

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова

ДАТЧИКИ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

**Рекомендовано вченою радою
Сумського державного університету
як навчальний посібник для
студентів спеціальності
„Електронні прилади і пристрої”
денної та заочної форм навчання**

СУМИ ВИД-ВО СУМДУ 2003

ПЕРЕДМОВА

Стрімкий розвиток електроніки і обчислювальної техніки дозволив здійснювати широку автоматизацію різних процесів у промисловості, сфері наукових досліджень, у повсякденному житті. Реалізація цієї автоматизації значною мірою визначається можливістю пристроїв отримувати інформацію про певний параметр або процес, які називаються датчиками. Застосування датчиків не обмежується лише автоматизованими системами, оскільки вони можуть виконувати також функції елементів вимірювальних систем.

У вузькому розумінні до датчика відносять основні вузли електричної схеми для вимірювання неелектричних величин. При такому означенні необхідний перетворювач неелектричної величини в адекватний їй електричний сигнал не належить до датчика (це “вимірювальний перетворювач”). У зв’язку з цим ми під датчиком будемо розуміти сукупність “датчика” у вузькому розумінні і “вимірювального перетворювача”, тобто датчик – це надійний приймач з перетворювачем вимірювальної величини.

Останніми роками розвинувся самостійний напрям вимірювальної техніки – сенсорика, яка об’єднує техніку конструювання, виготовлення і застосування датчиків.

За своєю структурною будовою датчики нагадують таку ж біологічну систему, як людина. Наприклад, датчики газів, температури, випромінювання і т.ін. відіграють роль таких видів чуття, як нюх, дотик, зір і т.д. (отримання сигналу); запам’ятовуючий пристрій ЕОМ відіграє роль людської пам’яті (обробка сигналу); подібна аналогія має місце і при перетворенні сигналу.

Сполучення датчик - ЕОМ- виконуючий пристрій являє собою інформаційно-сенсорну систему. Для спрощення спряження датчика з міні-ЕОМ було б краще, якби датчик видавав цифрову інформацію. Але в природі і техніці інформація існує в основному у вигляді аналогових

величин, які трансформуються в цифрові за допомогою аналого-цифрового перетворювача.

Технологія виготовлення датчиків подібна до відомих способів виготовлення напівпровідникових інтегральних схем (таблиця 1).

Таблиця 1-Основні види технологій виготовлення масивних і плівкових датчиків, сумісних із мікроелектронікою

Кремнієва технологія	Тонкоплівкова технологія	Товстоплівкова технологія
Вхідні величини		
Зміна довжини	Зміна довжини	Зміна довжини
Температура	Температура	Температура
Магнітне поле	Магнітне поле	Магнітне поле
Світло, ІЧ-випромінювання	Світло, ІЧ-випромінювання	Ємність
Склад і концентрація газу	Склад і концентрація газу	-
-	Ємність	-

Слід зазначити, що усі три види технологій дозволяють виготовляти датчики з високою стабільністю, допускають мініатюризацію, високу рентабельність виробництва при малих витратах, а в останніх двох випадках і широкий температурний інтервал функціонування датчиків.

Завданням даного курсу лекцій є ознайомлення студентів з основами сенсорики, викладеної в монографії Г.Віглеба [1], яка стала бібліографічною рідкістю. Оскільки за 12 років після видання цієї книги з'явилася велика кількість оригінальних наукових публікацій, то автори поставили за мету доповнити зміст роботи [1] сучасними даними із області плівкової сенсорики. Поряд з цим вони розуміють, що даний технічний напрям розвивається настільки бурхливо, що ознайомити студентів з його досягненнями можливо лише у процесі читання лекцій.

РОЗДІЛ 1 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

Вступ

Одним із основних видів датчиків є датчики температури, оскільки вони мають широке застосування як у техніці і науці, так і у повсякденному житті. При використанні таких датчиків температура вимірюється на основі температурної залежності опору терморезистора як робочого елемента датчика.

До основних робочих характеристик (параметрів) відносять термічний коефіцієнт опору (ТКО) (β), чутливість (S) і питому чутливість (S_n), які означаються таким чином:

$$\hat{a}_R = \frac{1}{R_n} \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad \text{або} \quad \hat{a}_n = \frac{1}{\hat{r}_n} \frac{\Delta \hat{r}}{\Delta T}, \quad (1.1)$$

де R_n , ρ_n – початковий опір (R) або початковий питомий опір (ρ);

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad \text{і} \quad S_n = \frac{d \ln R}{d \ln T} = \frac{T}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}. \quad (1.2)$$

Слід мати на увазі, що β_R і β_ρ з великою точністю (до (0,1-1)%) збігаються, і тому їх можна не розрізняти і позначати просто символом β . Очевидно також, що за умови $\Delta T \rightarrow 0$ співвідношення (1.1) і (1.2) можна переписати так:

$$\hat{a} = \frac{1}{R_n} \frac{dR}{dT}, \quad S = \frac{dR}{dT}, \quad S_n = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}. \quad (1.3)$$

При використанні металевих терморезисторів (масивні чи плівкові зразки) ТКО завжди додатний, у той час як у напівпровідникових – ТКО має як додатну, так і від'ємну

величину. Основні фізичні уявлення про природу електричного опору викладені у роботах [2,3].

У випадку масивного металевого терморезистора (фольга, дріт) опір R виникає в результаті розсіювання електронів провідності на фонах і дефектах кристалічної будови (вакансії, інорідні атоми, дислокації, дефекти пакування, межі зерен). Оскільки опір, пов'язаний із розсіюванням електронів на дефектах, не залежить від температури (це т.зв. залишковий опір), то температурнозалежна частка опору буде визначатися електрон-фононним розсіюванням, яке, в свою чергу, можна пов'язати із транспортною середньою довжиною вільного пробігу (СДВП) λ_0 . У зв'язку з цією обставиною ТКО можна подати і у такому вигляді:

$$\hat{a} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\ddot{A} \ddot{e}_0}{\ddot{e}_0 \ddot{A}_T}, \quad (1.4)$$

де знак “-” враховує, що при збільшенні температури СДВП зменшується, тобто $\Delta\lambda_0 < 0$ при $\Delta T > 0$ ($\Delta\lambda_0 \cong \Delta\lambda_{0\phi}$, де індекс “ ϕ ” означає зміну λ_0 за рахунок зміни фононного спектру).

Напівпровідникові датчики можуть мати як додатний, так і від'ємний ТКО (їх інколи позначають відповідно РТС або НТС). Додатна величина ТКО спостерігається лише при відносно низьких температурах (менших від кімнатної температури), при яких зонна будова напівпровідника не відіграє ролі, і провідність відбувається за рахунок електронів (дірок), які знаходяться в зоні провідності (валентній зоні). Однак при збільшенні температури вступає в дію власна провідність і питомий опір зменшується за експоненціальним законом

$$\tilde{n} = \tilde{n}_0 e^{\frac{\Delta\epsilon}{2kT}}, \quad (1.5)$$

де $\Delta\epsilon$ - ширина забороненої зони.

Попереднє співвідношення можна подати через питому провідність ($\sigma \equiv \tilde{n}^{-1}$) у лінеаризованому вигляді

$$\ln \bar{\sigma} = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta \epsilon}{2kT}. \quad (1.5')$$

Температурна залежність провідності домішкового напівпровідника описується співвідношенням, аналогічним до (1.5'):

$$\ln \bar{\sigma} = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta \epsilon}{2kT} + \ln \sigma'_0 - \frac{\Delta \epsilon_{n,p}}{2kT}, \quad (1.6)$$

де $\Delta \epsilon_{n,p}$ – відстань між домішковою n- зоною і дном зони провідності або між домішковою p-зоною і стелею зони валентності власного напівпровідника.

При переході до тонкоплівкових тензорезисторів проявляють себе такі нові механізми розсіювання електронів або дірок.

По-перше, надзвичайно велику роль починає відігравати зерномежеве розсіювання носіїв електричного струму, кількісною характеристикою якого є коефіцієнт проходження межі зерна (r), який буде змінювати свою величину на Δr при збільшенні температури. Відмітимо, що в масивних терморезисторах зерномежеве розсіювання практично не відіграє ролі, оскільки кристалічні зерна мають великі розміри (~ 1 мкм) у порівнянні із плівковими матеріалами ($\sim 0,1$ мкм), і площа межі зерен виявляється відносно малою.

По-друге, у тонких плівкових зразках суттєву роль відіграє також поверхневе розсіювання носіїв електричного струму, кількісною характеристикою якого є коефіцієнт дзеркальності зовнішніх поверхонь плівки (p), який також буде змінюватися на Δp при збільшенні температури. Підкреслимо, що роль поверхневого розсіювання збільшується у міру зменшення товщини.

І, нарешті, відмітимо, що у випадку багаточарових плівкових терморезисторів з'являється новий механізм розсіювання носіїв, який пов'язаний із межою поділу окремих

шарів і характеризується, як і у випадку зерномежового розсіювання, коефіцієнтом проходження Q , який також буде змінюватися на ΔQ при змінюванні температури.

Якщо подати співвідношення для ТКО плівкового терморезистора у вигляді (1.4), то необхідно мати на увазі, що зміну СДВП слід записати таким чином:

$$\Delta\lambda_0 = \Delta\lambda_{0\phi} + \Delta\lambda_{0r} + \Delta\lambda_{0p} + \Delta\lambda_{0Q}, \quad (1.4')$$

де чотири доданки у правій частині пов'язані із зміною λ_0 при зміні фононного спектру або коефіцієнтів r , p і Q в результаті зміни температури. Оскільки ефект ТКО нами аналізується у загальних рисах, то за рамками аналізу залишається питання про знак кожного із доданків у співвідношенні (1.4').

1.1 Датчики температури із платини і нікелю [1, 4, 5]

Серед багатьох методів вимірювання температури найбільше застосування в таких галузях промисловості, як металургійній, хімічній, машинобудівній, нафтопереробній та ін., знайшов метод, який базується на вимірюванні залежності опору від температури (т.зв. термометри опору (ТО)). На даний момент більше як на 90% використовуються дротяні ТО або, як їх ще називають, термоперетворювачі опору.

ТО, які випускаються серійно, класифікуються за матеріалом чутливого елемента: платинові (ТОП), нікелеві (ТОН) і мідні (ТОМ). Відмітимо, що у світовій практиці найбільшого поширення набули перші два типи ТО (хоча в Росії, наприклад, надається перевага мідним у порівнянні із нікелевими). Вони застосовуються для точного вимірювання температури у діапазоні 73-1123 К (від -200°C до $+850^\circ\text{C}$), де їх опір змінюється згідно із законом:

$$R(T) = R(273) \left[1 + \hat{\alpha} (T - 273) \right], \quad (1.7)$$

де $R(273)$ – опір при 273 К; β - ТКО при температурі вимірювання опору.

Як правило, опір при $T=273$ К вибирають рівним 100 Ом (такі робочі терморезистори позначаються Pt-100 і Ni-100), хоча використовуються і терморезистори в 500 Ом і 1 кОм.

Оскільки ТКО залежить від температури (для металів $\beta \sim T^{-1}$), то при використанні рівняння (1.7) необхідно врахувати температурну залежність $\beta(T)$ або користуватися середньою величиною ТКО в інтервалі (273- T). Зазначимо, що $\beta(0^\circ\text{C})=3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Pt) та $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Ni).

Наведемо допустимі відхилення значень опору і температури для резисторів класу А і В:

- клас А: $\pm(0,15 \pm 0,002 \cdot t)^\circ\text{C}$; $\pm 1,0$ Ом;
- клас В: $\pm(0,3 \pm 0,005 \cdot t)^\circ\text{C}$; $\pm 1,4$ Ом.

Для вимірювання температури терморезистором використовується схема типу моста Уїтстона (рис.1.1). Особливістю схеми є те, що $R_1 = R_2$, а порівняльний опір R_n може мати змінну величину.

Таблиця 1.1 - Градування ТО Pt-100 в інтервалі 0-400 °С

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50
$R, \text{Ом}$	100,00	103,90	107,79	111,67	115,54	119,40
$t, ^\circ\text{C}$	60	70	80	90	100	
$R, \text{Ом}$	123,24	127,07	130,89	134,70	138,50	

У цьому випадку $R_{\text{ТО}}$ буде дорівнювати R_n , якщо струм між точками 1 і 2 не протікає. Знаючи $R_{\text{ТО}}$ і маючи таблицю градування (для прикладу в таблиці 1.1 наведені дані для ТО Pt-100), можна з великою точністю визначити температуру,

тобто перейти до залежності $T(R)$. Перевага цього методу вимірювання полягає в тому, що результат не залежить від робочої напруги U_0 .

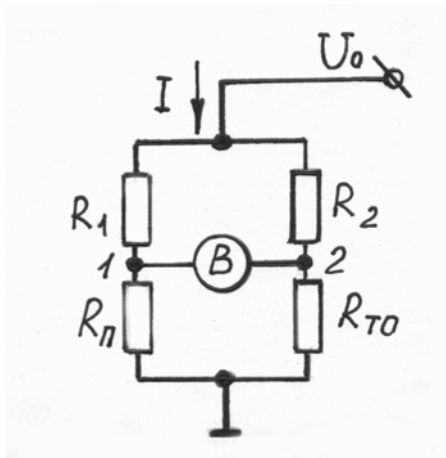


Рисунок 1.1 – Схема вимірювання опору резисторів за допомогою моста Уїтстона

Для технічних вимірювань температури порівняльний опір можна брати постійним, а показники вольтметра (В) прокалібрувати залежно від температури. Оскільки R_{TO} при зміні температури буде змінювати свою величину, то між точками 1 і 2 виникне різниця потенціалів U_{12} , яка буде пов'язана із U_0 співвідношенням

$$U_{12} = U_0 \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_n}{R_n + R_{TO}} \right). \quad (1.8)$$

Недоліком схеми на основі моста Уїтстона є те, що вимірювальний струм I повинен бути дуже малим, щоб не викликати нагрівання TO , що буде обумовлювати похибку (це похибка самонагрівання) вимірювання температури. Кількісною характеристикою цього процесу є коефіцієнт самонагрівання (КС), який пов'язаний із підведеною потужністю струму ($P=I^2R_{TO}$) і підвищенням температури (ΔT) співвідношенням

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{P}{КС}, \quad (1.9)$$

де T_1 і T_2 – температура за відсутності або наявності вимірювального струму I ; $[КС] = \frac{\hat{I} B_T}{^{\circ}C}$.

Починаючи з 1980-х років у зарубіжних країнах створюються датчики температури нового покоління на основі плівкових матеріалів (Pt, Ir, Ni) [4,5]. Їх ще називають промисловими термометрами опору. Вони задовольняють більшість вимог, які ставляться до ТО:

- низькі експлуатаційні витрати, низька собівартість;
- висока стабільність, мала інерційність;
- широкий діапазон температур; лінійність залежності $R(T)$;
- універсальність конструкції, малі габаритні розміри;
- можливість використання двоточкової схеми для градуювання.

Тонкоплівкові датчики складаються із тонкої (0,6 мм) керамічної підкладки, на яку методом катодного ВЧ-розпилення конденсується шар Pt, Ir чи Ni (товщина $d \sim 1$ мкм), в якому лазером випалюють потрібної форми орнамент і здійснюють підгонку величини опору. Потім термокомпресійним зварюванням під'єднуються контактні виводи (дроти Pt або Ni, покритого шаром Pt) до контактних площадок (Au, Ni). ТО захищається шаром із кераміки або скла (на рис. 1.2 зображена схематична будова ТО із плівки Pt).

Відмітимо, що дана конструкція лише типова, і тому відомі її різновиди. Наприклад, замість Au виводів можна використовувати Ir або (Pt-Ir) сплав, замість герметика використовувати скло і т.п.

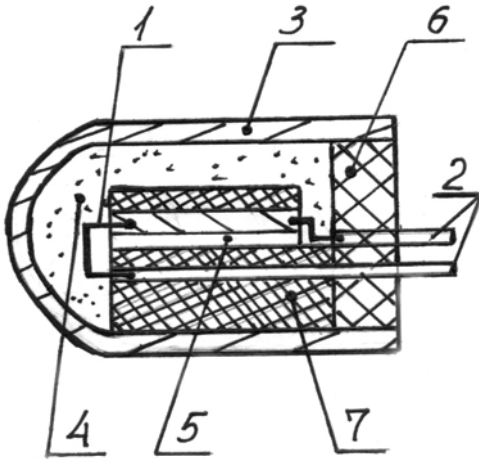


Рисунок 1.2 – Конструкція чутливого елемента ТО із плівки Pt для діапазону температур від -50 до 400°C : 1-Pt, 2-Au, 3-Al (гільза), 4- Al_2O_3 , 5-полі-кор, 6-герметик, 7-кераміка

Оскільки властивості тонкоплівкових ТО залежать від чистоти плівки, кристалічної будови, а також конструкції чутливого елемента, то у зв'язку з цим були проведені на прикладі Pt терморезистора детальні дослідження впливу технологічних параметрів на властивості. Це дозволило установити основні особливості технологічного процесу:

- відношення $W = \frac{R(100^{\circ}\text{C})}{R(0^{\circ}\text{C})} = 1,385$, але при збільшенні товщини W збільшується і при $d > 1,7$ мкм не залежить від товщини;
- ТКО залежить від температури підкладки: при збільшенні $T_{\text{п}}$ до 500°C він збільшується, але при $T_{\text{п}} > 500^{\circ}\text{C}$ ТКО зменшується, що пов'язано із забрудненням плівки залишковими газами;
- відпалюванням ТО в середовищі кисню можна досягти максимальної величини W .

Отримані в результаті терморезистори із номінальним значенням опору $R_{\text{н}} = 50, 100$ або 500 Ом мають ТКО від $3,81 \cdot 10^{-3}$ до $3,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ і відхилення від номінального опору $0,05-0,1$ %.

ТО на основі плівки Pt випускають такі фірми: Degussa-Hanau (ФРН), Pribor Ltd. (Болгарія), Omega і Honeywell Micro Switch (США) та деякі інші.

1.2 Термопары [1, 6]

Термопары – це чутливі елементи датчиків, за допомогою яких вимірюється температура в діапазоні 0-2600 К. Термопара виготовляється шляхом зварювання двох різних металевих проводів, наприклад, Cu і константан; Cu і (Cu-Ni) - сплав; Pt-(Pt-Ir) - сплав; Fe і (Cu-Ni) - сплав; хромель-алюмель та ін. Дві таких термопары утворюють датчик. Для цього необхідно один спай помістити при 0°С, а інший привести в контакт з об'єктом вимірювання температури (рис.1.3). Між спаями виникає терморушійна сила (ТРС), яка має величину порядку 1-10 мкВ/К (наприклад, у термопары Cu - (Cu-Ni) ТРС має величину 4,3 мВ при різниці температур спаїв у 100°С). Оскільки величина ТРС мала, то необхідно мати точну вимірювальну апаратуру. Крім того, опорна точка (0°С) повинна весь час підтримуватися постійною або також вимірюватися. У зв'язку з цим набули поширення інтегральні схеми для термопар без опорної точки, але із внутрішнім компенсатором точки тання льоду (похибка вимірювання температури в інтервалі 0-300°С складає до 0,6°С). Прикладом таких датчиків можуть бути пристрої із цифровою індикацією UNI-T UT70B (похибка 3% на інтервалі від -200 до 1300°С) та APPA 109 (0,1% на такому ж інтервалі).

Із курсу загальної фізики (див., наприклад, [6]) добре відомо, що виникнення ТРС пов'язано із двома причинами.

По-перше, при переході із одного металу в інший (спай) виникає внутрішня контактна різниця потенціалів (стрибок потенціалу)

$$U_{12} = \frac{E_{\Phi A} - E_{\Phi B}}{e}, \quad (1.10)$$

де E_F – енергія Фермі; e – заряд електрона; A і B – позначення провідників.

Оскільки два спаї знаходяться при різних температурах, то стрибок потенціалу для них буде різним, і для всього електричного кола термопари сума $(U_{12})_1 + (U_{12})_2$ буде відмінною від нуля (індекси “1” і “2” позначають номери спаїв).

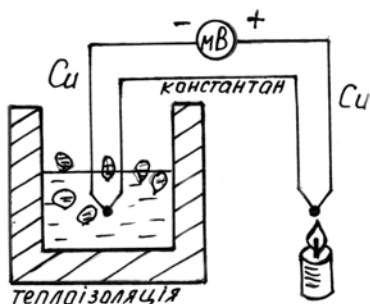


Рисунок 1.3 – Вимірювання температури термопарою із використанням опорної точки 0°C

Інша причина виникнення ТРС пов’язана із градієнтом температури вздовж провідників термопари. У зв’язку з тим, що концентрація електронів з високою енергією ($E > E_F$) буде більшою біля нагрітого контакту і, навпаки, їх концентрація з низькою енергією ($E < E_F$) буде більшою біля холодного контакту, то вздовж провідника виникне градієнт концентрації електронів, що обумовить дифузю більш швидких електронів до холодного контакту, а повільних – до нагрітого. При цьому на кожній ділянці провідника (Δx) буде відбуватися зміна потенціалу ($\Delta\phi$), що характеризується величиною U :

$$U = \frac{\Delta\phi}{\Delta x}.$$

Величину ТРС можна подати так:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{конт}} + \varepsilon_{\text{диф}},$$

або після інтегрування вздовж провідників від T_1 до T_2 :

$$\varepsilon = \alpha_{\text{AB}}(T_1 - T_2),$$

де $\alpha_{\text{AB}} = (\alpha_A - \alpha_B)$ – питома ТРС для даної пари металів або напівпровідників; α_A і α_B – коефіцієнти ТРС для провідників А і В ($\alpha = U - \frac{1}{e} \cdot \frac{\Delta E_{\text{Ф}}}{\Delta T}$).

Величина питомої ТРС для пари металів має порядок величини $10^{-5} - 10^{-4}$ В/К, а у напівпровідникових пар на один-два порядки вище ($\sim 10^{-3}$ В/К), що пояснюється тим, що у напівпровідників із різним типом провідності α має різні знаки, і тому $|\alpha_{\text{AB}}| = |\alpha_A| + |\alpha_B|$. Питання ТРС у напівпровідниках детально викладені в монографії [7].

У загальному випадку ТРС залежить від температури не за лінійним законом, а можливі випадки, коли вона змінює свій знак. Наприклад, у випадку термопари Cu-Fe при 540°C ТРС дорівнює приблизно нулю і змінює свій знак.

1.3 Терморезистори із від'ємним і додатним термічним коефіцієнтом опору [1, 8-10]

Згідно із стандартом Міжнародної електротехнічної комісії терморезисторами з від'ємним ТКО називаються напівпровідникові резистори, опір яких зменшується при підвищенні температури, а ТКО має величину 3-6 %/К. Відмітимо, що така величина ТКО приблизно в 10 разів більша у порівнянні із Pt і Ni датчиками. Терморезистори складаються із суміші спечених полікристалічних оксидів (наприклад, Fe_2O_3 , TiO_2 , NiO і CoO із Li_2O , Zn_2TiO_4 і т.п.). Процес спікання здійснюється при $t \cong 1000 - 1400^\circ\text{C}$, потім виготовлюються контакти на основі срібної пасти. Для забезпечення стабільності терморезистори після спікання проходять

спеціальні режими обробки. Оскільки температурна залежність опору має експоненціальний характер $R(T) \sim \exp(B/T)$, де B – константа матеріалу терморезистора, то співвідношення для ТКО буде мати такий вигляд:

$$\beta = - B/T^2. \quad (1.11)$$

Важливою характеристикою для терморезистора є його вольт-амперна характеристика (рис. 1.4).

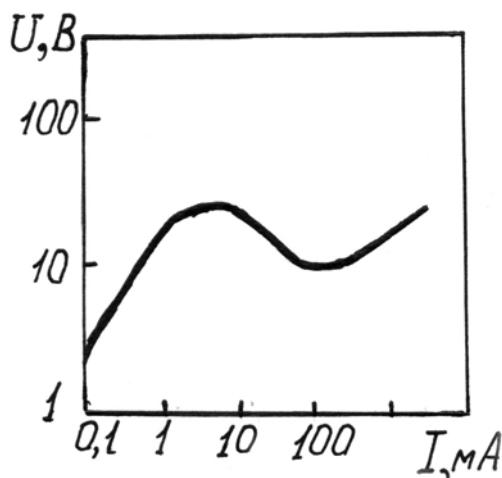


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика терморезистора із від'ємним ТКО

Вона описує зв'язок між струмом через датчик і падінням напруги на ньому. До величини сили струму 1 мА вольт-амперна характеристика має лінійний характер, оскільки при таких струмах не відбувається самонагрівання. Нелінійна ділянка характеристики виникає через самонагрівання терморезистора.

Однією із характеристик ТО є т.зв. робоча характеристика – залежність опору від температури. Як вже відмічалось, вона має експоненціальний характер. Але виявляється, якщо до ТО підключити послідовно чи паралельно додатковий опір, який майже не залежить від температури, то робочу характеристику ТО можна лінеаризувати. Питан-

ня про лінійність робочої характеристики є принциповим, і тому постійно ведеться пошук нових матеріалів із від'ємним ТКО і лінійною залежністю $R(T)$, а також іншими покращеними характеристиками (низькі температури, малі похибки при вимірюванні температури в магнітному полі і т.п.). Так, згідно з інформацією фірми Lake Shore Cerplex (США) нею розроблений плівковий термодатчик на основі кераміки і парамагнітного металу (моделі CX-1030 і CX-1050) для інтервалу температур 0,05-325 К (точність – 0,05% від температури вимірювання) [8]. На даний ТО магнітне поле майже не впливає. Автор роботи [9] описує розроблення п'яти типів криогенних ТО із Ge плівки на GaAs: TTR-1A (інтервал 1,5-300 К), TTR-1B (0,5-300 К), TTR-1D (0,02-300 К), TTR-2 (50-400 К) та TTR-3 (200-500 К). Усі терморезистори не чутливі до магнітного поля (за винятком TTR-1B і TTR-1D) і опромінення нейтронами і γ -променями ($\Delta T \geq 10^{-4}$ К при $T=77$ К). З точки зору чутливості до опромінення, ці датчики мають такі ж параметри, як і CX-1030 і 1050. Відмітимо, що хоча термодатчик на основі плівки Ge має дуже гарні характеристики, він досить складний для виготовлення, оскільки має багатошарову будову: $Au_2/Au_1/Mo/(Ge-Au)/$ підкладка GaAs/плівкаGe/ (Ge-Au)/Mo/ Au_1/Au_2 (останні чотири шари у вигляді контактних площадок). Можливо це і не дозволить впровадження у виробництво даного датчика.

Одним із різновидів датчика з від'ємним ТКО є датчик критичної температури, який призначений для захисту різних пристроїв від перегрівання. Принцип його роботи можна зрозуміти на прикладі термодатчика на основі тонкої плівки ($d \cong 0,3$ мкм) VO_2 , нанесеної на ситалову підкладку СТ-50-1 методом термічного розкладення хімічних сполук ванадію (наприклад, ацетилацетонату). Електрон-номікроскопічні дослідження показують, що така плівка має полікристалічну будову з кристалітами у вигляді дендритів ($L \cong 200 \times 50 \times 50$ нм), простір між якими заповнює, швидше за все, аморфна фаза із VO, VO_2 та V_2O_3 . Як установили ав-

тори [10], дана аморфна фаза якраз і забезпечує напівпровідникові властивості термодатчика при $t < t_{кр} = 68^\circ\text{C}$ (енергія активації електропровідності змінюється від 0,18 eВ ($d \cong 0,15$ мкм) до 0,30 eВ ($d \cong 1$ мкм) при її величині 0,45 eВ для масивних монокристалів VO_2).

Принцип роботи датчика критичної температури базується на тому, що у VO_2 при $t_{кр} = 68^\circ\text{C}$ відбувається фазовий перехід II роду напівпровідник – метал, який супроводжує зменшення опору в 100-1000 разів. При термоцикльованій обробці (до 500 циклів) $t_{кр}$ зменшується від 68 до 61°C з подальшою стабілізацією цієї величини (відмітимо, що при такому термоцикльованні масивний монокристал VO_2 руйнується).

Запропонований авторами [10] датчик може знайти застосування при його експлуатації в умовах частих перепадів температури або термостатичних (наприклад, в автомобільній електроніці).

Згідно з міжнародними стандартами до терморезисторів із додатним ТКО відносяться масивні резистори із легованої титанатної кераміки (карбонат $\text{Ba} + \text{SrO} + \text{Ti}$). Особливістю їх є те, що вони в певному температурному інтервалі мають дуже високий ТКО, обумовлений напівпровідниковими і сегнетоелектричними властивостями кераміки. Компоненти кераміки спікають при $t = 1000\text{-}1400^\circ\text{C}$ у вигляді стержня або диска. Змінюючи склад суміші, можна змінювати і електричні властивості.

Робоча характеристика ТО має немонотонний характер, проходячи спочатку через мінімум, при $T = T_M$, а потім різко зростає (рис. 1.5). Температура, при якій опір терморезистора $R_N = 2R_{\min}$, отримала назву температури реагування (T_N).

Крім цих двох характерних температур (T_M і T_N), розглядають також і третю – T_W , яка відповідає точці перегику робочої характеристики. Паспортними даними терморезистора є величина ТКО у точках T_M і T_W .

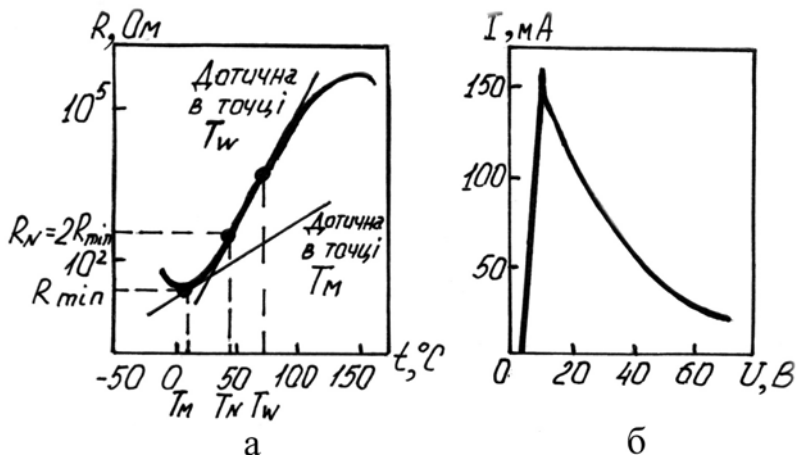


Рисунок 1.5 – Робоча (а) і вольт-амперна характеристика терморезистора із додатним ТКО

Закінчуючи даний підрозділ, відмітимо таке. З точки зору промислового застосування датчиків, у яких ТКО також більше нуля, найбільш дешевим є кремнієвий датчик, у якого робоча характеристика близька до параболічної, що є його недоліком лише при прецизійному вимірюванні температури. Для покращання робочої характеристики застосовується той самий метод, що і у випадку металевих ТО, - паралельне або послідовне підключення до кремнієвого датчика опору, що дозволяє лінеаризувати робочу характеристику.

1.4 Задачі і тематика семінарських занять

Задача 1 Показати, що для металевого терморезистора має місце співвідношення $\beta_R = \beta_\rho$, де β_R і β_ρ – термічний коефіцієнт опору (ТКО), виражений через опір (R) чи питомий опір (ρ).

Задача 2 Отримати співвідношення для ТКО β двошарової плівки. Окремі шари мають опір R_1 та R_2 , розділені тонким шаром діелектрика, і товщину d_1 та d_2 . Проаналізувати за-

лежність β від товщини одного із шарів при фіксованій товщині іншого. Отриманий результат розповсюдити на випадок плівкової системи із n шарів різної товщини.

$$\text{Відповідь: } \hat{a} = \frac{\hat{a}_1 \tilde{n}_2 d_1 + \hat{a}_2 \tilde{n}_1 d_2}{\tilde{n}_2 d_1 + \tilde{n}_1 d_2}.$$

Задача 3 Керамічний товстоплівковий термосенсор типу CX-1010 фірми Кернокс (США) на підкладці із сапфіру має від'ємний ТКО і монотонну температурну залежність опору

(таблиця 1). Побудувати залежність чутливості $\left(S \equiv \frac{dR}{dT} \right)$ і

питомої чутливості $\left(S_{\Pi} \equiv \frac{d \ln R}{d \ln T} \right)$ датчика від температури.

Таблиця 1.2 - Залежність опору термосенсора CX-1010 від температури

T, К	0,1	1,0	10	100	350
R, Ом	$7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^2$	70	27	15

Задача 4 Тонкоплівкові термоперетворювачі опору (ТПО) з номінальними характеристиками часто виготовляють на сіталої підкладці у вигляді плівки Ni та підстроеного резистора із металосиліцидного сплаву, який з'єднується паралельно плівці Ni. Така будова ТПО дозволяє реалізувати результуючий опір (R), майже незалежний від температури, оскільки опір плівки Ni (R_{Ni}) і резистора (R_p) змінюється з температурою за параболічним законом, проходячи через мінімум (Ni) або максимум (резистор). Довести, що у випадку

даного ТПО має місце співвідношення $\frac{R_{Ni}}{R_p} \cong \frac{\hat{a}_{Ni} - \hat{a}}{\hat{a} - \hat{a}_p}$,

де β – ТКО для ТПО.

Задача 5 Скориставшись величиною $\beta = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ та експериментальними результатами (таблиця 2), оцінити для $T = 300\text{-}350 \text{ K}$ відношення $\frac{R_{\text{Ni}}}{R_p}$ із попередньої задачі.

Таблиця 1.3 - Залежність опору від температури

T, K	273	373	473	573
R_{Ni}, Om	100	160	230	300
R_p, Om	480	505	510	500

Задача 6 Температурна залежність терморезистора з від'ємним ТКО (на основі оксидів Fe_2O_3 , TiO_2 , $\text{NiO}+\text{CoO}$ із Li_2O і т.п.) описується співвідношенням

$$R(T) = R(T_{\text{II}}) \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{II}}} \right) \right],$$

де T_{II} – початкова температура, B – константа резистора. Отримати співвідношення для $\beta(T)$.

Відповідь: $\beta(T) = \beta(T_{\text{II}}) - B/T^2$.

Задача 7 Результат попередньої задачі порівняти із співвідношенням для ТКО металевого терморезистора (Ni , Pt і т.п.), опір якого описується лінійною залежністю $R(T) = R_0 + AT$, де A – стала резистора.

Семинар на тему „Датчики температури”

- 1 Термодатчики з додатним ТКО.
- 2 Термодатчики з від'ємним ТКО.
- 3 Фізичні процеси в одно-та багаточарових плівкових термодатчиках.

- 4 Конструкція, основні параметри і характеристики термо-резисторів.

Список літератури

1. Виглеб Г. Датчики.- Москва: Мир, 1989.-С.14-50.
2. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).- Суми: Вид-во СумДУ, 2002.- С.141-147.
3. Mitin V.F. Resistance thermometers based on the Ge films//Quantum electronics and optoelectronics.-1999.- V.2, № 1.- P.115-123.

РОЗДІЛ 2 ДАТЧИКИ ТИСКУ

2.1 Кремнієві датчики [1]

Датчики тиску (ДТ), як і датчики температури, відносять до найбільш поширених у техніці. Найбільш дешевим і відносно простим у конструкції є кремнієвий датчик. Його виготовляють із пластини Si, частину якої витравляють до утворення тонкої мембрани. Методом іонної імплантації на мембрані формуються резистивні елементи і з'єднання. Під час тиску мембрана прогинається, що обумовлює деформацію резистора через отвір у корпусі ДТ і, як наслідок цього, зміну електричного опору (т.зв. тензоефект). Конструкційно товщина мембрани, геометрична форма і кількість резисторів визначаються інтервалом допустимих тисків. Вимірювальна схема ДТ, як і у випадках датчиків температури, являє собою міст із чотирьох однотипних резисторів (рис. 2.1а). Резистори R_1 - R_4 з'єднуються так, що при деформації мембрани величини R_1 і R_3 збільшуються, а R_2 і R_4 – зменшуються. Це дозволяє досягти високої чутливості вимірювального моста. Вихідна напруга U_B обчислюється за співвідношенням

$$U_B = U_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Залежність U_B від тиску P має лінійний характер, кутовий коефіцієнт якої залежить від температури вимірювання (рис. 2.1б). Оскільки вихідний сигнал досить слабкий ($\sim 10^{-1}$ В), то застосовується операційний підсилювач, що дає $U_B \sim 1$ В. Для вимірювання з підвищеною точністю необхідно додатково компенсувати температурну похибку датчиків. Застосовуються два методи компенсації: пасивна - за допомогою резистора і датчика температури, які вмикаються у вхідну ділянку моста (датчик температури-паралельно мосту), і активна за - допомогою операційного підсилювача, яка повністю усуває температурну похибку. Датчик тиску КР 100А (фірма Valvo) має внутрішню температурну компенсацію (активну).

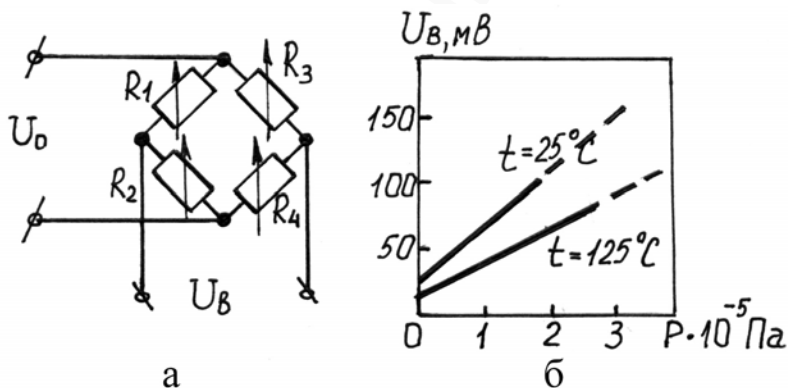


Рисунок 2.1 – Вимірювальний міст із чотирьох резисторів, які складають ДТ(а), та робоча характеристика кремнієвого датчика при двох температурах (б)

Кремнієві ДТ характеризуються такими перевагами, як:

- висока чутливість;
- лінійність шкали;
- незначний гістерезис;
- компактна конструкція і економічна планарна технологія виготовлення.

Вони застосовуються у пральних машинах ($P \cong 4 \cdot 10^3$ Па), апаратах вимірювання кров'яного тиску ($P \cong 2 \cdot 10^4$ Па), в автомобілях (регулювання запалювання ($\sim 10^5$ Па), вимірювання тиску при розрідженні пального ($\sim 2 \cdot 10^5$ Па), тиску мастила і стиснутого повітря в гальмівній системі ($\sim 10^6$ Па) та ін.).

ДТ, які випускають найбільш відомі фірми (Motorola, Honeywell, Volvo, Siemens та ін.), дозволяють перекривати інтервал тисків $0-10 \cdot 10^5$ Па і температур $-40 - +125^\circ\text{C}$, а також працювати у вакуумі та різних газових середовищах. Як різновид ДТ є прилад під назвою електронний барометр, який працює на основі барометричної формули (висотомір).

2.2 Датчики на основі металеві плівки

У зв'язку з відносно великою тензочутливістю (зміна опору при деформації) металевих плівок їх можна використовувати як чутливий елемент датчика тиску.

На кафедрі прикладної фізики СумДУ була запропонована така конструкція ДТ (додаток А1, див. також [11]).

Робочою частиною датчика є тонка ($d = 0,5-1$ мм) мембрана, яка виготовляється в тефлоновій або фторопластовій підкладці і на яку термовипаруванням наносяться чутливий елемент, контактні площадки і електроконтакти. Найбільш простий варіант чутливого елемента являє собою плівку Cr (площа – декілька мм^2), яка має гарну адгезію до матеріалу мембрани. Найбільш складною задачею є формування контактних площадок на краях плівки Cr. Спочатку конденсується плівка Cu ($d \sim 10$ нм), на яку електролітичним способом осаджується більш товстий шар Cu (до ~ 1 мкм), до якого приварюються або приєднуються мікропайкою ко-

нтактні дроти. Поряд з цим відомо [3], що коефіцієнт тензо-чутливості багатошарових плівкових систем значно більший у порівнянні із одношаровими. У зв'язку з цим на плівку Cr можна додатково сконденсувати плівку Cu, Ni і т.п. Оскільки розміри корпусу ДТ відповідають розмірам посадкового гнізда для вакуумметра типу ПМТ, то даний датчик можна використовувати і для вимірювання форвакууму ($P \cong 20\text{-}40$ Па). Робоча характеристика для ДТ на основі плівки Cr наведена на рис. 2.2. Із цього рисунка видно, що робоча характеристика має дві ділянки. На першій вона немонотонна, а на другій має лінійний характер.

Описаний датчик можна використовувати і при $P > 10^5$ Па (до $1,5 \cdot 10^5$ Па). У цьому випадку залежність $\frac{\Delta R}{R_0}$ від P має майже лінійний характер, причому із збільшенням P відносна зміна опору $\frac{\Delta R}{R_0}$ також зростає, що повністю узгоджується із уявленнями про тензоефект.

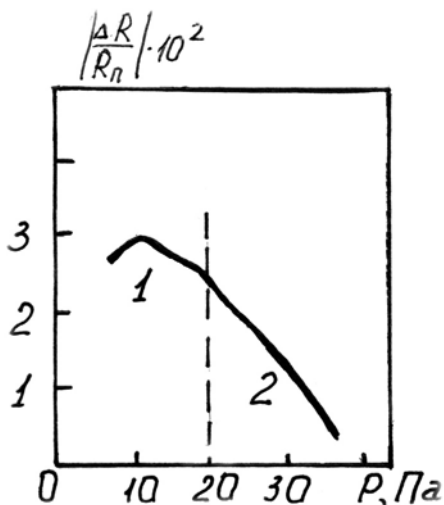


Рисунок 2.2 – Робоча характеристика датчика тиску на основі плівки хрому; P – тиск залишкової атмосфери у вакуумній камері; R_0 – початковий опір

Недоліком описаної конструкції ДТ є малий ресурс роботи, гістерезис

показників, досить погана відтворюваність результатів. У той самий час певною його перевагою перед кремнієвим ДТ є простота технології виготовлення.

2.3 Задачі

Задача 8 Отримати барометричне рівняння висоти, яке використовується для градування електронного датчика висоти. Вважати, що температура стовпа повітря постійна.

Відповідь: $h = H \cdot \ln \frac{P_0}{P_h}$, де $H = \frac{RT}{\rho g}$.

Задача 9 Перевірити відповідність барометричного рівняння висоти і експериментальних даних (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Залежність тиску повітря від висоти

h, м	0	100	200	500	1000	20000
P, мм Hg	760	751	742	716	675	41

Задача 10 Отримати залежність опору плівкового датчика тиску як функцію зовнішнього тиску.

Відповідь: $R(P) = R(0) \cdot e^{\tilde{\alpha}_v \cdot P}$, де $\tilde{\alpha}_v$ - баричний коефіцієнт опору.

Задача № 11. Скориставшись експериментальними даними (таблиця 2.2) для датчика тиску мембранного типу з двошаровим тонкоплівковим резистором Cu/Cr, отримати рівняння $R(P)$.

Таблиця 2.2 - Залежність $\frac{\Delta R}{R_{\Pi}}$ від тиску у вакуумній камері

$\frac{\Delta R}{R_{\Pi}}$, %	3,0	2,7	1,7	1,0
P, Па	10	20	30	35

РОЗДІЛ 3 ГАЗОВІ ДАТЧИКИ І ДАТЧИКИ ВОЛОГОСТІ

Контроль наявності і концентрації різних газів у приміщеннях, на виробництві, у газових струменях здійснюється за допомогою газових датчиків (ГД). За наявності певних газів (наприклад, CO, CO₂, O₂, H₂ та ін.) у ГД виробляються електричні сигнали, специфічні для різних газів. Відмітимо, що, крім ГД, наша промисловість випускає велику кількість спектрофотометрів, мас-спектрометрів та інших приладів, які мають перевагу над газовими детекторами як з точки зору точності аналізу, так і селективності. Але це дуже складні і дорогі прилади. Для якісного аналізу достатньо застосувати такі пристрої:

- термокондуктометричні комірки (ячейки – рос.) (для газів CO₂, SO₂, SF₆);
- термохімічні (каталітичні) комірки (CO, вибухонебезпечні та горючі гази);
- напівпровідникові датчики (спирти, H₂S, токсичні гази, вуглеводні);
- топливні комірки (O₂).

Відмітимо, що ці ГД є стандартними, вони розроблені і використовуються давно, мають свої переваги, але повністю не задовольняють потреби промисловості. Тому останніми роками дослідниками різних країн приділяється велика увага розробленню ГД на основі плівкових матеріалів.

3.1 Термокондуктометричні та термохімічні комірки [1]

ГД у вигляді термокондуктометричної комірки придатний для виявлення H₂, CO₂, SO₂, а також горючих і вибухонебезпечних газів. Принцип роботи її полягає в такому (рис. 3.1). Проба газу дифундує у вимірювальну камеру, в якій міститься дротяна спіраль (Pt чи Ni), при температурі, десь на 40°C більшої від температури середовища.

Якщо склад газової проби буде змінюватися з якоїсь причини, то зміниться також тепловідвід від спіралі до стінок камери, що обумовить нагрівання або охолодження спіралі. У випадку, наприклад, CO_2 , відбувається підвищення температури, оскільки теплопровідність цього газу незначна, в той час як у випадку H_2 спіраль охолоджується. Нагрівання чи охолодження спіралі веде до зміни її опору, яка зіставляється у вимірному мості з опором еталона, розміщеного в порівняльній камері. Сигнал ГД визначається зміною теплопровідності газової суміші. Цей простий метод індикації має суттєвий недолік, оскільки однаковий тепловий ефект може бути обумовлений змішуванням різних газів, але в різних кількостях.

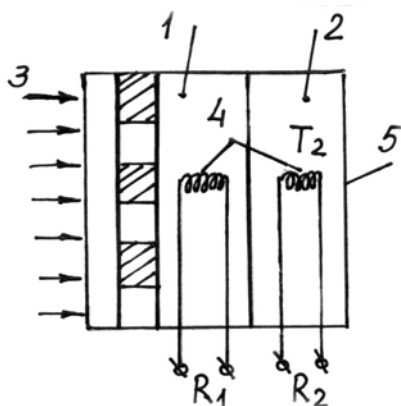


Рисунок 3.1 – Термокондуктометрична вимірвальна комірка: 1 – вимірвальна камера; 2 – порівняльна камера; 3 – газова проба; 4 – спіраль; 5 – корпус

У зв'язку з цим застосування названого датчика обмежується аналізом лише бінарної суміші заздалегідь відомих газів.

Таблиця 3.1 дає уявлення про інтервал концентрацій, в якому працює термокондуктометричний газовий датчик. У таблиці 3.2 подано інформацію про відносну теплопровідність деяких газів у порівнянні з повітрям при 0 і 100°C. Підкреслимо, що чим більша відмінність у теплопровідності газу і повітря, тим точніше можна проаналізувати цей газ.

Згідно з даними таблиці 3.2 така максимальна відмінність спостерігається у випадку гелію і водню.

Таблиця 3.1 - Інтервали вимірювання концентрації деяких газів

Газ	Стандартний діапазон, %	Мінімальний діапазон, %
CO ₂	0-100	0-5
SO ₂	0-100	0-5
H ₂	0-100	0-1

Таблиця 3.2 - Відносна теплопровідність деяких газів

Газ		Аце-тон	Аг	Сl	Не	H ₂	NO ₂
Вінос-на теплопровідність, %	0°С	0,41	0,68	0,32	5,93	7,10	0,63
	100°С	-	0,96	-	5,54	6,72	0,75
Газ		CO ₂	СО	Метан	O ₂	N ₂	
Вінос-на теплопровідність, %	0°С	0,50	0,96	1,26	1,02	1,00	
	100°С	0,64	0,97	1,41	1,01	0,98	

На відміну від термокондуктометричної комірки, термохімічна (каталітична) забезпечує лише контроль горючих газів (в першу чергу - СО) в повітрі та продуктах горіння автомобілів. Схематична будова її зображена на рисунку 3.2. Термохімічна комірка має дві вимірювальні спіралі із Pt, які входять у вимірювальний міст з двома постійними опорами R₂ і R₄. Одна спіраль покривається шаром активно-

го, а інша - пасивного каталізатора. У результаті СО буде реагувати з киснем повітря на активному каталізаторі, утворюючи СО₂. Теплота, яка виділяється у результаті цієї реакції, призведе до збільшення опору спіралі, а в результаті – до розбалансу моста. Маючи криву градування сили струму I від концентрації, можна досить точно визначити вміст СО у газовій пробі. Відмітимо, що на тепловому ефекті також базується принцип роботи елек-трохімічної (топливної) комірки для виявлення О₂.

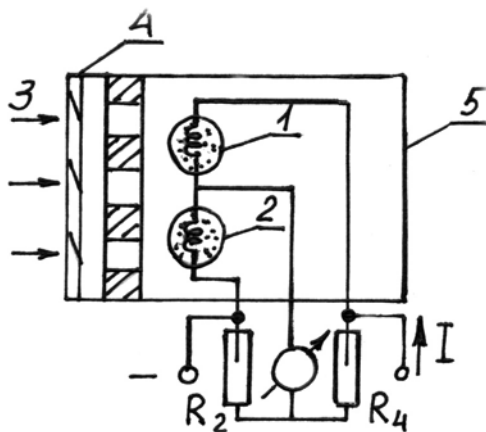


Рисунок 3.2 – Термохімічна комірка: 1 - пасивний каталізатор; 2 - активний каталізатор; 3 - газова проба; 4 – металокераміка; 5 - корпус

3.2 Тонкоплівкові газові датчики [1, 12-17]

Принцип роботи ГД даного типу базується на зміні електричного опору деяких напівпровідникових матеріалів при адсорбції токсичних газів. Принципова схема датчика наведена на рисунку 3.3. Він складається із керамічної основи, на якій прикріплюються два електроди, між якими, в свою чергу, наноситься напівпровідниковий оксид металу (наприклад, SnO₂).

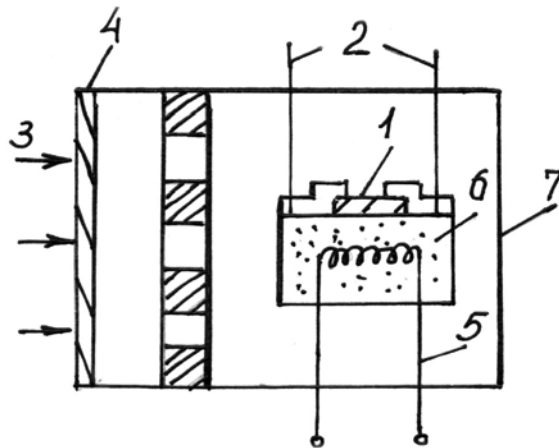


Рисунок 3.3 – Вимірювальна комірка напівпровідникового газового датчика: 1 – оксид металу; 2 – електроди; 3 – газова проба; 4 – металокераміка; 5 – спіраль для нагрівання; 6 – кераміка; 7 – корпус

Якщо газ проходить над шаром цього оксиду ($d \cong 150$ нм), то його електричні властивості будуть змінюватися. За допомогою місткової схеми ці зміни провідності перетворюються в зміну напруги. Кожний матеріал оксидної плівки має різну робочу температуру, тобто ту температуру, при якій газ розкладається на поверхні плівки (наприклад, у H_2S на поверхні SnO_2 вона дорівнює $200^\circ C$). Інколи для збільшення чутливості оксидів їх легують атомами Cu , Al , Nb , V , Ti та ін. Рисунок 3.4 ілюструє робочу характеристику датчика на основі SnO_2 при аналізі газу H_2S .

Постійне погіршення екологічної обстановки стимулює розроблення нових ГД для контролю складу того чи іншого газового середовища. Широкого поширення набули датчики, робочим елементом яких є плівкові напівпровідникові матеріали, що мають високу чутливість, селективність аналізу і стабільність у роботі. На сучасному етапі

розвитку сенсорної техніки основна увага звертається на відтворення властивостей плівкових структур, можливість управління їх властивостями у процесі виготовлення, сумісність технології їх виготовлення з технологією мікроелектроніки, низька ціна при серійному випуску. При цьому наукові розробки ведуться як на традиційних матеріалах – SnO_2 , Si, пористий Si, так і на нових, які раніше не використовувалися. Це – WO_3 , потрібні халькогенідні склоподібні матеріали $\text{A}^1\text{Bi}(\text{Ge})\text{C}^{\text{VI}}$ (де А – К, Na; С – S, Se), багат шарові плівкові системи.

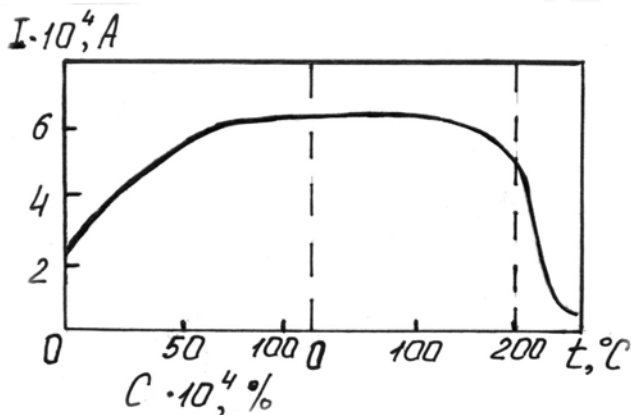


Рисунок 3.4 – Робоча характеристика ГД на основі SnO_2 при аналізі H_2S і залежність вихідного сигналу від температури поверхні SnO_2

Одним із принципів питань формування газочутливого елемента на основі плівки SnO_2 є те, що вони стають чутливими лише після відпалювання в атмосфері кисню. Це пов'язано із тим, що зразу після осадження SnO_2 плівка має або аморфну, або гетерофазну ($\text{Sn} + \text{SnO} + \text{SnO}_2$) структуру, яку необхідно протягом багатьох годин гомогенізувати шляхом відпалювання в атмосфері кисню при високих температурах.

Дослідження, проведені останніми роками, показали, що при магнетронному осадженні SnO_2 в атмосфері Ar-O_2 плівки SnO_2 мають кристалічну будову (решітка типу рутин-

ла) і високу газочутливість, яка досягає свого максимуму при співвідношенні атомів Ag до кисню, як 1 до 3. Таким чином, можна отримати чутливі елементи ГД при низьких температурах ($t_n \cong 170^\circ\text{C}$).

В останні роки велику зацікавленість проявляють дослідники до газочутливих властивостей аморфних плівок $\text{WO}_3(\text{a-WO}_3)$, які використовуються при фіксації одного із найбільш токсичних газів NO_2 . Оскільки a-WO_3 надзвичайно пористий матеріал, то він проявляє властивість об'ємного механізму чутливості в результаті утворення воднево-вольфрамових бронз H_xWO_3 при дисоціативній абсорбції H_2 , аміаку, спиртів, тобто донорних газів. У той самий час, для газів акцепторного типу (наприклад, CN_x), за винятком O_2 , має місце поверхневий механізм взаємодії з a-WO_3 , який, як і напівпровідниковий SnO_2 , має n-тип провідності. Коли електровід'ємні молекули NO або NO_2 досягають поверхні a-WO_3 , SnO_2 , то вони захоплюють електрон із зони провідності і хемосорбуються на поверхні. Приповерхневі шари чутливого елемента збіднюються на електрони, в результаті чого збільшується опір. Чутливість a-WO_3 дуже суттєво залежить від умов конденсації і температури навколишнього середовища. Оптимальними є такі параметри: товщина плівки 50-500 нм (розмір ОКГ ~ 1 нм), $t_n \cong 230^\circ\text{C}$, температура вимірювання $210\text{-}230^\circ\text{C}$. Подібні оптимальні умови для плівок SnO_2 в літературі не описані.

Якщо попередні результати являють собою лише наукові розробки, то результати [12] знайшли деяке впровадження на станціях метро м.Харкова. Принцип роботи пасивного дозиметра на основі газочутливої плівки $\text{A}^{\text{I}}\text{Bi}(\text{Ge})\text{C}^{\text{VI}}$ полягає в такому. Тонка плівка товщиною 0,8-1,2 мкм конденсується на скляну підкладку у вакуумі 10^{-3} Па при кімнатній температурі. При дії на плівку атмосфери повітря із домішками NO_2 відбувається окислення окремих компонент, у результаті чого збільшується коефіцієнт пропускання (Т) світла у видимому діапазоні (рис. 3.5). Величина Т вимірюється за допомогою спектрофотометра. Час

спрацювання цього датчика дорівнює 1 год. і приблизно такий же час для проведення спектрометричних досліджень і обробки результатів. Для порівняння зазначимо, що час спрацювання ГД на основі SnO_2 при аналізі H_2S складає приблизно 7-8 хв., що набагато менше у порівнянні із попереднім датчиком.

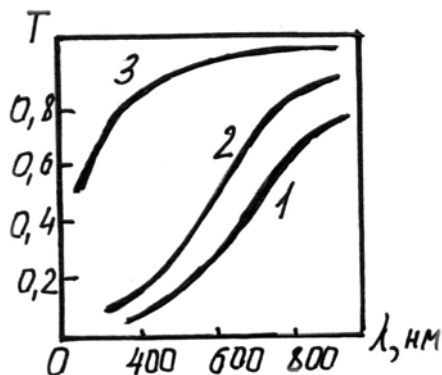


Рисунок 3.5 – Спектр оптичного пропускання аморфних плівок KBi_3S_5 . Концентрація NO_2 , мг/м^3 : 1-0; 2-1; 3- 10^3 . Дані роботи [12]

Автори роботи [16] дослідили можливість для реєстрування аміаку за допомогою контактної структури плівка Ti/Si . Було встановлено, що дана структура має чутливість до адсорбції аміаку в атомах кисню і кремнію, які входять до складу перехідного шару межі поділу. Цей процес обумовлює зміну діелектричної проникності перехідного шару, що чітко фіксується на вольт-амперній характеристиці. Такий ГД має переваги, оскільки дуже дешевий у порівнянні з іншими напівпровідниковими датчиками і забезпечує сумісність кремнієвої технології зі створенням активного елемента на тому ж матеріалі, що й схема оброблення інформації. Поряд з цим певну проблему становлять вакуумні умови отримання плівки Ti ($P \cong (3-6) \cdot 10^{-8}$ Па) товщиною $d \cong 8$ нм.

Надзвичайно важлива проблема - створення ГД для реєстрації хлорофторовуглеців (фріонів) – аналізується у роботі [17], оскільки проблема забруднення атмосфери фріонами має глобальний характер (руйнація озонного шару). Для реєстрації деяких фріонів ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ та $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$) ви-

користовують металооксидні напівпровідники типу V/Mo/Al₂O₃/ZnO або SnO₂, але їх недолік в тому, що вони реагують не тільки на фріони, але і на інші гази. Деяке покращання селективності до фріонів досягається за рахунок легування плівкової структури атомами S. Більш ефективною виявилася структура Pt/LaF₃/Si₃N₄/SiO₂/Si, але сенсори на її основі мають низьку робочу температуру ($t \cong 180^\circ\text{C}$). Це пов'язано з тією обставиною, що ширина забороненої зони Si($\Delta\varepsilon = 1,15 \text{ eV}$) в одиницях температури не більше 200°C . З цієї причини Si замінюється на широкозонний ($\Delta\varepsilon = 2,90 \text{ eV}$) SiC, що дозволяє підвищити робочу температуру до 530°C і створити більш ефективний датчик фріонів.

3.3 Датчики вологості [1]

Знання величини вологості повітря важливе, перш за все, у зв'язку з повсякденним життям людей та функціонуванням деяких пристроїв.

Вологість повітря характеризують такими трьома параметрами, як:

- абсолютна вологість F_a , що показує, яка кількість води (в г) знаходиться в 1m^3 повітря;
- вологість насичення F_n , яка характеризує максимальну кількість води в 1m^3 повітря при даній температурі і атмосферному тиску без утворення конденсату;
- відносна вологість $F_v(T) = \frac{F_a}{F_n(T)}$.

Дуже простим є датчик вологості (ДВ) конденсаторного типу (рис. 3.6). Принцип роботи базується на тому, що діелектрична проникність плівки (1), а отже, і ємність конденсатора (С), залежать від вологості.

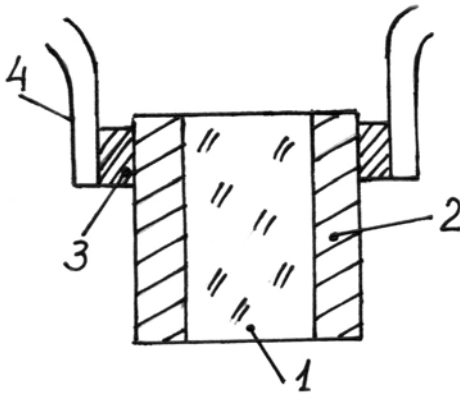


Рисунок 3.6 – Принципова схема будови діелектричного ДВ: 1– діелектрична плівка; 2-плівка Au; 3- контакт; 4- електроди

Робоча характеристика – залежність $C(F_a)$ – має майже лінійний характер, і вона легко перетворюється у залежність напруги на конденсаторі від F_a за допомогою схеми лінеаризації.

РОЗДІЛ 4 ТЕНЗОДАТЧИКИ НА ОСНОВІ МАСИВНИХ І ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Уявлення про тензоєфект [3,18,19]

При експериментальних дослідженнях напруженого стану елементів конструкцій перетворення деформації у відповідний сигнал здійснюється за допомогою тензорезисторів. Принцип вимірювання деформації за допомогою тензорезистора полягає в тому, що при деформації змінюється електричний опір. Якщо аналізувати це явище із точки зору процесів електронного розсіювання, то необхідно розрізняти два випадки: масивний монокристалічний або плівковий високодисперсний тензорезистор. У першому випадку основний внесок у тензоєфект дають зміна СДВП за рахунок деформації фононного спектру (за аналогією із співвідношенням (1.4') можна позначити $\Delta\lambda_{\text{оф}}$, але числові значення зміни СДВП у цих двох випадках різні) 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

$$R = \tilde{n} \frac{l}{a \cdot d}.$$

Взявши диференціал від логарифма лівої і правої частини, отримуємо

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\tilde{n}}{\tilde{n}} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{dd}{d}, \quad (4.1)$$

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

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\tilde{n}}{\tilde{n}} + (1 + 2\mu) \cdot \frac{dl}{l}, \quad (4.2)$$

де $\hat{\imath} = -\frac{da/a}{dl/l} = -\frac{dd/d}{dl/l}$ – коефіцієнт Пуассона для матеріалу тензорезистора.

Якщо тензорезистор перебуває у вільному стані, то із (4.2) отримуємо

$$K = \frac{dR}{R d\hat{\imath}} = m + 1 + 2\hat{\imath}, \quad (4.2')$$

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

Необхідно відмітити, що у практичній і теоретичній тензометрії прийняті різні позначення [18, 19] коефіцієнтів K , m та деяких інших параметрів. Зокрема, в теорії тензочутливості розрізняють коефіцієнти повздовжньої (γ_l) та поперечної (γ_t) тензочутливості, якщо ці величини виражаються через питомий опір, то їх відповідно позначають γ_l^p і γ_t^p [3,

20] (замість m). Крім того, необхідно мати на увазі, що в теорії тензоефекту вивчаються вільні тензорезистори і тому розглядають деформації ε_l і ε_t (в практичній тензометрії розглядають окремо деформацію конструкції (ε) і чутливого елемента (ε_q)). Ця розбіжність позначень стає зрозумілою, якщо врахувати, що експериментальна тензометрія розвивалася на основі датчиків із масивних матеріалів (дроти, фольги), а фундаментальні питання тензоефекту аналізувалися на прикладі полікристалічних плівкових систем, тобто ці два науково-прикладні напрями розвивалися незалежно один від одного. Ситуація дещо змінилася при переході до виготовлення чутливих елементів у вигляді тонкоплівкової системи, оскільки відпала потреба у деяких параметрах (наприклад, у коефіцієнті передачі інформації $K_{\text{пер}}$).

У тому випадку, коли масивний тензорезистор приклеєний до конструкції, співвідношення (4.2) необхідно записати у такому вигляді:

$$\frac{dR}{R} = K_{\text{прт}} \frac{dl}{l}, \quad (4.2'')$$

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

Оскільки між коефіцієнтами K і $K_{\text{прт}}$ існує зв'язок

$$K = K_{\text{пер.ч}} \cdot K_{\text{прт}}, \quad (4.3)$$

то $K = K_{\text{прт}}$ лише за умови, що коефіцієнт передачі деформації ε зв'язуючою речовиною до чутливого елемента $K_{\text{пер.ч}}$ ($K_{\text{пер.ч}} = \bar{\dot{a}}_q / \dot{a}$, де $\bar{\dot{a}}_q$ - істинна деформація чутливого елемента (див. підрозділ 4.2)) дорівнює одиниці.

Якщо чутливий елемент виготовлений у вигляді полікристалічної плівкової системи (одно- чи багат шарової), то зміна СДВП, як і у випадку ТКО (співвідношення (1.4')), відбувається не тільки за рахунок деформаційних змін фо-

нонного спектру, але і коефіцієнтів r , p і u у випадку багатосарової плівки, величини Q .

Явище тензоефекту було відкрите в 1856 році Кельвінім, досліджувалося О.Д.Хвольсоном (1881р.), Колумбані і Туре (1960р.), Паркером і Кринським (1963р.), Мейксіном і Худзинським (1967р.), Варкушем (1980р.). Найбільші теоретичні досягнення у вивченні ефекта тензочутливості пов'язані із іменами Тельє, Тоссе і Пішар (більш детально в [3, 20]). Найбільш важливі досягнення кафедри прикладної фізики СумДУ пов'язані із експериментальними дослідженнями тензочутливості одно- та багатосарових плівок [3, 20, 21] та розробленням нової теоретичної моделі, яка враховує деформаційні ефекти для коефіцієнтів r , p і Q [22].

Піонерами застосування тензоефекту в промисловості є Є.Сіммонс та Л.Руже (США), які вперше запатентували і виготовили тензорезистор (1938р.). Значні успіхи в тензометрії металевими або напівпровідниковими резисторами мають Н.П.Клокова (Росія) та Ю.А.Тхорик (Україна).

У світі найбільш відомі 30 фірм США, ФРН, Великобританії та Японії, які випускають тензодатчики, що працюють в області великих деформацій і температур [23].

4.2 Перетворення деформації тензорезистором [18, 19]

Як відмічалось, зміна опору при деформації тензорезистора у загальному випадку визначається рівнянням (4.2''), в якому коефіцієнт перетворення $K_{пр}$ є функцією пружних та резистивних властивостей чутливого елемента. У теорії тензометрії допускається, що в інтервалі невеликих деформацій $K_{пр}$ не залежить від деформації. Якщо матеріал масивного тензорезистора однорідний (питомий опір ρ однаковий в усіх точках), то рівняння (4.2'') можна проінтегрувати:

$$\int_{R_n}^{R_k} \frac{dR}{R} = K_{пр} \int_{l_n}^{l_k} \frac{dl}{l}$$

і отримати такі співвідношення:

$$\ln \frac{R_k}{R_n} = K_{\text{прт}} \overline{\dot{\alpha}_c} \quad \text{або} \quad \ln \left(\frac{\ddot{A}R}{R_n} + 1 \right) = K_{\text{прт}} \overline{\dot{\alpha}_c}, \quad (4.4)$$

де R_n , R_k та l_n , l_k – початкове і кінцеве значення опору і довжини тензорезистора; $\overline{\dot{\alpha}_c}$ – істинна деформація чутливого елемента (при рівномірній деформації від l_n до l_k знак середнього можна опустити, тобто ε_c), $\frac{\ddot{A}R}{R_n} \equiv \hat{1}(\dot{\alpha}_c)$ – функція перетворення деформації.

Із (4.4) випливає таке співвідношення:

$$\hat{1}(\dot{\alpha}_c) \frac{\Delta R}{R_n} = e^{K_{\text{прт}} \cdot \overline{\dot{\alpha}_c}} - 1. \quad (4.4')$$

Дане співвідношення є рівнянням перетворення відносної лінійної деформації чутливого елемента у відносну зміну його електричного опору. У загальному випадку рівняння (4.4') нелінійне, але при малих значеннях $K_{\text{прт}} \cdot \overline{\dot{\alpha}_c}$ його можна лінеаризувати, оскільки

$$e^{K_{\text{прт}} \cdot \overline{\dot{\alpha}_c}} \cong 1 + K_{\text{прт}} \cdot \overline{\dot{\alpha}_c} + \dots \quad (4.5)$$

Скориставшись (4.5), рівняння (4.4') можна записати так:

$$\frac{\ddot{A}R}{R_n} \cong K_{\text{прт}} \cdot \overline{\dot{\alpha}_c}.$$

Функцію перетворення деформації (4.4') можна записати через ε , якщо врахувати співвідношення (4.3):

$$\hat{1}(\dot{\alpha}_c) \frac{\Delta R}{R_n} = e^{K \cdot \dot{\alpha}_c} - 1. \quad (4.4'')$$

Із (4.4'') знаходимо ε як функцію $\xi(\varepsilon)$, тобто

$$\dot{\alpha} = \ln[\hat{1}(\dot{\alpha} \neq 1)]/K \approx \frac{\hat{1}(\dot{\alpha}^*)}{K} \quad (4.6)$$

Важливість цієї формули полягає в тому, що, знаючи величину тензочутливості K для резистора і заміряючи $\frac{\Delta R}{R_{\Pi}}$, можна розрахувати величину деформації ε для елементів різних конструкцій.

4.3 Передача деформації чутливому елементу тензорезистора [18, 19]

Передача деформації до масивного тензорезистора характеризується функцією розподілу деформації $\varepsilon_{\text{ч}}$ вздовж довжини (бази) чутливого елемента. Середня деформація $\overline{\dot{\alpha}_{\text{ч}}}$ визначається таким рівнянням:

$$\overline{\dot{\alpha}_{\text{ч}}} = \frac{1}{\dot{\alpha}} \cdot \int_0^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}_{\text{ч}}(x) dx,$$

а деформація конструкції, як вже відмічалось, пов'язана із $\overline{\dot{\alpha}_{\text{ч}}}$ співвідношенням

$$\varepsilon = \overline{\dot{\alpha}_{\text{ч}}} / K_{\text{пер.ч}}.$$

*) Враховано, що при $x \ll 1$ $\ln(1+x) \approx x$.

Таким чином, для знаходження $K_{\text{пер.ч}}$ необхідно знати $\overline{\dot{a}_c}$ за умови, що ε задається експериментально. У свою чергу, для розрахунку $\overline{\dot{a}_c}$ необхідно розрахувати функцію $\varepsilon_c(x)$. Це досить складна задача, і вона розв'язана лише для простих випадків форми тензорезистора (нитка, дротяний у вигляді петлі, фольговий, напівпровідниковий стержень). Найбільш простим тензорезистором є наклеєна на балку металева нитка довжиною l . Для розрахунків $\varepsilon_c(x)$ враховується багато різних припущень:

- у шарі зв'язуючої речовини виникають лише зсувні (дотичні) напруження, у той час як у чутливому елементі і в балці – тільки нормальні;
- на кінцях резистора деформація ε_c береться рівною нулю, що є лише приблизно правильно;
- зв'язуюча речовина є лінійно в'язкопружним тілом та деякі інші припущення.

Розв'язок цієї деформаційної задачі має такий вигляд:

$$\overline{\dot{a}_c} = \frac{\int_0^{l/2} \dot{a} (\pm e^{-bx}) dx + \int_{-l/2}^0 \dot{a} (\pm e^{bx}) dx}{l}. \quad (4.7)$$

Відповідно формула для $K_{\text{пер.ч}}$ запишеться так:

$$K_{\text{пер.ч}} = 1 - \frac{2}{bl} \left(1 - e^{-\frac{bl}{2}}\right), \quad (4.8)$$

де b – коефіцієнт, який виражається через модулі зсуву зв'язуючої речовини і пружності чутливого елемента та площу його поперечного перерізу. Відмітимо, що для зазначених вище видів тензорезисторів співвідношення для $\overline{\dot{a}_c}$ та $K_{\text{пер.ч}}$ мають вигляд, аналогічний до (4.7) і (4.8).

Ми розглянули випадок, коли деформація від конструкції до чутливого елемента здійснюється через

зв'язуючу речовину. Це має відношення до тензорезисторів, які мають підкладку із клею (тензодатчики, 1-П, ФК, ФКПА та ін.). Але в тензометрії застосовуються також тензодатчики на підкладках із паперу, азбесту, склотканини та ін. У цьому випадку необхідно застосовувати схему послідовної передачі деформації від деталі через шар зв'язуючої речовини до підкладки, від підкладки через шар зв'язуючої речовини до чутливого елемента. Тоді коефіцієнт тензочутливості за аналогією до (4.3) можна записати так:

$$K = K_{\text{пер.п}} \cdot K_{\text{пер.ч}} \cdot K_{\text{прт}}, \quad (4.3')$$

де $K_{\text{пер.п}}$ – коефіцієнт передачі деформації від деталі до підкладки. Все сказане вище має місце і в тому випадку, коли використовується металева підкладка (тензодатчики НМТ-430, ТТ-60), яка приварюється до деталі.

4.4 Металеві тензодатчики [18, 19, 21, 23]

Тензодатчики із чутливим елементом у вигляді фольги (типу КФ4, КФ5) мають робочу температуру від -70 до 200°C , а дротяні (типу НМТ-450) є високотемпературними і розраховані на температурний інтервал до 450°C . При використуванні металевої підкладки (типу ТТ-600) максимальна температура підвищується до 600°C .

На даний момент розрізняють п'ять груп металевих матеріалів, з яких виготовляються тензорезистивні елементи:

- сплави с малим ТКО ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) і обмеженою теплостійкістю ($200-300^{\circ}\text{C}$) при величині $K = 0,3-3$ (Cu-Mn та Cu-Ni сплави: манганін, мінальф, константан, едванс та ін.);
- сплави з відносно малим ТКО ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) і підвищеною термостійкістю ($400-500^{\circ}\text{C}$) при величині $K = 2-3$ (Ni –Cr сплави: ніхром, карма, стабілой, еваном та ін.);

- сплави з підвищеним ТКО ($\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) і $K \leq 20$ (Ni-Cr-Fe сплави: ізоеластик, елінвар, ніхромові сплави, діналой та ін.);
- сплави з високою жаростійкістю (Pt-W, Fe-Cr-Al сплави);
- сплави благородних металів (Pt-Pd-Rh, Pt-Rh-Os; Pt-Pd-Mo сплави).

Якщо узагальнити дані про металеві тензодатчики на основі масивних матеріалів, то можна відмітити, що їх робоча температура знаходиться в інтервалі від -269 до $600-700^\circ\text{C}$ при величині K від 10^{-1} до 20 . Згідно з інформацією фірми “Елікс” (ФРН і США) вона запропонувала нову серію датчиків на основі Pt-W фольги (92%-Pt і 8%-W) для інтервалу температур від -268 до 400°C . Чутливий елемент виготовлений у вигляді сітки, яка нанесена на полімід, скловолокно і т.п. Величина $K = 4,6$, датчик стійкий до корозії і магнітострикції. Відносно мала величина K (наприклад, у напівпровідникових тензодатчиків $K \sim 10^2-100^3$) стимулює постійний пошук матеріалів для тензорезисторів, які б залишалися достатньо термостійкими і мали підвищену величину K . Ці вимоги до деякої міри задовольняють плівкові матеріали у вигляді багатошарової системи. Згідно з нашими даними [21] у тришарових плівках на основі Cr, Co і Ni величина $K = 19-25$, а , наприклад, у шестишаровій системі K досягає величини 50 одиниць. Причина збільшення величини K пов’язується із значним зерномежовим розсіюванням електронів та впливом межі поділу окремих шарів на електричні властивості плівок.

4.5 Напівпровідникові та полімерні тензоре-зистори [23, 24-28]

Значний прогрес у технології тензодатчиків у 1960-х роках пов’язаний із розробленням і випуском напівпровідникових тензочутливих елементів. Як бачимо із таблиці 4.1,

перевага таких елементів – високе значення коефіцієнта чутливості.

Таблиця 4.1– Властивості напівпровідникових тензо-чутливих матеріалів

Матеріал	Склад	ТКО·10 ³ , К ⁻¹	К
Кремній	p-тип	0,7-7	100-170
Кремній	n-тип	0,7-7	-(100-40)
Германій	p-тип	-	102
Германій	n-тип	-	-150

Однак необхідно мати на увазі, що електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів дуже сильно залежать від рівня легування та орієнтації монокристала.

Згідно з даними львівських дослідників [24, 25] у ніткоподібних кристалів GaP_xAs_{1-x} величина К досягає величини 120, в той час як у стрічкоподібних кристалів К = 62 приблизно в одному і тому ж інтервалі температур (100-400°C). У тонкоплівкових резисторах Ge спостерігається величина К = 20-50 одиниць, але має місце залежність К від температури підкладки з максимумом при $t \cong 500^\circ\text{C}$ (К=40). При цьому було встановлено, що величина К залежить не тільки від t_p , але і від методу отримання плівки (рис. 4.1). Оскільки величина К дуже суттєво залежить від товщини, то при її зменшенні абсолютна величина К повинна збільшуватися. Підтвердженням цього висновку є наші дані для отриманих термічним випаруванням плівок Ge: при $d \cong 100-200$ нм К = -70 одиниць.

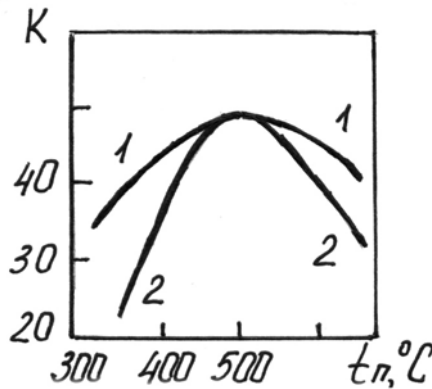


Рисунок 4.1 – Залежність коефіцієнта чутливості K від t_p :
 1 – при іонно-плазмовому розпиленні;
 2 – при термічному випаруванні; товщина 0,6-2 мкм

Згідно з даними харківських дослідників [26]; плівки твердого розчину $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x\text{S}$ товщиною $d \cong 0,5$ мкм мають досить високе значення чутливості ($K = 50$) при величині ТКО $10^{-6} - 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Велике значення чутливості ($K=330$) спостерігали автори [27] при дослідженні монокристалів TlInTe_2 , які мали форму голки. Ці тензорезистори стійкі лише до 180°C , але можуть працювати в статичному і динамічному режимах. Їх можна також використовувати як датчики тиску. Але вони мають і суттєвий недолік – нестабільність електричного опору в часі і значний вплив температури.

Надзвичайно велике значення коефіцієнта тензочутливості мають органічні напівпровідники. Згідно з даними [28] у полікристалічних резисторах $2\text{CH}_3\text{MT}(\text{TCNQ})_2$ $K = (4-6) \cdot 10^3$ (розтягування) або $(0,5-1,5) \cdot 10^3$ (стиснення), хоча поряд з цим у вуглецевих волокнах $K = 3-6$, а в деяких випадках $K = -2,0-2,1$. Велике значення K автори пояснюють значними змінами на межі кристалітів при деформації ($\varepsilon = 0,01\%$).

4.6 Задачі

Задача 12 Отримати співвідношення для плівкового резистора великої товщини (фольга) в області пружної деформації: $\frac{dR}{R_n} = K_{\text{прг}} \frac{dl}{l}$, де $K_{\text{прг}}$ – коефіцієнт перетворення деформації. Довести що в області пластичної деформації резистора $K_{\text{прг}}=2$.

Задача 13 Дати фізичне трактування таким метрологічним характеристикам тензорезисторів: $\dot{\alpha}$, $K_{\text{пер}}$, $K_{\text{прг}}$, $K_{\text{пер}\cdot\text{ч}}$, $\bar{\alpha}_\text{ч}$, m , $\hat{i}(\dot{\alpha})$.

Задача 14 Отримати граничний випадок функції перетворення деформації для однорідного чутливого елемента у вигляді $\ln \frac{R_\kappa}{R_n} = K_{\text{прг}} \cdot \bar{\alpha}_\text{ч}$, де $\bar{\alpha}_\text{ч}$ - істинна деформація чутливого елемента (резистора).

Задача 15 Використовуючи результати задачі 14, отримати функцію перетворення у вигляді

$$\hat{i}(\dot{\alpha}) = \frac{\ddot{\Delta}R}{R_n} = (1 + \dot{\alpha})^\kappa - 1.$$

Задача 16 Залежність опору тензодатчика у вигляді тонкої монокристалічної голки TlInTe_2 від поздовжньої деформації наведена в таблиці 5. Використовуючи ці дані, визначити коефіцієнти $K_{\text{прг}}$ і K .

Таблиця 4.2 – Залежність опору від деформації

R, Ом	49,1	51,0	52,5	54,0
$\varepsilon \cdot 10^4$	1	2	3	4

Відповідь: $K_{\text{прг}} = K \cong 330$.

Задача 17 Функція перетворення деформації для вільної плівки скандію $\frac{\ddot{A}R}{R_{II}} = \xi(\varepsilon)$ має лінійний характер: при $\varepsilon_1=0$,

$$\frac{\ddot{A}R}{R_{II}} = 0, \quad \text{а} \quad \text{при} \quad \varepsilon_2=0,01, \quad \frac{\ddot{A}R}{R_{II}} = 0,078$$

(I деформаційний цикл) і $\frac{\ddot{A}R}{R_{II}} = 0,02$ (II деформаційний

цикл). Знайти відношення $\frac{K_I}{K_{II}}$ та $\frac{K_{прI}}{K_{прII}}$.

РОЗДІЛ 5 ДАТЧИКИ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

5.1 Магніторезистивні датчики [1, 29, 30]

Серед датчиків магнітного поля відомі три типи, принцип роботи яких базується на різних фізичних явищах. Це магніторезистивні датчики, датчики Холла і Вічанда. Ми розглянемо перших два типа, оскільки їх можна реалізувати на плівкових матеріалах.

Принцип роботи магніторезистивного датчика (МРД) базується на тому, що деякі матеріали (яскравий приклад – пермалой (80%Ni і 20%Fe)) змінюють свій електричний опір при дії магнітного поля. Величина цієї зміни залежить від напруженості магнітного поля і кута напряму поля і електричного струму. Сучасна тонкоплівкова технологія дозволяє виготовити дешеві і малих розмірів магніторезистивні датчики.

МРД складаються із двох чутливих елементів у вигляді меандра з опором від 30 Ом до 1 кОм, які вмикають у мостикову схему. На виході мостикової схеми реєструється зміна напруги, яка відбулася в результаті збільшення опору магніторезисторів. Частіше за все МРД використовуються для вимірювання швидкості обертання. Магніт, який прикріплюється до деталі, що обертається, при кожному оберті проходить над МРД, у результаті чого відбувається зміна опору. Механізм зміни опору полягає в тому, що під дією поля магніту відбувається зміна доменної структури магнеторезистора. Це обумовить зміну коефіцієнта проходження електронном межі доменів і, як результат цього, зміну опору.

Автори роботи [29] показали, що використання двошарових плівкових магніторезисторів дає значні переваги перед одношаровими. Харківським дослідникам [30] вдалося запропонувати нові типи магніторезисторів у вигляді тонкої плівки Ni-Fe чи Ni-Fe-Co з певною орієнтацією доменів.

5.2 Датчики Холла [1]

Датчики цього типу призначені для визначення положення, переміщення або тиску. Принцип роботи цього датчика базується на ефекті Холла (більш детально див. [2]). Якщо через чутливий елемент (Si, InAs, InSb) пропустити електричний струм ($\sim 0,1$ А) і при цьому перпендикулярно до струму і зразка прикласти магнітне поле (індукція $B \sim 1$ Тл), то, як відомо, на зовнішніх поверхнях (обкладинках датчика) виникає холлівська різниця потенціалів (рис. 5.1), величина якої порядку 0,5 В:

$$U_H = \frac{R_H I \cdot B}{d},$$

де R_H – постійна Холла; d – товщина зразка.

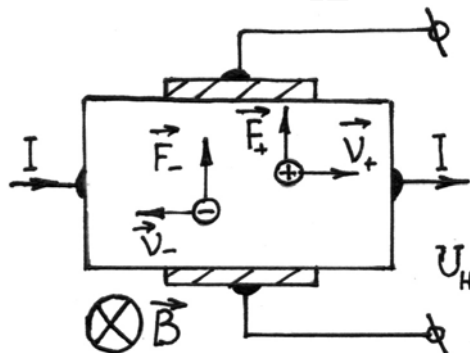


Рисунок 5.1 – Принцип дії холлівського чутливого елемента. Індукція B магнітного поля створюється постійним магнітом

Якщо зміщувати постійний магніт відносно датчика, то величина U_H буде змінюватися пропорційно зміщенню. Очевидно, що, крім вимірювання положення і переміщення, датчик Холла можна використовувати і для контролю тиску (рис. 5.2).

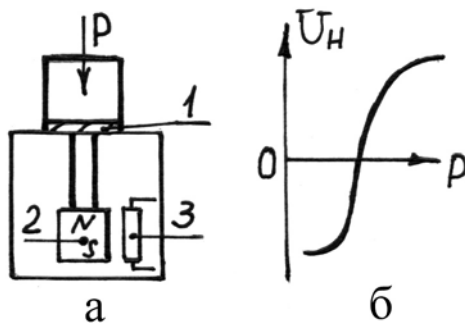


Рисунок 5.2 – Датчик тиску (а) і залежність U_H від тиску (б): 1-мембрана; 2-магніт; 3-датчик

У цьому датчику постійний магніт закріплюється на мембрані, яка прогинається під дією тиску. В результаті магніт зміщується відносно датчика, що обумовлює зміну холлівської різниці потенціалів (рис. 5. 2б).

ВИСНОВКИ

Закінчуючи курс лекцій про датчики неелектричних величин на основі масивних і плівкових матеріалів, необхідно підкреслити таке. За останні роки спостерігається стрімкий прогрес у даній галузі промисловості, що обумовлено, перш за все, прогресом у мікроелектроніці. Обсяг посібника не дозволяє охопити навіть поверхнево відому із літератури інформацію (достатньо відмітити, що нами зовсім не розглядаються оптичні датчики). З такої точки зору монографії [1, 19], які є базовими для нас, не задовольняють сучасні вимоги. У світовій практиці майже повністю відмовляються від масивних матеріалів і переходять на використання тонких плівок. При цьому особлива увага приділяється багат шаровим системам (тобто чутливі елементи для тензодатчиків, магнітних датчиків та ін.). Це пов'язано з їх широкими функціональними можливостями, термічною і хімічною стабільністю, високою чутливістю. Зважаючи на

такі обставини, корекція курсу буде здійснюватися безпосередньо при читанні лекцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виглеб Г. Датчики (устройство и применение).- Москва: Мир, 1989.- 196с.
2. Проценко І.Ю., Шумакова Н.І., Овчаренко Ю.М. Фізика твердого тіла: Навчальний посібник.- Суми: Вид-во СумДУ, 2002.- 76с.
3. Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок.- Суми: Вид-во СумДУ, 2000.- 148с.
4. Курносов Н.М., Сороколетов О.Д. Тонкопленочные преобразователи сопротивления// Приборы и системы управления.- 1995.- № 9.- С. 41-44.
5. Georgiev J.K., Dimitrov D.A., Zahariev A.L. Stability and calibrating methods of some thin film Pt thermometers in the range 13,8-273,16 K// Журнал фізичних досліджень.- 2000.- Т.4, № 2.- С. 216-224.
6. Савельев И.В. Курс общей физики.- Москва: Наука, 1973.-Т. 2.- С. 277-284.
7. Пленочные термоэлементы: физика и применение/ Под ред. Н.С.Лидоренко.- Москва: Наука, 1985.- 232с.
8. Holmes D.S., Courts S.S. Resolution and accuracy of cryogenic temperature measurements// Temperature, its measurement and control in science and industry.- 1992.- V.6.- P. 1225-1230.
9. Mitin V.F. Resistance thermometers based on the germanium films// Quantum Electronics and Optoelectronics.- 1999.- V.2, № 1.- P. 115-123.
10. Ландочкин И.Г., Клементьев С.В., Предеин А.В. и др. Терморезистор на основе диоксида ванадия для схем тепловой защиты// Приборы и системы управления.- 1989.- № 7.- С. 33-35.

11. Методичні вказівки до курсу “Датчики” для студентів заочної та денної форми навчання.- Суми: Вид-во СумДУ, 2002.- 21с.
12. Дьяконенко Н.Л. Формирование тонких пленок тройных халькогенидных соединений, содержащих щелочной элемент// Дис.//. канд. физ.- мат. наук.- Харьков: ХГПУ, 1999.- С. 127-132.
13. Кисин В.В., Ворошилов С.А., Сысоев В.В. и др. Моделирование процесса низкотемпературного получения газочувствительных пленок оксида олова //ЖТФ.- 1999.- Т.69, Вып.4.- С. 112-113.
14. Boarino L., Barratto C., Geobaldo F. et all. NO₂ monitoring at room temperature by a porous silicon gas sensor// Cryst. Res. Technol.- № I-II/P46.
15. Тутов Е.А., Рябцев С.В., Андрюков А.Ю. Детектирование диоксида азота аморфными пленками WO₃// Письма ЖТФ.- 2000.- Т.26, Вып. 3.- С. 38-43.
16. Бомк О.Й., Ильченко Л.Г., Ильченко В.В. та ін. Про природу чутливості до аміаку газових сенсорів на основі структур надтонка титанова плівка – кремній //УФЖ.- 1999.- Т.44, № 6.- С. 759-763.
17. Филипов В.И., Васильев А.А., Терентьев А.А. и др. Сенсор на основе структуры Pt/LaF₃/SiO₂/SiC для детектирования хлорофтороуглеродов// ЖТФ.- 1999.- Т.69, Вып.11.- С. 80-85.
18. Клокова Н.П., Лукашин В.Ф., Воробьева Л.М. Тензодатчики для экспериментальных исследований.- Москва: Машиностроение, 1972.- 152с.
19. Клокова Н.П. Тензорезисторы.- Москва: Машиностроение, 1990.- 224с.
20. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).- Суми: Вид-во СумДУ, 2002.- С. 149-151.
21. Protsenko I., Odnodvoretz L., Chornous A. Electroconductivity and tensosensibility of multilayer films// Металлофиз. нов. Технол.- 1998.- Т.20, № 1.- Р. 36-44.

22. Lasyuchenko O., Odnodvoretz L., Protsenko I. Microscopic theory of thensosensibility of multi-layer polycrystalline films// Cryst. Res. Technol.- 2000.- V. 35, № 3.- P. 329-332.
23. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBMPC/ Под ред. У.Томпкинса и Дж. Уэбстера.- Москва: Мир, 1992.- С. 367-369.
24. Островская А.С., Варшава С.С. Резистивные датчики на основе микрокристаллов арсенида-фосфида галлия //Приборы и системы управления.- 1989.- № 7.- С.30-31.
25. Панков Ю.М., Марьмова И.И. Тонкопленочные германиевые тензорезисторы, полученные ионно-плазменным распылением// Там же.- С. 31-32.
26. Naboka M.N., Marincheva V.E., Tupikina V.N. Films sensor materials based on europium monosulphide and samarium// Functional materials.- 1999.- V.6, № 5.- P. 903-907.
27. Годжаев Э.М., Садыгова Х.О., Аллахъяров Э.А. Тензометрические свойства монокристаллов $Tl InTe_2$ //Неорг. материалы.- 1994.- Т.30, № 6.- С. 859-860.
28. Каринов Х.С. О тензочувствительности низкоразмерных органических материалов// ЖТФ.- 1994.- Т.64, Вып.1.- С. 194-196.
29. Васильева Н.П., Касаткин С.И., Аверин Н.М. и др. Разработка тонкопленочных двухслойных магниторезистивных датчиков// Приборы и системы управления.- 1995.- № 2.- С. 24-26.
30. Ravlik A.G., Roshchenko S.T., Samophalov V.N. et all. New magnetoresistive elements based on W.Thomson effect// Functional materials.- 1999.- V.6, № 5.- P. 897-902.

ДОДАТОК А
(довідковий)
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

А1 Термічний коефіцієнт опору металевій плівці

Лабораторна робота 1 Термічний коефіцієнт опору металевій плівці

Мета роботи: вивчити температурну залежність чутливості, питомої чутливості та термічного коефіцієнту опору тонкого металевого терморезистора у вигляді плівки Cu, Cr, Ni, Co чи інших металів в області проміжних температур (300-700 К).

Елементи теорії. Згідно з теорією провідності металів опір провідників виникає в результаті розсіювання електронів провідності на фонах, дефектах кристалічної будови, електронах, а в магнітних металів ще додатково і на магнонах. Для масивних зразків немагнітних перехідних d-металів температурна залежність питомого опору описується співвідношенням Блоха-Грюнайзена

$$\tilde{\rho}_0(T) = \tilde{\rho}_{0\text{зал}} + AT^2 + B\left(\frac{T}{\tilde{\epsilon}_{\text{OD}}}\right)^3 \cdot J_3 + C\left(\frac{T}{\tilde{\epsilon}_{\text{OD}}}\right)^5 \cdot J_5, \quad (\text{A1})$$

де $\tilde{\rho}_{0\text{зал}}$ - залишковий опір, який не залежить від температури і пов'язаний із розсіюванням носіїв електричного струму на дефектах зразка; A, B, C – коефіцієнти пропорційності; $J_{3,5}$ – інтеграли Дебая; $\tilde{\epsilon}_{\text{OD}}$ - температура Дебая для масивних зразків.

Доданок, пропорційний T^2 , пов'язаний із електрон-електронним розсіюванням і дає помітний внесок у загальний опір лише при $T < 10$ К.

Доданки, пропорційні T^3 і T^5 , обумовлені відповідно т.зв. моттівським розсіюванням s-електрона на фононі в d- або s-зону (за прізвищем Мотт англійського вченого).

Якщо розглядати питомий опір металевої плівки, то за аналогією (A1) можна записати

$$\tilde{\rho}(T) = \tilde{\rho}_{\text{зал}} + aT^2 + c^* \cdot \left(\frac{T}{\tilde{\epsilon}_D} \right)^3 \cdot J_3, \quad (A2)$$

де враховано, що в тонких зразках (фольга, дроти, плівки) при низьких температурах закон $\rho \sim T^5$ переходить в закон $\rho \sim T^3$, що дає можливість об'єднати моттівське s-d-розсіювання з s-s- розсіюванням в один доданок із спільним коефіцієнтом пропорційності c^* . Крім цього, в (A2) враховується, що температура Дебая в тонких зразках $\tilde{\epsilon}_D$ відрізняється від $\tilde{\epsilon}_{0D}$ ($\tilde{\epsilon}_D \cong 0,9\tilde{\epsilon}_{0D}$).

У зв'язку з тим, що J_3 і J_5 залежать від температури, питомий опір в обох випадках при $T > \tilde{\epsilon}_{0D}$ або $\tilde{\epsilon}_D$ стає пропорційним T . У той самий час прості викладки показують, що β_0 чи β обернено пропорційні T . Дійсно, якщо подати співвідношення для опору у загальному випадку так:

$$R = \hat{a} \hat{\sigma}^n, \quad (A2')$$

де \hat{a} - коефіцієнт пропорційності; n- показник степеня, тоді для ТКО можна записати $\hat{a} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{\hat{a} \cdot n T^{n-1}}{\hat{a} \cdot \hat{\sigma}^n} = \frac{n}{T}$, тобто ТКО зменшується з температурою за гіперболічним законом.

У феромагнітних матеріалах (Ni, Co, Fe, сплави на їх основі) в (A1) або (A2) з'являється доданок, пов'язаний із електрон-магنونним розсіюванням:

$$\rho_{e-m} \sim T^2,$$

який дає помітний внесок у величину питомого опору при низьких і проміжних температурах, нижчих від температури Кюри ($\hat{\epsilon}_{oc}$ або $\hat{\epsilon}_c$).

Таким чином, лише при температурах, які вищі температури Дебая, температурні залежності $\rho_0(T)$ і $\rho(T)$ мають однаковий вигляд, хоча абсолютні значення ρ_0 і ρ дуже відрізняються ($\rho/\rho_0 \cong 2-100$). Така суттєва відмінність пов'язана з тією обставиною, що в тонких плівках міститься значно більша кількість дефектів, домішкових атомів та сумарна площа меж зерен (кристалітів), які є додатковим механізмом розсіювання носіїв електричного струму.

Для характеристики температурної залежності опору терморезисторів зручною є така характеристика, як термічний коефіцієнт опору (ТКО), який можна виразити через опір R або питомий опір ρ :

$$\hat{\alpha}_R = \frac{1}{R_{\Pi}} \frac{\ddot{A}R}{\ddot{A}T} \quad \text{або} \quad \hat{\alpha}_{\rho} = \frac{1}{\tilde{\rho}_{\Pi}} \frac{\ddot{A}\tilde{\rho}}{\ddot{A}T}, \quad (A3)$$

де індекс „ Π ” означає початкове значення.

Оскільки відмінність між β_R і β_{ρ} складає 0,1-1%, то частіше за все β_R і β_{ρ} не розрізняють і позначають просто β . Величина ТКО в тонких металевих плівках десь на порядок має більшу величину ($\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) у порівнянні з масивними зразками ($\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), хоча у знаменнику співвідношень (A3) знаходиться значно більша величина, що пояснюється ще більшим значенням $\frac{\ddot{A}R}{\ddot{A}T}$ або $\frac{\ddot{A}\tilde{\rho}}{\ddot{A}T}$ у порівнянні із масивними

терморезисторами. Слід також мати на увазі, що в чистих металевих масивних чи плівкових зразках ТКО завжди більше нуля. Але при отриманні плівки в поганих вакуумних умовах (тиск залишкової атмосфери $P > 10^{-4}$ Па, низька швидкість конденсації) або коли плівка електрично несучільна, то її ТКО буде від'ємним. З цим фактом не слід пов'язувати

який-небудь фізичний ефект, крім технологічних умов або структурного стану плівки.

Крім ТКО, температурними характеристиками термоопору є також коефіцієнт чутливості (S) та питомий коефіцієнт чутливості (S_{Π}):

$$S = \frac{\ddot{A}R}{\ddot{A}T} \quad \text{і} \quad S_{\Pi} = \frac{d \ln R}{d \ln T} = \frac{T}{R} \cdot \frac{\ddot{A}R}{\ddot{A}T}, \quad (\text{A4})$$

де T – температура, при якій розраховується S_{Π} .

При вивченні залежності $R(T)$ необхідно мати на увазі, що співвідношення (A1) або (A2) описують її у найзагальніших рисах. Вони не враховують особливостей залежності, які мають місце при температурах Дебая, Кюрі та Нелля (\ddot{e}_N). Ці особливості краще фіксуються на температурній залежності $S(T)$. У таблиці A1 подані дані для масивних зразків про характерні температури, при яких спостерігаються особливості залежності $R(T)$, а також величини ρ_0 і β_0 при 300 К. Ці дані дозволяють вибрати температурний інтервал, в якому має місце монотонна або лінійна залежність $R(T)$.

Правила техніки безпеки. У вакуумній установці та виміральному приладі використовуються джерела високої напруги. У зв'язку з цим вмикання установки та провадження роботи на ній здійснюється у відповідності до інструкції та в присутності інженера.

Таблиця A1– Дані про характерні температури, питомий опір і термічний коефіцієнт опору

Метал	\ddot{e}_{OD}, K	\ddot{e}_{OC}, K	\ddot{e}_{ON}, K	$\rho_0 \cdot 10^8, \text{Om} \cdot \text{m}$	$\beta_0 \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$
Cu	339	-	-	1,72	43
Ni	465	1400	-	7,1	55
Co	445	631	-	6,5	66
Cr	585	-	310	13	25

Методичні вказівки. Після одержання металевого терморезистора товщиною 50-100 нм необхідно провести його термостабілізацію шляхом нагрівання від $T \cong 300$ К до 650 К зі швидкістю 3-5 К/с протягом 2-3 циклів „нагрівання \leftrightarrow охолодження”.

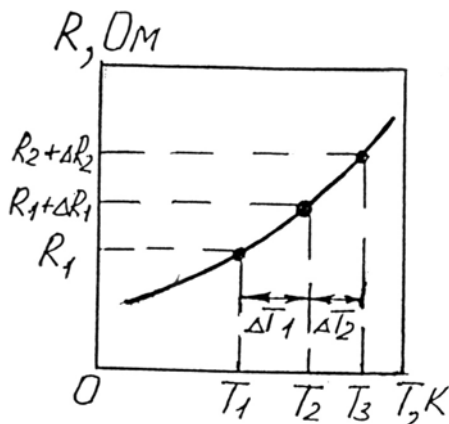


Рисунок А1 – До визначення величини ТКО:

$$\hat{a}(T_1) = \frac{1}{R_1} \frac{\ddot{R}_1}{\ddot{T}_1}, \quad \hat{a}(T_2) = \frac{1}{R_2} \frac{\ddot{R}_2}{\ddot{T}_2}, \quad \text{де}$$

$T_2 = T_1 + \Delta T_1$; $R_2 = R_1 + \Delta R_1$; у загальному випадку $\ddot{R}_1 \neq \ddot{R}_2$ і $\ddot{T}_1 \neq \ddot{T}_2$

За останньою кривою охолодження будується залежність $R(T)$. Після цього шляхом графічного диференціювання (пояснення на рис.А1) знаходяться величини S , β та S_p . Величина \ddot{T} вибирається в межах від 10 до 50 К. Порівняти між собою β і β_0 при $T \cong 300$ К.

Порядок виконання роботи:

- підготувати установку ВУП-5М до проведення експерименту;
- одержати металевий терморезистор і термостабілізувати його;

- побудувати експериментальну залежність $R(T)$ і розрахункові дані для S , β та S_p ;
- порівняти отримані результати для β і β_0 при $T \cong 300 \text{ K}$.

Зміст звіту:

- назва та мета роботи;
- конспект елементів теорії та методичних вказівок;
- експериментальні залежності $R(T)$ для 2-3 термостабілізаційних циклів;
- пояснення залежності $\beta(T)$.

Контрольні запитання

1. Який фізичний механізм виникнення опору в провідниках?
2. Що спільного та відмінного у співвідношеннях (A1) і (A2)?
3. Який фізичний зміст ТКО ? Довести, що $\beta_R = \beta_p$.
4. Отримати температурну залежність для ТКО.
5. Яка причина від'ємного значення ТКО?

Список літератури

1. Лобода В.Б., Проценко И.Е., Смолин М.Д. и др. Исследование размерных и температурных эффектов в тонких пленках переходных металлов //УФЖ.-1985.-Т.30, №5.- С. 435-440.
2. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).- Суми:Вид-во СумДУ, 2002.- С.141-147.
3. Проценко І.Ю., Шумакова Н.І., Овчаренко Ю.М. Фізика твердого тіла. - Суми: Вид-во СумДУ, 2002.- 76с.

А.2 Датчики тиску на основі двошарової металевої плівки

Лабораторна робота 2 Датчики тиску на основі двошарової металевої плівки.

Мета роботи: виготовити плівковий датчик тиску, проградувати його в інтервалі тиску залишкових газів у вакуумній камері від 10 до 40 Па.

Елементи теорії. Принцип роботи датчика тиску повною мірою визначається матеріалом робочого елемента. Так, кремнієвий датчик виготовляється у вигляді пластини, частина якої витравлюється до утворення тонкої мембрани. Методом іонної імплантації на мембрані формується резистивний елемент із з'єднаннями. При зміні тиску мембрана прогинається і під дією п'єзоелектричного ефекту відбувається зміна опору резистивних елементів. Переваги даного датчика – це висока чутливість, лінійність шкали, незначний гістерезис та ін. Недолік полягає в підвищеній температурній чутливості, хоча цей недолік не принциповий, оскільки в кремнієвих датчиках можна реалізувати внутрішню температурну компенсацію.

У тому випадку, коли використовується тонкоплівковий металевий резистор, його чутливість до тиску пов'язана із тензоефектом. Вплив тиску на процеси електроперенесення полягає у такому.

При протіканні електричного струму через плівковий резистор електрони провідності розсіюються на фонах, межах зерен, зовнішніх поверхнях плівки, дефектах кристалічної будови. Якщо резистор виготовлений у вигляді багатошарової системи, то виникає новий механізм розсіювання на межі поділу окремих шарів. При деформації резистора (мова іде про деформації $\sim 1\%$) зміна опору буде відбуватися в результаті зміни таких параметрів: середньої довжини вільного пробігу електронів (λ_0), коефіцієнтів проходження

електроном межі зерна (r), дзеркальності поверхні (p) та проходження межі поділу окремих шарів (Q); можлива також деяка зміна опору в результаті перерозподілу і генерації нових дефектів кристалічної будови. Таким чином, формулу для загальної зміни опору можна записати так:

$$\Delta R = \Delta R_{\lambda 0} + \Delta R_r + \Delta R_p + \Delta R_Q + \Delta R_d, \quad (A5)$$

де різні доданки дають різний за величиною і навіть за знаком внесок у зміну ΔR . Металеві резистори, так як і кремнієві, мають досить високу чутливість, надійність і стабільність метрологічних характеристик. Крім того, вони не так чутливі до температурних змін та хімічно активних середовищ.

Конструкція датчика. Робочою частиною датчика є тонка (0,5 – 1 мм) тефлонова або фторопластова мембрана, на поверхню якої термовакuumною конденсацією наноситься чутливий резистор у вигляді двошарової системи Cu/Cr або (Cu/Ni)/Cr (шар Cr використовується в основному для покращання адгезії шару Cu або Ni і контактних площадок). Двошаровий резистор Cu/Ni більш чутливий до деформації, ніж одношаровий із Cu. Матеріал мембрани вибирається із тих міркувань, що і тефлон, і фторопласт мають хороші вакуумні властивості та низьку залишкову деформацію. Електричні контакти приєднуються до контактних площадок за допомогою мікропаяння. Розміри датчика відповідають розмірам посадкового гнізда для вакуумметра типу ПМТ.

На рис. А2 наведено схематично зображення конструкції описаного датчика.

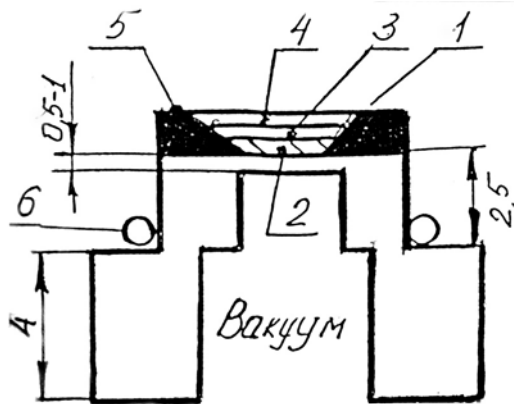


Рисунок А2 – Датчик тиску на основі плівкової системи Cu/Ni: 1–контактна площадка із Cu (електролітичне осадження)/Cu (термічне осадження) /Cr; 2-плівка Cr; 3- плівка Ni; 4- плівка Cu; 5- контакт; 6- ущільнювач

Оскільки дана конструкція датчика не має захисту резистивного елемента, то ресурс його роботи незначний (декілька днів) через процеси старіння. Градування датчика можна здійснити за допомогою термопарного вакуумметра типу ПМТ (при розміщенні датчика в вакуумній камері) або насоса Комовського (при вимірюванні тисків, більших від атмосферних). Криву градування краще за все зображувати в координатах $\Delta R/R_n$ від P , оскільки в цьому випадку збільшення опору в процесі старіння або деформації не буде відігравати роль (R_n - початковий опір).

Правила техніки безпеки. У вакуумній установці та вимірювальному приладі використовується висока напруга. У зв'язку з цим вимірювання проводити у присутності інженера.

Методичні вказівки. Провести експериментальні вимірювання залежності опору від тиску (експеримент по-

вторити три рази). Побудувати отримані залежності в координатах $\Delta R/R_{\Pi} - P$. На лінійному відрізку залежності визначити баричний коефіцієнт опору за співвідношенням:

$$\hat{a}_p = \frac{1}{R_{\Pi}} \frac{\ddot{A}R}{\ddot{A}P}. \quad (A6)$$

Згідно з (A6) β_p – це фізична величина, яка чисельно дорівнює відносній зміні опору резистора при зміні тиску на один Па. Оскільки вимірювання здійснюється в області форвакууму ($\Delta p=10-40$ Па), то зміна тиску відбувається з великою швидкістю, що необхідно врахувати при фіксації опору.

Порядок виконання роботи:

- підготувати установку ВУП-5М і датчик до експерименту;
- побудувати залежність $\Delta R/R_{\Pi}$ від P ;
- пояснити причину відхилення кривої градування від лінійного характеру;
- обчислити баричний коефіцієнт опору β_p .

Зміст звіту:

- назва і мета роботи;
- конспект елементів теорії та методичних вказівок;
- три експериментальні залежності в координатах $\Delta R/R_{\Pi}$ від P ;
- величина β_p .

Контрольні запитання

1. Які фізичні процеси призводять до зміни опору при деформації напівпровідникових чи металевих резисторів?
2. У чому полягає перевага багатошарової плівкової системи у порівнянні із одношаровою (проілюструвати рисунком)?

3. Який фізичний зміст і одиниця вимірювання баричного коефіцієнта опору?
4. Зобразити схематично плівковий датчик тиску.

Список літератури

- 1 Виглеб Г. Датчики. - Москва: Мир, 1989.-С.62-70.
- 2 Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).- Суми:Вид-во СумДУ, 2002.- С.141-147.

ДОДАТОК Б*(довідковий)***ТЕМАТИКА КУРСОВИХ РОБІТ****Тема 1 Датчики температури**

Список літератури

1. Виглеб Г. Датчики. - Москва: Мир, 1989.-С.14.
2. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC /Под ред. У. Томпкинса и Дж. Уэбстера.- Москва: Мир, 1992.- С.269.

Тема 2 Терморезистор на основі плівки германію

Список літератури

1. Mitin V. F. Resistance thermometers based on the germanium films //Semiconductor Physics, Quantum and Optoelectronics.-1999.-V. 2, № 1.-P.115-123.

Тема 3 Термодатчик на основі плівки платини

Список літератури

1. Georgiev I.K., Dimitrov D.A., Zahariev A.L. Stability and calibrating methods of some thin film platinum thermometers in the range-13,8 -273,16 K //ЖФД.-2000.-v.4, №2.-P.216-224.

Тема 4 Тензорезистори для високих і криогенних температур

Список літератури

1. Клокова Н.П. Тензорезисторы.- Москва: Машиностроение, 2000.-С.152.
2. Тензодатчики для экспериментальных исследований /Н.П. Клокова, В.Ф. Лукашик, Л.М. Воробьева и др.- Москва: Машиностроение, 1972.-С. 37.

Тема 5 Датчики тиску

Список літератури

1. Виглеб Г. Датчики. - Москва: Мир, 1989.-С.62-70.

Тема 6 Датчики магнітного поля

Список літератури

1. Виглеб Г. Датчики. - Москва: Мир, 1989.-С.62-70.
2. Васильев Н.П., Касаткин С.И., Аверин Н.Н. и др. Разработка тонкопленочных двухслойных магниторезистивных датчиков// Приборы и системы управления.- 1995.- № 2.-С.24-26.
3. Ravlik A.G., Roshchenko S.T., Samophalov V.N. et all. New magnetoresistive elements based on W. Thomson effect //Functional Materials.-1999.-V.6, № 5.-P.897-902.

Тема 7 Датчики вологості

Список літератури

1. Виглеб Г. Датчики. - Москва: Мир, 1989.-С.62-70.

Тема 8 Фізичні процеси у плівковому тензодатчику

Список літератури

1. Мейксин З.Г. Несплошные и керметные пленки //Физика тонких пленок /Под ред. Г. Хасса, М.Франкомба и Р.Гофмана.- Москва: Мир, 1978.- Том VIII.-С.142-150.
2. Ласюченко О.Б., Проценко І.Ю., Хворост В.А. Фізичні процеси у тензодатчику на основі металевої плівки //Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка.- 2001.-№3-4.-С. 58-66.

Тема 9 Фізичні властивості плівкових матеріалів для тензо-датчиків і терморезисторів

Список літератури

1. Проценко І.Е., Хворост В.А., Чорноус А.Н. Фазообразование, диффузионные процессы и электрофизические свойства многослойных металлических пленочных структур //Тонкие пленки в оптике и электронике.- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002.- Ч.2.-С. 6-22.

Тема 10 Нетрадиційні плівкові сенсори

Список літератури

1. Тонкие пленки в оптике и электронике.-Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002.- Ч.2.- С. 242-261.

Тема 11 Датчики оксиду азоту на основі плівки KBi_3S_5

Список літератури

1. Дьяконенко Н.Л. Формирование тонких пленок тройных халькогенидных соединений, содержащих щелочной элемент //Дис. ... канд.физ.-мат.наук.- Харьков: ХГТУ, 1999.-С. 119.

Тема 12 Сенсор NO_2 на основі пористого кремнію

Список літератури

1. Boarino L., Baratto C., Geobaldo F. et all. NO_2 monitoring at room temperature by a porous si gas sensor //Gryst. Res. and Technol.-1999.-I-I /P 46.

Тема 13 Датчики газів на основі металевих оксидів

Список літератури

1. Тутов Е.А., Рябцев С.В., Андрюков А.Ю. Детектирование диоксида азота аморфными пленками триоксида вольфрама //Письма в ЖТФ.- 2000.-Т. 26, Вып. 3.-С. 38-42.

2. Кисин В.В., Ворошилов С.А., Сысоев В.В. и др. Моделирование процесса низкотемпературного получения газочувствительных пленок оксида олова //ЖТФ.- 1999.- Т. 69, Вып. 4.-С. 112-113.
3. Ландочкин И.Г., Клементьев С.В., Предеин А.В. и др. Терморезистор на основе диоксида ванадия для схем тепловой защиты //Приборы и системы управления.- 1989.-№7.-С. 33-35.

Тема 14 Сенсор для реєстрування хлорофторовуглеців (фріонів)

Список літератури

1. Филиппов В.И., Васильев А.А., Терентьев А.А. и др. Сенсор на основе структуры Pt /LaF₃ /SiO₂ /SiC для детектирования хлорофтороуглеродов //ЖТФ.- 1999.-Т.69, Вып.4.-С. 80-85.

Тема 15 Газовий сенсор аміаку

Список літератури

1. Бомк О.Й., Ильченко Л.Г., Ильченко В.В. та ін. Про природу чутливості до аміаку газових сенсорів на основі структур надтонка Ті плівка – Si //УФЖ.- 1999.-Т. 44, №6.-С.750-763.

Тема 16 Фізичні процеси у плівковому терморезисторі

Список літератури

1. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).- Суми:Вид-во СумДУ, 2002.- С.128-149.

Тема 17 Механізми деградації мікроструктур в датчиках тиску

Список літератури

1. Адарчин С.А., Кужненко А.С., Кожитов Л.В. и др. Один из механизмов деградации микроэлектрических структур датчиков давления// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2002.- № 2.- С. 55-57.

Тема 18 Біметалеві шари і планарні структури в оптоелектронних сенсорах

Список літератури

1. Ширшов Ю.М., Свечников С.В., Кияновский А.П. и др. Биосенсор на основе планарного поляризационного волновода// Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- 1998.- № 33.- С. 44-51.
2. Ширшов Ю.М., Кияновский А.П., Ушенин Ю.В. и др. Оптимизация конструкции планарно-поляризационного интерферометра// Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- 1999.- № 34.- С. 170-177.
3. Shirshov Yu.M., Samoylov A.V., Zinyo S.A. et all. Bimetallic Layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance// Sensors.- 2002.- vol.2.- P.62-70 ([www.mdpi.net/sensors.](http://www.mdpi.net/sensors))

Тема 19 Тензорезистори на основі плівок сульфїду самарїю

Список літератури

1. Ханова Г.В. Розробка фізико-технологічних основ одержання плівок сульфїду самарїю для тензорезисторів і дослідження їх параметрів: Автореферат дис.... канд. фіз.-мат. наук.- Київ: ІФН НАНУ, 2000.- 15с.

Тема 20 Використання кераміки для товстопліткових терморезисторів

Список літератури

1. Мартюшов К.И., Зайцев Ю.В. Технология производства резисторов.- Москва: Высш.шк., 1972.- 312с.
2. Шпотюк О.И., Гадзаман И.В., Охримович Р.В. и др. Использование керамики на основе твердых растворов (Ni, Co, Mn, Cu)₃O₄ для толсто пленочных терморезисторов// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2002.- № 4-5.- С. 55-57.