання випливає, що  $\gamma_t$  та  $\gamma_i$  можуть як збільшуватися, так і зменшуватися з товщиною.

### 1.1.3. Тензорезистивний ефект у напівпровідниках

У напівпровідникових матеріалах при деформації  $\rho$  змінюється в 50-100 разів більше, ніж у металів і сплавів. Ці зміни не можна пояснити тільки рухливістю електронів при зміні розсіювання в кристалічній решітці. Так, по формулі (1.2) для кремнію і германію за рахунок зміни рухливості електронів  $\frac{d\rho}{\rho} / \frac{dV}{V}$  буде 1,4 і 1,7 відповідно [1].

Концентрація електронів – носіїв струму в зоні провідності при нормальних температурах у напівпровідників в  $10^5$ – $10^6$  разів менше, ніж у провідникових матеріалів. Тому зміна числа електронів  $n_e$  внаслідок зміни енергії Фермі в напівпровідниках вносить помітний внесок у тензоефект. Число електронів у зоні провідності або дірок у валентній зоні експоненціально залежить від

температури і ширини забороненої зони або зони між енергетичними домішковими рівнями і рівнем провідності.

При деформації відбувається зміна цих енергетичних рівнів і питомий опір змінюється за експоненціальним законом. Так, для германію при 300 К зміна за цей рахунок може доходити до  $\frac{d\rho}{\rho} / \frac{dV}{V} = -77$ . Хоча зміни енергетичних рівнів і приводять до високого тензоефекту, але при цьому спостерігаються різкі збільшення опору від температури.

При аналізі впливу температури на число носіїв струму і на провідність напівпровідника розглядають область власної і домішкової провідності, а також область насичення. В області власної і домішкової провідності опір від температури змінюється по експоненті. В області насичення концентрація електронів практично не залежить від температури (та деформації) і тензоефекти напівпровідників та металів у цій області близькі [1].

Традиційні напівпровідники Si і Ge, а також ряд напівпровідникових сполук  $A^{III}B^V$  (InSb, GaSb, GaAs та ін.) у зоні насичення володіють високим тензоефектом. Зонна структура цих матеріалів багатодолинна, тобто в різних напрямках кристалічної решітки є по кілька енергетичних мінімумів зон провідності. Ефективні маси носіїв струму, що рухаються по різних напрямках кристалічної решітки, відрізняються друг від друга і рухливість їх різна.

Анізотропія тензоефекту відбувається в результаті того, що при несиметричній деформації кристала (наприклад, розтяганні і стисненні в перпендикулярному до нього) зближаються енергетичні мінімуми зон провідності і електрони переходять із різними рухливостями з одного енергетичного рівня в інший, відповідно в цьому напрямку змінюється і провідність

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta n_e}{n_0} \frac{U_{\perp} - U_{\parallel}}{U_{\perp} + U_{\parallel}}, \quad (1.12)$$

де  $\Delta n_e$  – число електронів, що перетікають;  $n_0$  – загальне число електронів;

$U_{\parallel}$  і  $U_{\perp}$  – рухливості електронів при паралельному і перпендикулярному напрямках деформації електричної напруги.

У формулу (1.12) входять члени, нелінійно залежні від деформації, тому залежність  $\rho=f(\varepsilon)$  буде нелінійна. Так, з урахуванням структури кремнію  $n$ -типу, наведена розрахункова формула для константи  $m$  при розтяганні кристала в напрямку:

$$m = -\frac{8C_g e^C g^e}{1 + 12e^C g^e + 20e^{2C} g^{2e}},$$

де  $C_g = \frac{(\alpha_{\parallel} + \alpha_{\perp})E}{KT}$ ;

$\alpha_{\parallel}$  і  $\alpha_{\perp}$  – коефіцієнти, що характеризують зміни рівня енергії мінімумів у напрямку прикладеної деформації і перпендикулярно до нього;

$E$  – модуль пружності кристала в напрямку прикладеної деформації;

$K$  – постійна Больцмана;  $T$  – абсолютна температура.

Більш складна залежність  $m=f(\varepsilon)$  наведена в тій же роботі для монокристала германію  $n$ -типу при розтяганні його в напрямку [1].

Температура в області насичення більшою мірою впливає на тензоефект і опір напівпровідникових матеріалів, чим металів і сплавів. Причому цей вплив змінюється як від типу домішкових добавок (донорів або акцепторів), так і від їхньої концентрації. Тип домішкових добавок і концентрація їх впливають також на питомий опір та робочу область температур.

Крім наявності тензоефекту матеріал чутливого елемента повинен володіти рядом властивостей, сполучення яких дозволяє використовувати тензоефект для перетворення деформацій. Так, матеріал чутливого елемента повинен мати достатній питомий опір, щоб забезпечувати тензорезисторам опір 50–800 Ом при невеликих габаритних розмірах чутливого елемента.

Повинен бути малим вплив робочої температури як на  $K_{\text{пр}}$ , так і на опір тензочутливого матеріалу. Останнє особливо важливо, тому що відомо, що більшість металів, сплавів та особливо напівпровідників має велике значення  $\alpha$  і збільшення опору тензорезистора за рахунок впливу температури може в кілька



разів перевищити збільшення опору за рахунок деформації [1]. Введення домішок у метали і в напівпровідники може істотно змінити тензоефект і  $\rho$  матеріалу, а також вплив на ці властивості температури. Причому механізм впливу домішок у провідникових і напівпровідникових матеріалів різний.

Чисті напівпровідникові матеріали мають дуже великі значення  $\rho$  (наприклад,  $\rho_{\text{Ge}} = 10^2$  Ом·см,  $\rho_{\text{Si}} = 10^6$  Ом·см), а також різку залежність опору від температури. Тому вони в тензометрії не використовуються, хоча власна провідність приводить до високого тензоефекту. Введення домішок у напівпровідники приводить до зменшення значення  $\rho$ , а не до збільшення, як у провідникових матеріалів. Причому в міру збільшення концентрації домішкових атомів  $\rho$  змінюється в мільйони разів.

У зонах насичення вплив температури на опір напівпровідників проявляється, як і у провідниках, внаслідок розсіювання за рахунок теплових коливань атомів решітки (складова  $\rho_i(T)$  формули  $\rho = \rho_0 + \rho_i(T)$ ) і на іонізованих атомах домішки (складова  $\rho_0$ ). Однак у напівпровідниках вплив температури проявляється більш різко. Так, розсіювання за рахунок теплових коливань атомів решітки у напівпровідниках приводить до зменшення рухливості носіїв струму пропорційно  $T^{-3/2}$ , відповідно  $\rho_i$  за цей рахунок збільшується пропорційно  $T^{3/2}$ , тобто  $\rho_i \approx T^{3/2}$ . Розсіювання на іонізованих домішках (донорах і акцепторах) приводить до збільшення рухливості пропорційно  $T^{3/2}$ . Рухливість поряд з цим зменшується навпаки пропорційно концентрації іонізованих домішок  $n_e$ , і тому складова  $\rho_0$  за рахунок розсіювання на домішках  $\rho_0 \approx n_e T^{-3/2}$ .

При збільшенні частки домішок  $\alpha$  зменшується за рахунок того, що починає більш помітно позначатися вплив розсіювання на домішках. При дуже великих частках домішки може спостерігатися мінімум у значеннях  $\alpha$  і потім у міру подальшого збільшення частки  $n_e$  починає спостерігатися деяке збільшення  $\alpha$ . Останнє пов'язане з тим, що у вираженні температурного коефіцієнта за рахунок складової  $\rho_0$  починає позначатися вплив позитивного члена  $\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dT}$ , яке і приводить до деякого збільшення значення  $\alpha$ . У зв'язку з більш різкою

залежністю рухливості носіїв струму від температури  $K_{пр}$ , а відповідно і  $K$  напівпровідникових тензорезисторів змінюються більшою мірою від температури, чим параметри провідникових тензорезисторів. Температурний коефіцієнт чутливості ( $TKЧ$ ) помітно зменшується при збільшенні частки домішки. Сказане вище про вплив домішки на  $\alpha$ ,  $K_{пр}$ , і  $TKЧ$  для напівпровідників добре ілюструється графіком, наведеним фірмою «Кюлайт» (*Kulite*, США) для кремнію  $p$ -типу (Рис.1.4).

Наприклад, у тензометричної константаної фольги (ТУ 48-21-244–84) марки МНМнЖ40-1,4-0,45, що має у своєму складі 1,4% Mn і 0,45% Fe  $\alpha = 20 \div 30$  млн<sup>-1</sup>/°C. Зменшення ж добавки Mn до 1,25% і збільшення частки Fe до 0,55% (МНМцЖ40-1,25-0,55) приводить до  $\alpha = -3 \div 13$  млн<sup>-1</sup>/°C.

Бінарний нікель-хромовий сплав Х29Н80 (ТУ 14-131-430–69) має  $\rho = 1,1$  мкОм·м і  $\alpha = 100$  млн<sup>-1</sup>/°C та рекомендується для тензорезисторів, що вимірюють тільки динамічні і вібраційні деформації [1].

Ніхромові сплави легуються невеликими (до 1–2%) добавками кремнію (сплав ніхром V) або алюмінію – (сплав Карма) фірми «Брітіш Драйвер Харріс» (*British Driver Harris*, Великобританія); марганцю – (сплав ізаом) фірми «Ізабелленхютте» (*Isabellenhiite*, ФРН); алюмінію і міді – (сплав еваном) фірми «У. Б. Драйвер» (*W. B. Driver*, США). Таке легування збільшує  $\rho$  ніхромових сплавів до 1,3 мкОм·м і зменшує  $\alpha$  до 20–30 млн<sup>-1</sup>/°C.

Коефіцієнт перетворення деформації перерахованих вище сплавів має значення 1,8–2,2, і основна частка зміни опору при деформації чутливого елемента відбувається у цих сплавах за рахунок зміни його геометричних розмірів [див. формулу (1.7)]. Коефіцієнт  $m$  за рахунок сильного спотворення кристалічної решітки сплавів малий (0,1–0,5) [1].

У напівпровідникових тензорезисторах використовуються напівпровідникові тензочутливі матеріали із кремнію, германію і напівпровідникові сполуки групи А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>, такі, як GaAs, GaP, GaSb, SnSb та ін. Ці напівпровідники мають  $K_{пр} = 50 \div 150$ . Причому у більшості випадків напівпровідники із провідністю  $p$ -типу мають позитивні, а з провідністю  $n$ -типу

негативні значення  $K_{пр}$ . Для зменшення значення  $\alpha$  застосовуються вироджені напівпровідники, тобто які мають велику кількість атомів домішок. Робочий діапазон температур напівпровідникових тензорезисторів не повинен перевищувати температурну зону насичення (провідності) напівпровідника, який використовується як чутливі елементи.

Узагальнення результатів вищевказаних робіт дозволяє сформулювати наступні закономірності тензоефекту. По–перше, у монокристалічних плівках величина КТ може бути менше або більше у порівнянні з масивними зразками; по–друге, у полікристалічних плівках величина поздовжнього КТ майже завжди більше коефіцієнта поперечної тензочутливості, що пов'язано з особливістю зміни внутрішнього потенціалу кристалічної решітки в процесі деформації; по–третє, залежно від співвідношення між поверхневим і зерномежовим розсіюванням електронів КТ можуть збільшуватися або зменшуватися, прямуючи до асимптотичної величини при збільшенні товщини (розміру кристалітів). І, накінець, величина КТ суттєво залежить від номера деформаційного циклу «навантаження – зняття навантаження» внаслідок виникнення залишкової деформації і, починаючи з 3–5–го циклів величини КТ практично не змінюються при подальших деформаційних циклах. Зазначені вище закономірності, які не завжди проявляються у плівках легкоплавких металів, були встановлені на прикладі плівок d – металів.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ: КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА СХЕМИ

#### 2.1. Загальна характеристика тензодатчиків

Тензометрія – спосіб вимірювання напружено-деформованого стану конструкції, яка заснована на застосуванні тензорезисторних перетворювачів (тензорезистор, тензодатчик) і базується на визначенні напруг та деформацій у зовнішніх шарах деталі за допомогою тензодатчиків і реєструючого обладнання [8,9]. Тензорезистор є провідником, що змінює свій електричний опір при деформації (стиснення-розтягування). При деформації провідника змінюється його довжина  $l$  і площа поперечного перетину  $Q$ . Деформація кристалічної решітки приводить до зміни питомого опору  $\rho$ . Ці зміни приводять до зміни опору провідника  $R$ :

$$R = \frac{\rho l}{Q}. \quad (2.1)$$

Цю властивість мають у тому або іншому ступені всі провідники. У даний час застосовують дротяні, плівкові і фольгові провідники та напівпровідникові тензорезистори. Залежність опору  $R$  від відносної деформації  $\varepsilon$  з достатньою точністю описується лінійним двочленом:

$$R = R_0(1 + S_\delta \cdot \varepsilon), \quad (2.2)$$

де  $R_0$  – опір тензорезистора без деформації;  $S_\delta$  – тензочутливість матеріалу.

Тензорезистивний датчик представляє собою тензорезистор, в основі роботи якого лежить явище тензоефекту (тензорезистивний ефект), що полягає у зміні активного опору провідників при їхній механічній деформації, і застосовуються для вимірювання пружних деформацій (напруг), тисків,

прискорень, малих переміщень, вібрацій у різних частинах механічних конструкцій. Використовуються окремі тензорезистори або блоки тензорезисторів, з'єднані за схемою моста або напівмоста. На практиці найбільш широко поширені дротові тензодатчики, а також фольгові, плівкові і напівпровідникові [9,10].

Тензодатчики використовуються у різних галузях машинобудування транспорту, будівництва і моніторингу конструкцій, у випробуваннях автомобілів та наукових дослідженнях. Тензодатчик може бути з виходом по напрузі і по струму. Сигнал з тензодатчика надходить на вимірювальний підсилювач або систему збору даних для наступного аналізу, у тому числі з використанням фірмового програмного забезпечення. На дійсний момент стала можлива не тільки реєстрація сигналів тензодатчиків, але і їхній комп'ютерний аналіз у реальному часі та автоматична видача керуючих сигналів для зміни режиму роботи конструкції, яка тестується [9]. Тензодатчик підрозділяється на датчик сили, що вимірює зусилля і навантаження, датчик тиску, який застосовується у різних середовищах, датчик переміщення використовуваний, у тому числі в моніторингу будівельних конструкцій, акселерометр (тензодатчик прискорення) та датчик крутного моменту.

Тензорезистивний вимірювальний перетворювач – параметричний резистивний перетворювач, який перетворює деформацію твердого тіла, викликану прикладеною до нього механічною напругою, в електричний сигнал [11]. Резистивний тензодатчик представляє собою основу із закріпленням на ній чутливим елементом. Принцип вимірювання деформацій за допомогою тензометричного перетворювача полягає в тому, що при деформації змінюється активний опір тензорезистора.

У сучасному вигляді тензорезистивний вимірювальний перетворювач конструктивно представляє собою тензорезистор, чутливий елемент якого виконаний з тензочутливого матеріалу (плівки, дроту, фольги та ін.), закріплений за допомогою зеднального (клею, цементу) на досліджуваній деталі (Рис.2.1). Для приєднання чутливого елемента в електричний ланцюг у тензорезисторі є

вивідні провідники. Деякі конструкції тензорезисторів для зручності установки мають підкладку, розташовану між чутливим елементом і досліджуваною деталлю, а також захисний елемент, розташований поверх чутливого елемента.

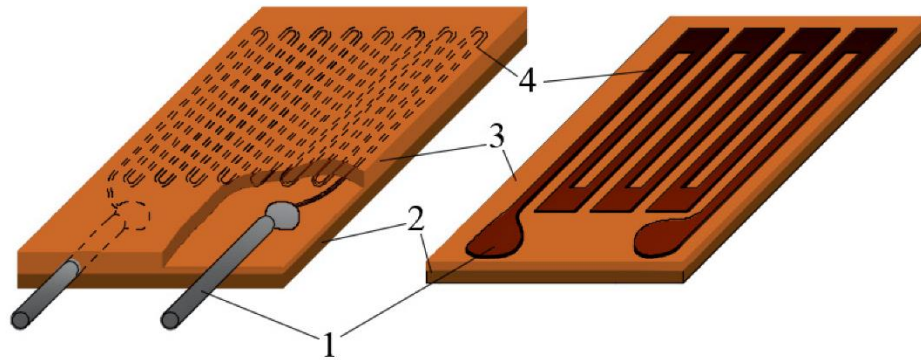


Рис. 2.1. Схема тензорезистивного перетворювача [11]: ліворуч – з дротяним чутливим елементом; праворуч – з фольгованим чутливим елементом; 1– вихідні контакти; 2– основа з ізоляційного матеріалу (підкладка); 3 – клей; 4 – чутливий елемент тензодатчика

При всьому різноманітті завдань, розв'язуваних за допомогою тензометричних вимірювальних перетворювачів, можна виділити дві основні області їх використання [11]:

- дослідження фізичних властивостей матеріалів, деформацій і напруг у деталях і конструкціях;
- застосування тензодатчиків для вимірювання механічних величин, перетворюваних у деформацію пружного елемента.

Для першого випадку характерно значне число точок тензометрування, широкі діапазони зміни параметрів навколишнього середовища, а також неможливість градуювання вимірювальних каналів. У даному випадку похибка вимірювання становить 2-10%. У другому випадку датчики градуюються по вимірюваній величині і похибки вимірів лежать у діапазоні 0,5-0,05%.

Найбільш яскравим прикладом використання тензометрів є ваги. Ваги на тензодатчиках застосовуються у різних галузях промисловості: кольорова і чорна металургія, хімічна, будівельна, харчова та інші галузі.

Принцип дії електронних ваг зводиться до вимірювання сили ваги, що впливає на тензодатчик, за допомогою перетворення виникаючих змін, наприклад деформації, у пропорційний вихідний електричний сигнал.

Широке поширення тензодатчиків пояснюється цілим рядом їх переваг: малі габарити і вага; малоінерційність, що дозволяє застосовувати тензодатчики як при статичних, так і при динамічних вимірах; мають лінійну характеристику; дозволяють дистанційно і у багатьох точках проводити вимірювання; спосіб установки їх на досліджувану деталь не вимагає складних пристосувань і не спотворює поле деформацій досліджуваної деталі.

## **2.2. Сучасні тензоперетворювачі та їх конструктивні особливості**

Окрема група плівкових тензоперетворювачів на основі  $V_i$ ,  $Ti$ ,  $Si$  або  $Ge$  виконується у вигляді однієї провідної плівки. Тензорезистивний коефіцієнт перетворювача, виконаного на основі металевої плівки, дорівнює 2-4, а його опір коливається в діапазоні від 100 до 1000 Ом.

Перетворювачі, виконані на основі напівпровідникової плівки, мають коефіцієнт порядку 50-200, і тому вони більш чутливі до прикладеної напруги. При цьому немає необхідності використовувати підсилювальні схеми, оскільки вихідна напруга напівпровідникового тензометричного моста становить приблизно 1 В. Опір напівпровідникового перетворювача змінюється залежно від прикладеної напруги нелінійно у всьому діапазоні напруг та сильно залежить від температури. Підкреслимо, що хоча при роботі з тензометром на основі металевої плівки потрібен підсилювач, його лінійність досить висока, а температурний ефект можна легко компенсувати [11-13].

## 2.3. Схеми включення тензодатчиків

### 2.4.1. Подільник напруги

Схема подільника напруги показана на рисунку 2.7. Якщо  $R_2$  являється активним тензорезистором, що змінює свою величину в результаті деформації на  $\Delta R_2$ , а резистор  $R_1$  – пасивним елементом ( $R_1 = \text{const}$ ), то за умови  $R_H \gg R_2$  тобто вимірювальний прилад (гальванометр і підсилювач) має майже нескінченно великий опір  $R_H$ , напруга сигналу буде:

$$\Delta U = U \frac{R_1 \cdot \Delta R_2}{R_1 + R_2} = U \frac{R_1 R_2 \cdot \Delta R_2}{(R_1 + R_2)^2 \cdot R_2} \quad (2.7)$$

Із порівняння формул для моста і півмоста можна зробити висновок, що мостова схема вимірів більш чутлива, а значить і точніша.

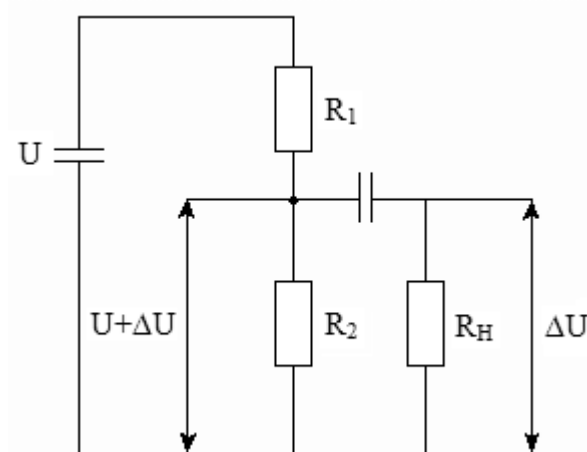


Рис. 2.7. Схема подільника напруги [11]

Залежно від виду деформації деталі і розташування датчиків на ній, можуть застосовуватися різні схеми включення датчиків, заснованих на властивостях моста.



### 2.4.2. Вимірювальний міст

Важливим класом пристроїв, призначених для вимірювання параметрів електричних ланцюгів: опору, сили струму, напруги та ін., а в тензометрії за цими величинами в результаті таріровок тензодатчиків маються на увазі неелектричні величини – напруги, деформації, зусилля та ін., являються мости [11].

У простому випадку мостова схема містить 4 резистори, сполучених в кільцевий замкнутий контур (рисунок 2.8).

Таку схему має одинарний міст постійного струму. Резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  цього контура називаються плечима моста, а точки з'єднання сусідніх плечей – вершинами моста. Ланцюги, що з'єднують протилежні вершини, називають діагоналями. Одна з діагоналей (3-4) містить джерело живлення  $GB$  і називається живлячою, а інша (1-2) – показчик рівноваги або відхилення від нього  $PG$  – вимірювальною.

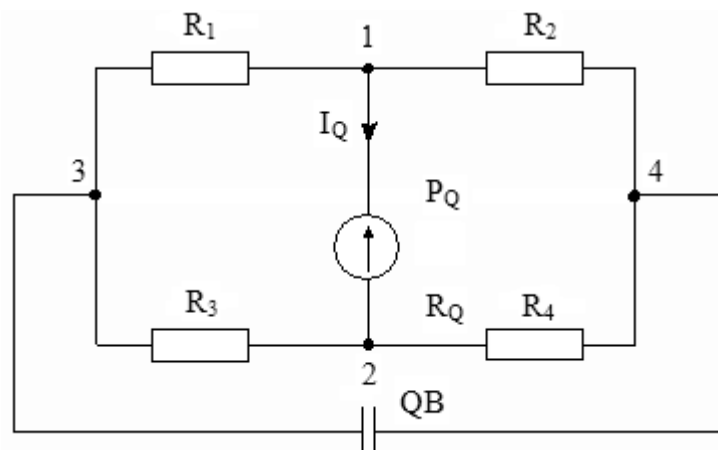


Рис. 2.8. Схема вимірювального моста [11]

Міст називається урівноваженим, якщо різниця потенціалів між точками 1 і 2 дорівнює нулю, тобто напруга на діагоналі, що містить індикатор нуля, відсутня і струм через індикатор дорівнює нулю.

Співвідношення між опорами плечей, при якому міст урівноважений, називається умовою рівноваги моста. Цю умову можна отримати, використовуючи закони Кірхгофа для розрахунку мостової схеми [11].

Наприклад, для одинарного моста постійного струму залежність нуля (гальванометр)  $R_G$  струму  $I_G$  від опорів плечей, опору гальванометра  $R_G$  і напруга живлення  $U$  має вигляд

$$I_G = \frac{U(R_1R_4 - R_2R_3)}{R_G(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)} \quad (2.8)$$

Струм  $I_G = 0$  при

$$R_1R_4 = R_2 \cdot R_3$$

Це і є умова рівноваги одинарного моста постійного струму, яке можна сформулювати таким чином: для того, щоб міст був урівноважений, похідні опорів плечей, що протилежать, мають бути рівні. Якщо опір одного з плечей невідомий

(наприклад,  $R_1 = R_x$ ), то остання умова буде мати вигляд:

$$R_x = \frac{R_2R_3}{R_4}. \quad (2.9)$$

Таким чином, вимір за допомогою одинарного моста можна розглядати як порівняння невідомого опору  $R_x$  із зразковим опором  $R_2$  при збереженні незмінним відношення  $R_3/R_4$ . З цієї причини плече  $R_2$  називають плечем порівняння, плечі  $R_3$  і  $R_4$  плечима відношень.

## РОЗДІЛ 3

### ДЕФОРМАЦІЙНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ДАТЧИКИ

#### 3.1 Основні типи деформаційних чутливих елементів

У пристроях контролю температури використовуються чутливі елементи у вигляді двох металевих смужок (або пластин), які з'єднані між собою. При підвищенні температури чутливий елемент деформується. Радіус вигину є первинним сенсорним сигналом, який далі можна різними способами перетворювати в електричний сигнал [14-16]. В термостатах і автоматичних регуляторах температури деформація біметалічної пластини використовується для автоматичного замикання або розмикання електричного кола, через який електрична потужність подається у нагрівач. Біметалічна пластина виконує функції не тільки чутливого елемента, але і актора (вимикача електричного кола). Деформацію біметалічної пластини можна використовувати і для перетворення засобами точної механіки у кутовий рух об'єкта, наприклад, у відхилення стрілки термометра (Рис. 3.1).

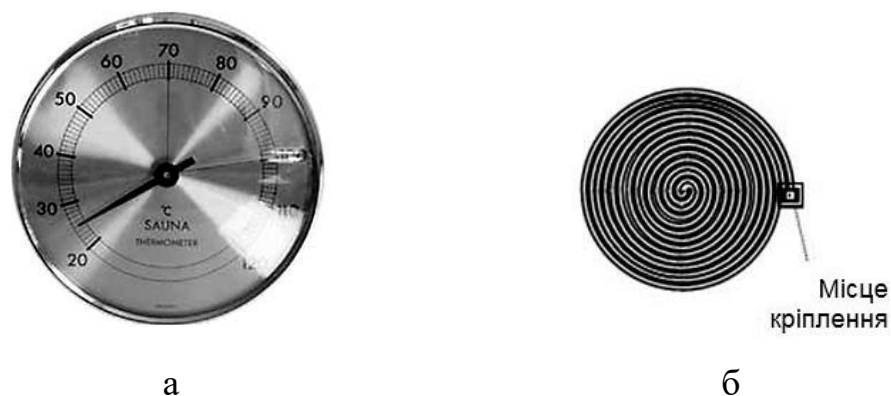


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд спірального біметалічного термометра (а) та його чутливого елемента (б)

При вимірюваннях тиску рідини або газу як чутливі елементи часто використовують механічні пристрої, які деформуються під дією тиску: трубки Бурдона, сильфони та пружні мембрани (Рис.3.2).

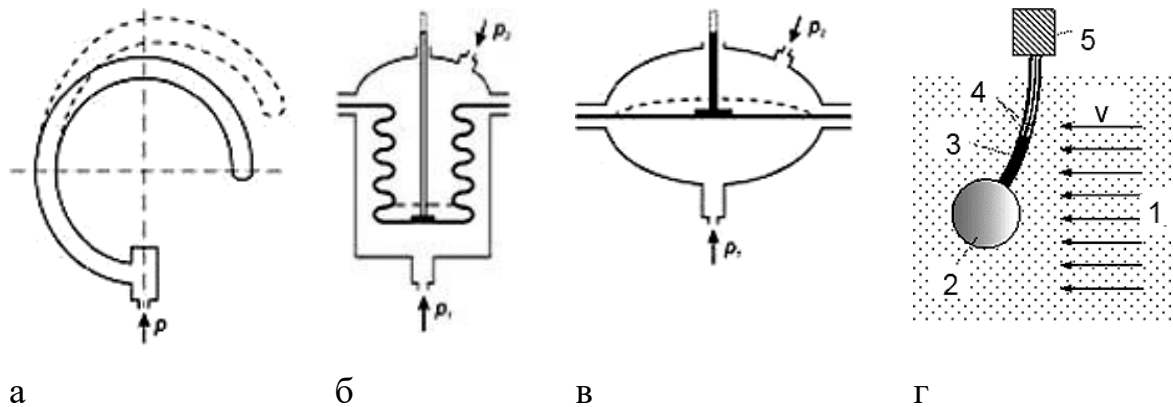


Рис. 3.2. Принцип дії механічних сенсорів, чутливих до тиску: трубки Бурдона (а); сільфона (б); мембрани (в); сенсора швидкості течії (г)

Трубка Бурдона (Рис. 3.2 а) - це порожня всередині пружна трубка з овальним або прямокутним (тільки не круговим) перерізом, зігнута в кільце. Вільний кінець трубки герметично закритий, а інший кінець механічно закріплений і має отвір з об'ємом, в якому вимірюється тиск. Коли тиск усередині трубки перевищує зовнішній тиск, то трубка починає розкручуватися. Рух вільного кінця трубки через відповідний механізм перетворюється в механічний, електричний, оптичний або інший сигнал сенсора тиску.

Сильфон (Рис.3.2 б) — це еластична гофрована трубка, всередині та зовні якої створюється різний тиск: одне значення є опорним, інше вимірюється. Чим більше різниця між тиском всередині та зовні, тим більше сильфон розтягується. Завдяки гофрованим складкам деформація сильфона не приводить до втрати герметичності. На рухомому торці закріплюють шток, який перетворює деформацію сильфона в лінійне переміщення. Сильфони використовують в сенсорах диференціального тиску, як деформаційні чутливі елементи, які реагують на прикладену силу.

Мембрана - це тонка пружна гнучка перегородка між двома об'ємами (Рис.3.2 в), яка вигинається у напрямі зменшення тиску. Діапазон вимірюваної різниці тиску залежить від коефіцієнта пружності мембрани. У механічних

перетворювача первинного сигналу в лінійне переміщення до місця найбільшого прогинання кріплять шток, який приводить в дію механізм відліку диференціального тиску.

Деформаційний чутливий елемент сенсора швидкості течії (Рис.3.2 г) складається з мішені 2, на яку поступає рідина або газ 1, що закріплюється на гнучкій пружній ніжці 3, на яку діє сила, пропорційна квадрату швидкості потоку. Інший кінець ніжки з'єднується з нерухомою опорою 5. Чим більше швидкість потоку, тим більше вигинається ніжка. Цей первинний сигнал деформації перетворюється на електричний сигнал.

На рис. 3.3 приведені конструкції чутливих елементів сенсора, розробленого Motorola, Inc. [13]. Їх відміна полягає у тому, що на мембрану чутливого елемента диференціального сенсора діє два зовнішні тиски, а в абсолютному тільки один.

Функціонування чутливого елемента (Рис. 3.4) ґрунтується на п'єзоре-зистивному ефекті, що обумовлений зміною питомого електроопору провідника (металу, напівпровідника) в наслідок його деформації. Це спричиняє зміну структури енергетичних зон кристала. Як наслідок змінюється концентрація носіїв струму (електронів провідності, дірок), їхня ефективна маса, а також перерозподіл носіїв заряду між енергетичними максимумами в зоні провідності та мінімумами у валентній зоні.

### **3.2 Застосування мікросистемних технологій**

При застосуванні мікросистемних технологій простіше всього реалізувати мембрани. Безпосередньо в кремнієвій мембрані формують тензорезистори, які перетворюють механічну деформацію в електричні сигнали, а у тому ж кристалі кремнію виготовляють мікросхеми для обробки сигналів. За такою технологією, наприклад, створюють мініатюрні датчики тиску в автомобільних шинах (Рис.3.5) [17]. Інформація від сенсорів передається в центральний блок індикації та сигналізації за допомогою локального мікрохвильового радіозв'язку. Кожний датчик створює закодований радіосигнал, тому інформація від них передається

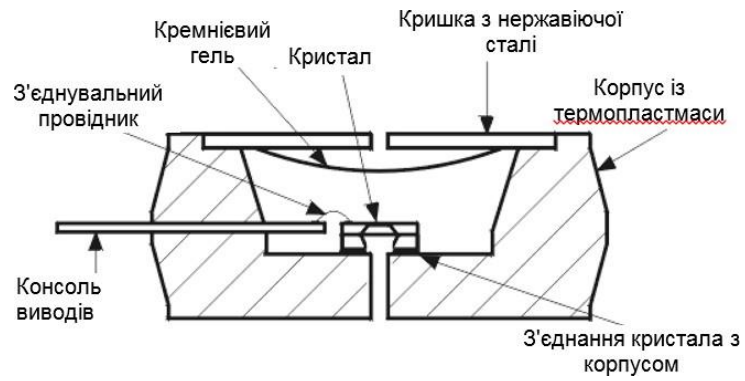


Рис. 3.3. Поперечні перерізи базового корпусу датчика диференціального тиску

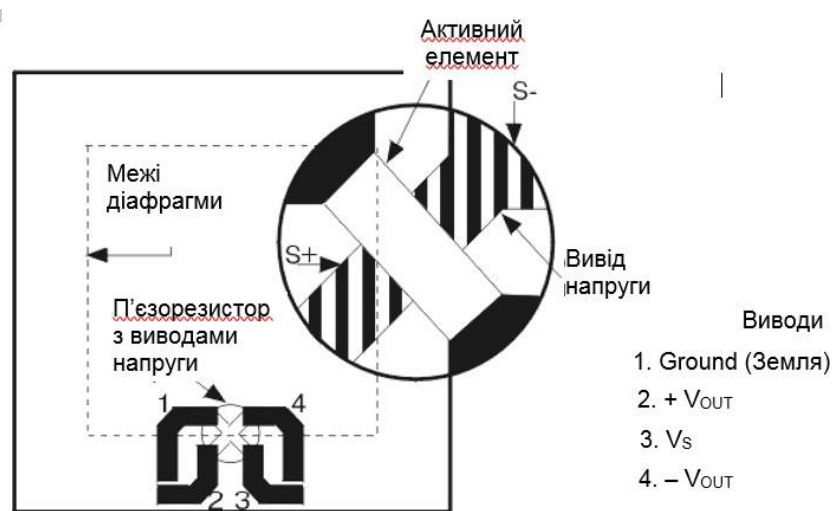


Рис. 3.4. Чутливий елемент X-ducer

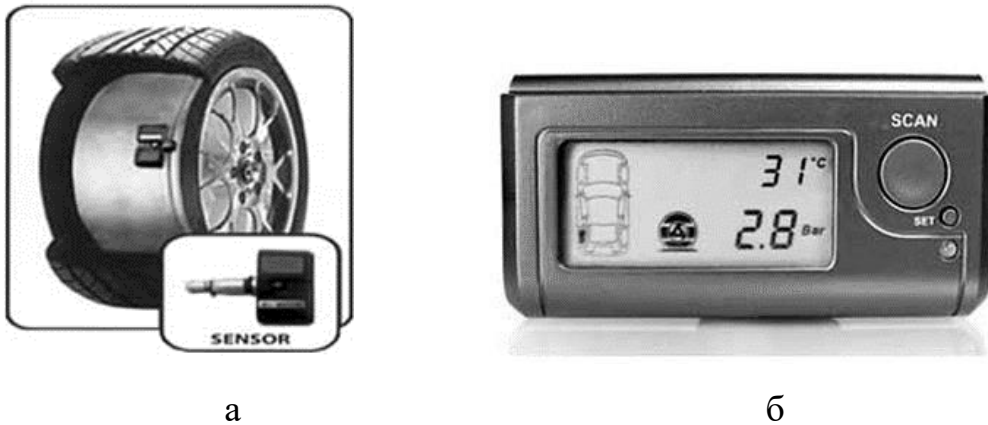


Рис. 3.5. Система контролю тиску в шинах автомобілів: а – сенсор тиску (маса 3 г, довговічність елемента живлення: 5 років); б – центральний блок індикації та сигналізації

незалежно. Центральний блок з мікрокомп'ютером є інтелектуальною частиною сенсора. Наприклад, у США з 2009 р. діє нормативний документ про те, що всі автомобілі масою понад 4,5 т повинні мати системи моніторингу тиску в шинах, що є вимогою безпеки руху.

Іншим прикладом компактного інтелектуального сенсора з деформаційними чутливими елементами може бути прецизійний цифровий манометр тиску DPI 740, наведений на рис. 3.6 а, [14]. За його допомогою можна вимірювати атмосферний тиск від 75 до 1250 кПа і абсолютний тиск хімічно неагресивного газу в межах від 3 кПа до 360 кПа. Інший приклад - портативні цифрові калібратори тиску РМ110 (рис. 3.6 б) для перевірки та калібрування засобів вимірювання тиску. До їх складу входить ручний насос з точним регулюванням тиску і вимірювач температури для термокомпенсації погрешностей вимірювання, а також вбудована пам'ять та інтерфейс зв'язку із зовнішнім комп'ютером.

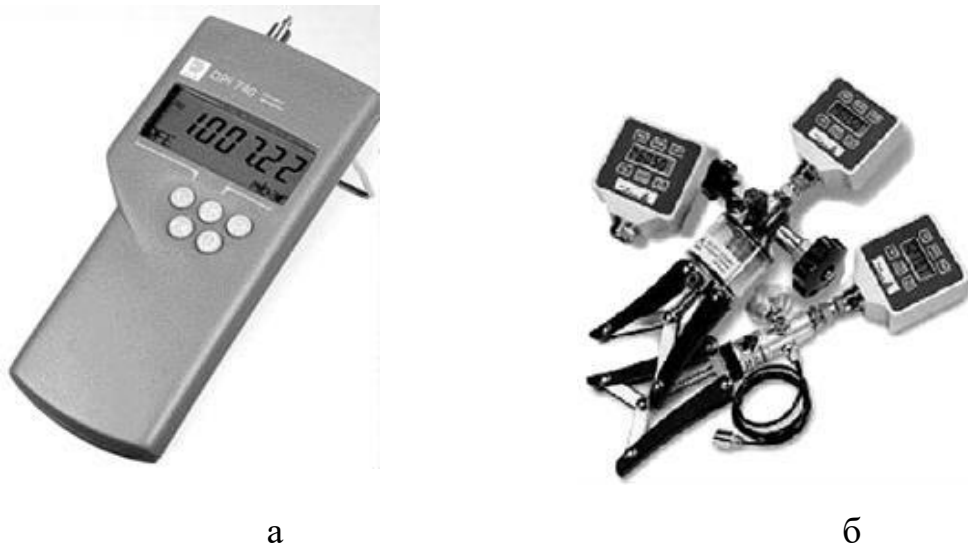
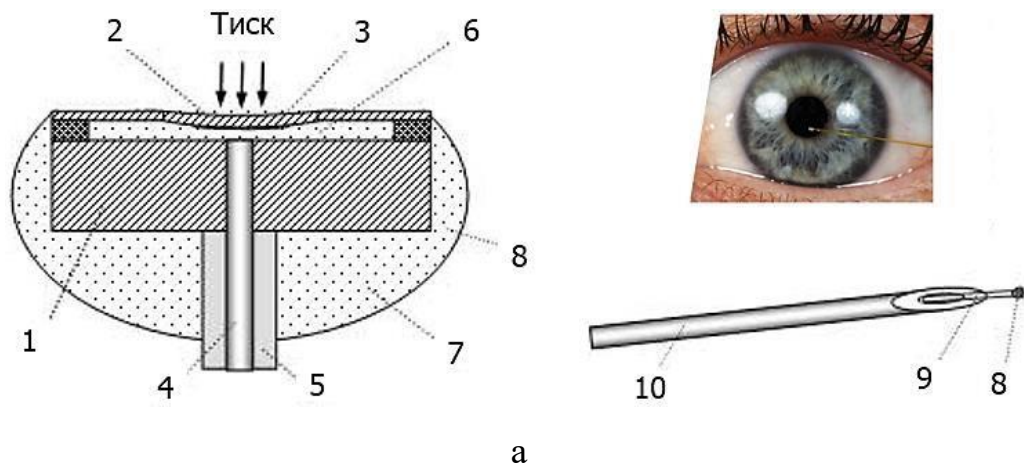


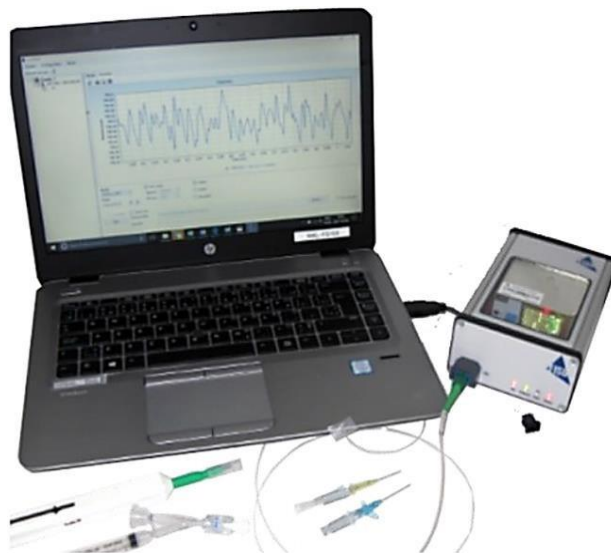
Рис. 3.6. Прецизійні цифрові манометри тиску: а – DPI 740 (габарити 190x90x36 мм, маса 0,5 кг; діапазон робочих температур від мінус 10 до +50°C; клас точності 0,02%; б – PM110L і PM110H (габарити 98x92x33 мм, маса 0,5 кг; діапазон робочих температур від мінус 10 до +50°C; клас точності 0,05%)

Мікромініатюрний мембранний датчик тиску зображений на рисунку 3.7. Він складається з підкладки 1, мембрани 2, на яку знизу нанесена дзеркальна плівка 3. На торці оптичного волокна 4 нанесено напівпрозорий дзеркальний шар. Між ним і плівкою 3 утворюється оптичний резонатор, що знаходиться всередині герметично закритої порожнини 6, заповненої газом. Якщо тиск ззовні мембрани перевершує тиск в порожнині 6, то мембрана дещо прогинається всередину, і відстань між нею і волокном зменшується. Через оптичне волокно в резонатор вводиться монохроматичне світло. Як приклад на рис.3.7 показаний чутливий елемент із діаметром 0,55 мм, що випускається фірмою FISO Technologies. За допомогою голки-катетера 10 цей мініатюрний сенсор тиску 8 та гнучке оптичне волокно 9 можна ввести в досліджуваний простір і контролювати внутрішній тиск. В медицині, наприклад, такі сенсори застосовують для контролю внутрішньоочного та внутрішньочерепного тиску, а також тиску крові в легеневих артеріях та інших органів людини.





а



б

Рис. 3.7. Конструкція та загальний вигляд деформаційного елемента, який працює за принципом інтерферометра Фабрі-Перо (а) та вимірювач тиску на його основі (б) [16]

Авторами роботи [17] розглядається волоконно-оптичний інтерферометричний датчик Фабрі-Перо (CFPI), здатний одночасно вимірювати високу температуру та деформацію. Датчик CFPI складається з внутрішнього інтерферометра Фабрі-Перо з кремнеземною порожниною (IFPI), який каскадує зовнішній інтерферометр Фабрі-Перо з повітряною порожниною (EFPI). IFPI створюється на кінці одномодового волокна передачі (SMF) шляхом з'єднання опто-кристалічного волокна (PCF) з SMF, а потім IFPI вставляється в кварцовий капіляр із поверхнею, що відбиває, щоб утворити одно-закінчився ковзний EFPI. У такій конфігурації IFPI чутливий лише до температури, а EFPI чутливий до деформації, що дозволяє досягти вимірювання деформації з температурною компенсацією. Запропонований датчик має гарну стійкість до високих температур до 1000 °С. Вимірювання деформації за високих температур демонструє придатність для високих температур і стабільну реакцію на деформацію. Завдяки іскробезпеці, компактній структурі та невеликому розміру запропонований датчик CFPI може знайти важливе застосування в умовах роботи при високих температурах.

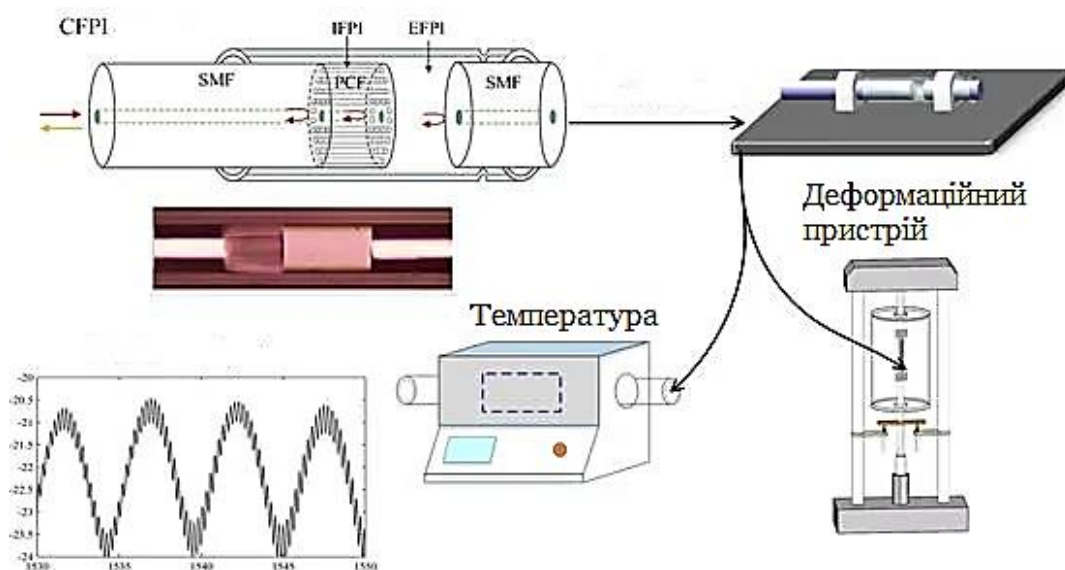


Рис.3.8. Конструкція та схема підключення волоконно-оптичного інтерферометричного датчика. Адаптовано із роботи [17]

Гнучкі тензодатчики, що приєднуються до шкіри, є важливим компонентом у розробці штучних систем, які можуть імітувати складні характеристики людського організму. Загалом такі датчики містять ряд схем або складних багатошарових матриць. У роботі [18] представлена проста архітектура для гнучкого та високочутливого датчика деформації, який дозволяє виявляти тиск, зсув і кручення. Пристрій базується на двох з'єднаних масивах полімерних нановолокнах із платиновим покриттям із високим співвідношенням сторін, які тримаються на тонких шарах полідиметилсилоксану. Коли застосовуються різні сенсорні подразники, ступінь взаємозв'язку та електричний опір датчика змінюється зворотно, спрямовано зі специфічними, помітними тензометричними факторами. Реакція датчика має високу повторюваність і відтворюваність до 10 тисяч циклів в режимі ввімкнення/вимкнення. Датчики такого типу використовуються в широкому діапазоні: для моніторингу сигналів від серцебиття людини до ударів краплі води, що відскакує, на супергідрофобну поверхню.

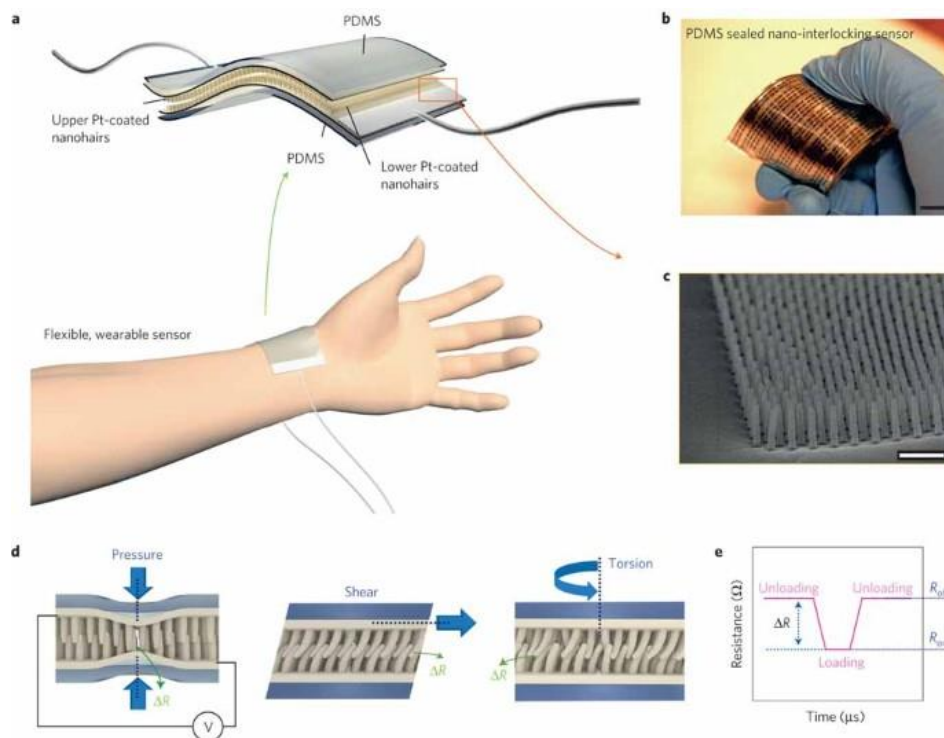


Рис.3.9. Конструкція, схема підключення та пояснення принципу роботи гнучкого тензодатчика, що приєднуються до шкіри людини. Адаптовано із роботи [18]

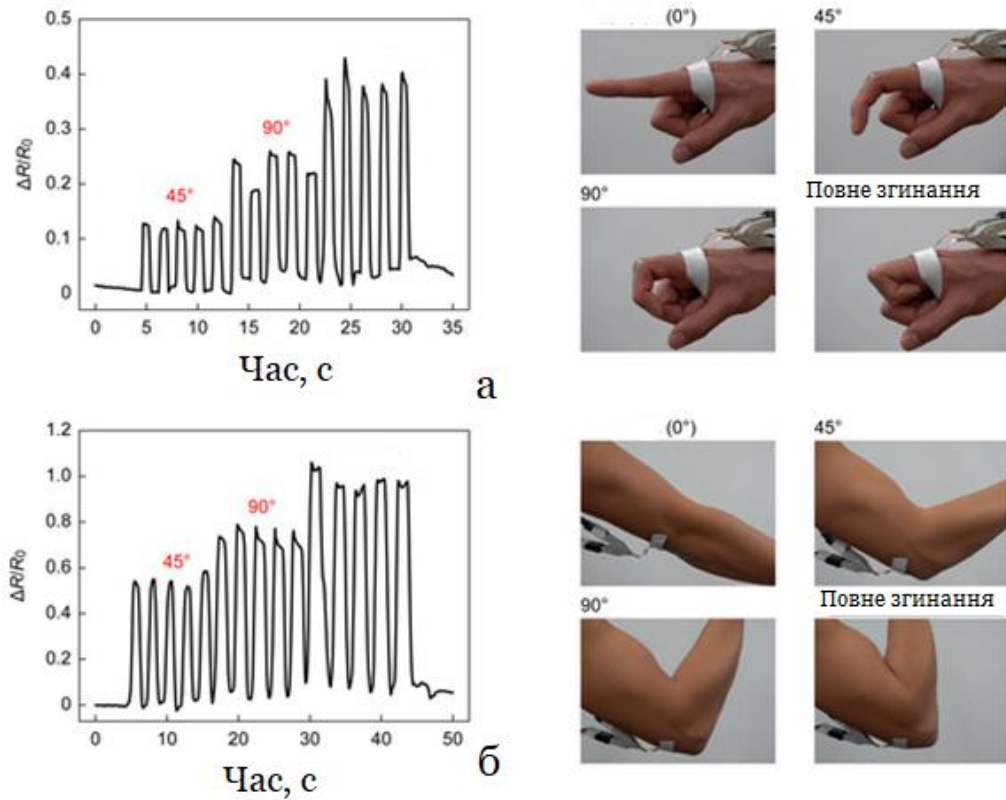


Рис. 3.10. Розтягувальний датчик деформації для біометричних вимірювань та відповідні часові залежності відносної зміни опору для пальців (а) та руки (б). Адаптовано із роботи [19]

На рисунку 3.10 наведена конструкція та робочі характеристики деформаційних датчиків розтягування (деформація до 100%) на основі рідких металів (евтектичний сплав галію та індію) та гнучкого силіконового каучука (Esoflex) як матеріалу підкладки. Гель Esoflex має досить велику силу зчеплення зі шкірою, хоча сила зчеплення менша, ніж у комерційно доступних клеїв. Це дозволяє використовувати датчик для неінвазивного моніторингу руху людини. Експериментально оцінені механічні та електричні властивості датчика. Ефективність запропонованих датчиків демонструється моніторингом рухів суглобів, міміки та дихання.

### 3.3 Методика вимірювання тензорезистивного ефекту

Тензорезистивні властивості металевих плівок на тефлонових підкладках в області пружної і пластичної деформації в Лабораторії мікро- і наноелектроніки кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики досліджували за допомогою деформаційного пристрою, сконструйованого на базі мікрометра (Рис.3.11). При дослідженні поздовжньої тензочутливості необхідно мати на увазі, що у процесі деформації до 2% відносна зміна опору плівкових зразків складає величину  $\sim 1-10\%$ , тому при використанні спеціальних масок, формувалася сходинкоподібна (2 - 3 ступені) геометрія контактів (плівок Cu 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. Розміри плівки витримувалися постійними (довжина  $l = 15$  мм, ширина  $a = 5$  мм).

Вимірювання проводились за допомогою автоматизованої системи, що дало можливість здійснити велику кількість деформаційних циклів у статичному і динамічному режимах роботи при швидкості деформації від 0 до  $0,1\%/с$ . 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 експериментальних даних (прикладі деформаційних залежностей наведені на рис.3.13 – 3.15) були розраховані усереднені по деформаційному інтервалу значення КТ в залежності від номера деформаційного циклу для плівок Mo, W, Fe, Ni і Cr (Табл. 3.1), які підтверджують висновок, що, починаючи із

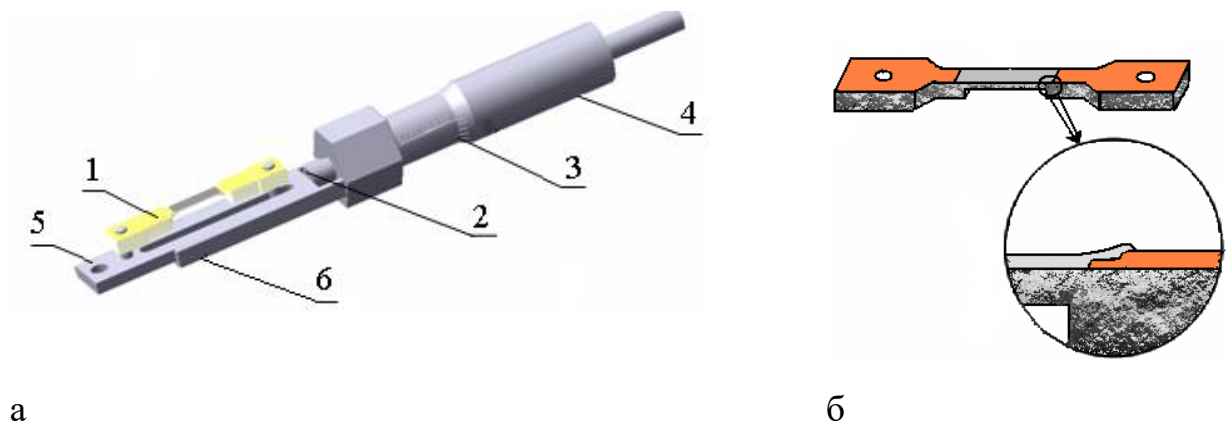


Рис.3.11. Схема деформаційного пристрою (а) та підкладки (б): 1 – закріплена підкладка; 2 – рухомий шток; 3 – мікрометрична шкала; 4 – мікрогвинт; 5 – повзун; 6 – поздовжня напрямна повзуна

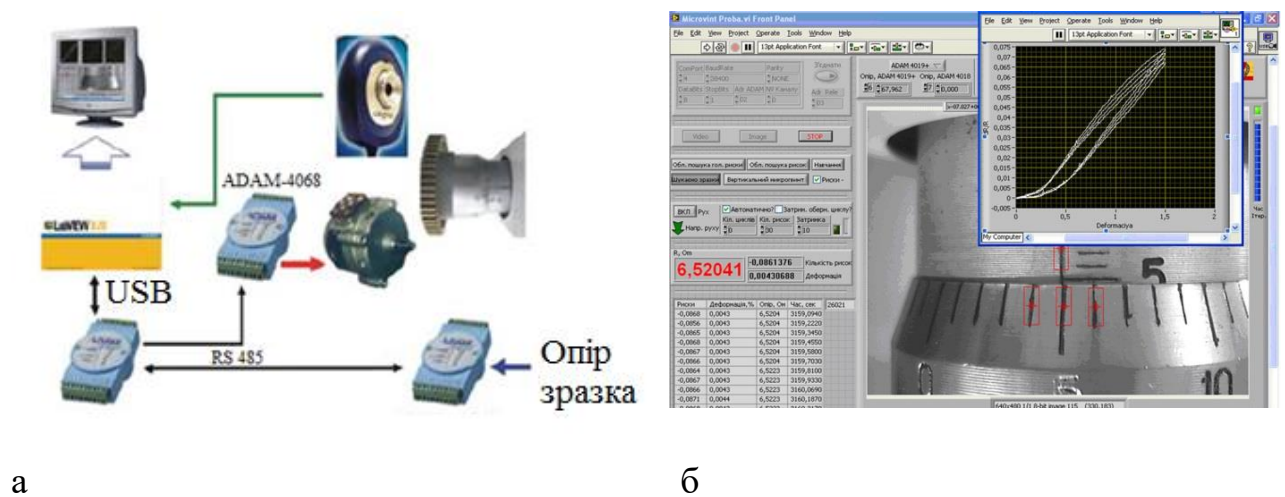


Рис. 3.12. Схема автоматизованої системи для вимірювання КТ (а) та інтерфейс програмного забезпечення (б)



III – V деформаційних циклів, ці процеси завершуються і КТ залежить лише від товщини незалежно від номера деформаційного циклу.

При зростанні товщини величина КТ поступово зменшується і виходить на асимптотичне значення. Отримані результати показують, що в плівках при пружній деформації до 1 % всі релаксаційні процеси (частковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та іноридних атомів) відбуваються, в основному, після першого деформаційного циклу [20].

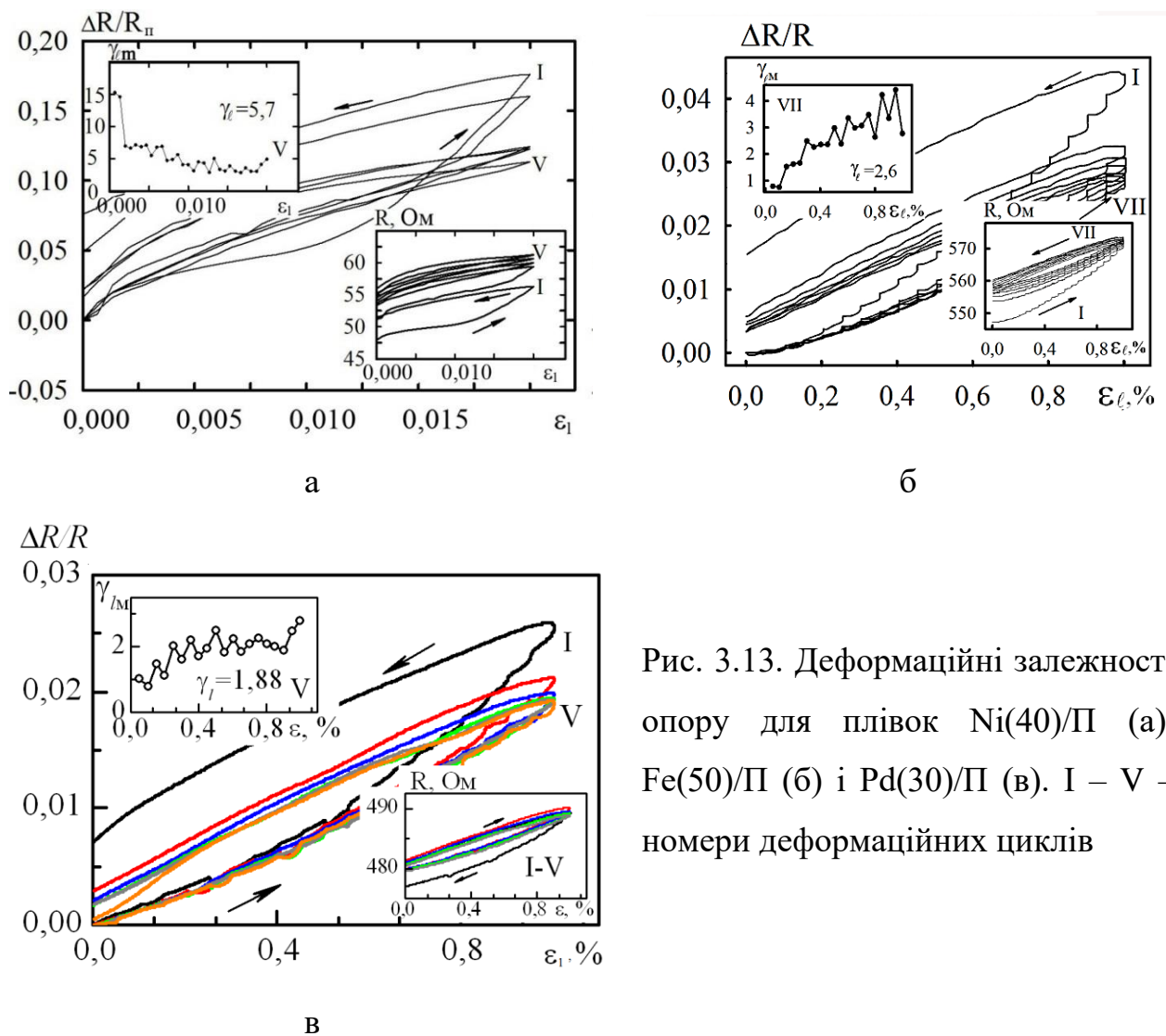


Рис. 3.13. Деформаційні залежності опору для плівок Ni(40)/П (а), Fe(50)/П (б) і Pd(30)/П (в). I – V – номери деформаційних циклів

Таблиця 3.1. Результати розрахунків коефіцієнтів тензочутливості тонких металевих плівок

Плівка, (товщина, нм)	$\gamma_I$					Плівка, (товщина, нм)	$\gamma_I$				
	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V
Mo(20)	38,2	14,5	13,9	13,6	13,7	Ni(20)	13,6	7,6	5,9	5,6	5,8
Mo(40)	32,3	13,6	9,8	9,4	8,9	Ni(40)	11,2	6,2	5,8	4,0	3,8
Mo(60)	30,8	12,8	7,6	7,3	7,4	Ni(60)	10,5	5,6	3,9	3,5	3,3
Mo(90)	29,2	12,3	7,2	6,8	6,5	Ni(80)	9,4	5,8	3,8	3,0	3,1
Mo(100)	28,9	11,2	6,6	6,4	6,3	Ni(100)	8,9	4,2	3,8	2,9	2,8
W(20)	53,6	25,3	20,7	21,1	20,4	Fe(20)/II	14,4	7,6	6,2	5,2	4,6
W(45)	42,3	23,1	13,8	12,2	12,6	Fe(50)	9,8	5,2	4,2	3,6	3,2
W(60)	36,2	12,3	11,8	11,3	10,9	Fe(65)	8,7	6,1	5,6	3,4	3,1
W(80)	32,3	13,1	9,8	9,1	9,2	Fe(80)	7,9	4,2	3,2	3,1	3,0
W(100)	26,2	15,3	10,8	9,3	9,1	Fe(100)	8,5	4,1	3,6	2,9	2,7
Cr(20)	12,6	5,7	4,8	3,8	3,5	Cr(75)	8,7	3,9	3,3	2,3	2,4
Cr(40)	11,7	5,4	3,9	3,3	3,0	Cr(90)	6,5	4,2	3,1	2,4	2,3
Cr(60)	10,2	5,9	3,5	3,0	2,8	Cr(115)	6,5	4,2	3,1	2,4	2,2

На основі проведених розрахунків (Таблиця 3.1) можна зробити висновок про те, що особливістю деформаційних залежностей є відмінність I-го деформаційного циклу «навантаження – зняття навантаження» у діапазоні деформацій 0 - 1 % від подальших, що пояснюється протіканням різних релаксаційних процесів. При подальших циклах спостерігається певна стабілізація тензорезистивних властивостей плівкових систем. Основну увагу при дослідженні тензоефекту слід приділяти I-му деформаційному циклу, оскільки саме при його реалізації проявляється механізм переходу від пружної до пластичної деформації. При цьому величина деформації переходу залежить від товщини плівки, зменшуючись з товщиною.



## ВИСНОВКИ

1. Кваліфікаційна робота магістра присвячена вивченню фізичних основ роботи, конструктивно-технологічних, електричних параметрів та робочих характеристик тензорезистивних перетворювачів і датчиків деформацій як компонент механічних та електронних систем.
2. Пояснена причина того, що властивості матеріалів дуже чутливі до зміни товщини плівки і розміру кристалітів, концентрації домішкових атомів і дефектів кристалічної будови, дії деформації, що обумовлює ряд структурних, розмірних фазових і концентраційних ефектів.
3. Сучасні тензорезистивні вимірювальні перетворювачі конструктивно представляють собою тензорезистор, чутливий елемент якого виконаний з тензочутливого матеріалу (плівки, дроту, фольги та ін.), сформованого на підкладці, яка розташована між чутливим елементом і деталлю, та захисний елемент, розташований поверх чутливого елемента.
4. Деформаційні інтелектуальні датчики розробляються при застосуванні мікросистемних технологій. Вони можуть бути реалізовані у вигляді мембран, в яких безпосередньо формують тензорезистори для перетворення механічної деформації в електричні сигнали.
5. На основі експериментальних деформаційних залежностей опору розраховані усереднені за деформаційним інтервалом значення коефіцієнтів тензочутливості залежно від номера деформаційного циклу для плівок Mo, W, Fe, Ni і Cr, які підтвердили висновок про те, що в плівках при пружній деформації до 1 % всі релаксаційні процеси (частковий поворот зерен, мікропластична деформація, перерозподіл і рух дефектів кристалічної будови та інорідних атомів) відбуваються, в основному, після першого деформаційного циклу. Величина коефіцієнтів тензочутливості для одношарових металевих плівок від 2,2 до 13,7 одиниць.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проценко І.Ю., Шумакова Н.І. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів: навч. пос. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 198 с.
2. Проценко С.І., Черноус А.М. Дослідження і прогнозування тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2003. – Т. 25, № 5. – С. 587–601.
3. Flexible thin film temperature and strain sensor array utilizing a novel sensing concept / D. J. Lichtenwalner, A. E. Hydrick, A.I. Kingon // *Sens. Actuat. A.* – 2007. – V. 135, № 2. – P. 593-597.
4. Characterization of thick resistor series for strain sensors / M. Hrovat D. Belavic, Z. Samardzija // *J. Europ. Ceram. Soc.* – 2001. – V. 21. – P. 2001 – 2004.
5. Елементи інтелектуальної радіоапаратури. Пристрої мікросистемної техніки [Електронний ресурс]: навч. посіб. / С. М Перегудов, Ю. Ф. Адаменко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 11,08 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 195 с.
6. Мікро- і наноелектромеханічні системи: базові принципи проектування явищ, матеріалів та елементів: навч. посіб. / П. Кособуцький, М. Лобур, В. Каркульовський – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2017. – 400 с.
7. Комп'ютерні методи в інженерії мікроелектромеханічних систем: навч. посіб. / Н. Яворський, В. Теслюк, Є. Литвинова. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 280 с.
8. Невлюдов І. Ш., Палагін В.А. Мікросистемна техніка та нанотехнології: монографія. – К.: ВИДАННЯ., 2017. –528 с.
9. Розширене проектування мікросистемних пристроїв: навч. посіб. / В. Теслюк, А. Зелінський, В. Каркульовський, Я. Василюк – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2016. – 252 с.
10. Войтович І. Д., Корсунський В.М. Інтелектуальні сенсори. – Київ: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2007. – 513 с.
11. Products. Sensors and MEMS. Analog Devices: Website. URL: <https://www.analog.com/en/product-category/sensors- mems.html>.

12. MEMS: introduction and fundamentals (Mechanical engineering series) / edited by Mohamed GadElHak. – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 469 p.
13. Theodore S. Rappaport. Millimeter Wave Wireless Communications / Theodore S. Rappaport, Robert W. Heath Jr., Robert C. Daniels, James N. Murdock – Prentice Hall, 2014. – 657 p.
14. Zhu, C.; Chen, Y.; Zhuang, Y.; Huang, J. Displacement and Strain Measurement up to 1000 °C Using a Hollow Coaxial Cable Fabry-Perot Resonator // Sensors. – T.18. - 2018. – P.1304.
15. Maskay, A.; da Cunha, M.P. High-temperature static strain langasite SAWR sensor: Temperature compensation and numerical calibration for direct strain reading. Sensor Actuat A-Phys. – 2017, 259, 34–43.
16. Xiong, L.; Guo, Y.; Jiang, G.; Zhou, X.; Jiang, L.; Liu, H. Six-Dimensional Force/Torque Sensor Based on Fiber Bragg Gratings with Low Coupling. IEEE Trans. Ind. Electron. 2021. – V.68. – P.4079–4089.
17. Ping Xia, Yuegang Tan, Caixia Yang, Zude Zhou, Kang Yun, Cavity Structure for Simultaneous Measurement of High Temperature and Strain // Sensors. – 2021. – V.21(15), 4989; <https://doi.org/10.3390/s21154989>
18. Changyun Pang, Gil-Yong Lee, Tae-il Kim, Sang Moon Kim, Hong Nam Kim, Sung-Hoon Ahn, Kahp-Yang Suh, A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres // Nature Materials. – 2012. V.11. – P. 795–801. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22842511/>
19. Takaaki Nishikawa, Hisaya Yamane, Naoji Matsuhisa, Norihisa Miki Stretchable Strain Sensor with Small but Sufficient Adhesion to Skin // Sensors. - 2023. – V.23(4). – P.1774. <https://doi.org/10.3390/s23041774>
20. Symonenko M.H., Tolstikov D.I., Odnodvoretz L.V Fiber-Optic strain sensors in control and diagnostic of electronic systems / Програма і матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2024». Суми: Сумський державний університет. – 2024. – С.96-97.