

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Ужгородський національний університет

ГОРВАТ А.А., ВИСОЧАНСЬКИЙ Ю.М.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ

СЕНСОРИКИ

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
для студентів вищих навчальних закладів,

УЖГОРОД - 2007

ББК В 3в614 я73
УДК 53.084.2 (075.8)
Г–67

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист 14/18.2 – 433 від 21.02.2006р)*

Фізичні основи сенсорики. Навчальний посібник/
Горват А.А., Височанський Ю.М. Ужгород, УжНУ, 2007 - 120 с.

У посібнику наведені описи лабораторних робіт практикуму з фізичних основ сенсорики. Кожна робота містить теоретичні відомості, в яких описано принципи роботи досліджуваних сенсорів фізичних і хімічних величин, їх конструкцію, основні параметри і характеристики та основні схеми включення; методику проведення експерименту з описом схем вимірювання та конкретними експериментальними завданнями. Завдання практикуму передбачають модифікацію з метою їх індивідуалізації для кожного студента та можливості самостійного планування експерименту з елементами наукового дослідження.

Для студентів, які навчаються за такими напрямками підготовки фахівців як "Електроніка", "Приладобудування", "Фізика" та "Прикладна фізика", а також за деякими іншими інженерними спеціальностями.

Р е ц е н з е н т и:

академік НАН України,

доктор фіз.-мат. наук, професор Шпенник О.Б.,

доктор фіз.-мат. наук, професор Половинко І.І.,

доктор фіз.-мат. наук, професор Клименко А.П.,

доктор фіз.-мат. наук, професор Пуга П.П.

ISBN 966-7400-80-8

©2007. Горват А.А., Височанський Ю.М.

ПЕРЕДМОВА

Автоматизація виробничих процесів та контролю технологічних параметрів, а також вдосконалення техніки наукових досліджень вимагають створення широкого класу сучасних первинних перетворювачів або сенсорів різних фізичних і хімічних величин. Значну роль сенсори відіграють у проведенні медичних обстежень для одержання об'єктивної інформації про фізіологічні параметри організму людини та інших біологічних об'єктів.

Розробкою сенсорів у даний час займаються чималі наукові і дослідно-конструкторські колективи, ще більше фахівців у своїй роботі зустрічається з вибором різноманітних сенсорів, їх експлуатацією і ремонтом або заміною. У цих умовах особливо гостро відчувається потреба у спеціалістах, які знайомі з фізичними принципами роботи сенсорів, особливостями будови різноманітних перетворювачів на їх основі, а також можливостями їх практичного використання. Тому в навчальні плани ряду спеціальностей та напрямів підготовки фахівців включені курси, присвячені первинним перетворювачам і сенсорам, методам вимірювання різноманітних фізичних і хімічних величин. У свою чергу рівень підготовки фахівців в значною мірою визначається не тільки глибоким засвоєнням теоретичних знань, а й умінням застосовувати теоретичні знання для вирішення конкретних практичних завдань. Розвитку практичних вмінь найбільше сприяє виконання лабораторних робіт.

Навчальний посібник містить описи лабораторних робіт, присвячених дослідженню різноманітних перетворювачів: від елементарних фото-, термо- і тензорезисторів до сучасних, наприклад, оптоволоконних сенсорів концентрації та твердо-тільних плівкових сенсорів токсичних газів. Кожна робота складається з теоретичних відомостей, в яких описано принципи роботи досліджуваних сенсорів фізичних і хімічних величин, їх конструкцію, параметри і характеристики та основні схеми включення, методика проведення експерименту з описом схем

вимірювання та конкретними експериментальними завданнями і ходом виконання роботи.

Особливістю лабораторного практикуму є те, що завдання легко модифікувати, тобто перетворити в індивідуальне для кожного студента і, таким чином, забезпечити можливість проведення невеликого наукового дослідження з елементами планування експерименту.

Автори виражають надію на те, що посібник допоможе студентам одержати навички дослідження основних параметрів первинних перетворювачів фізичних і хімічних величин. Він буде також корисним для майбутньої науково-дослідної роботи студентів, при виконанні ними курсових та дипломних робіт.

Посібник розрахований, у першу чергу, на студентів які навчаються за напрямами “Електроніка”, “Приладобудування”, “Прикладна фізика”, однак може бути корисним майбутнім фахівцям інших спеціальностей, які займатимуться у своїй повсякденній роботі медико-біологічними, хіміко-технологічними дослідженнями та різноманітними фізико-технічними вимірюваннями.

Лабораторна робота №1

Вивчення роботи і дослідження характеристик тензорезисторів

Мета роботи: дослідити характеристики і параметри тензорезисторів та вивчити схеми їх включення.

Теоретичні відомості

Принцип дії тензорезистора заснований на ефекті зміни електричного опору провідника під дією механічних деформацій. Деформація об'єкта, на якому закріплений тензорезистор, викликає деформацію чутливого елемента, в результаті чого в загальному випадку змінюється його довжина l , поперечний переріз S та питомий опір ρ , що приводить до зміни електричного опору

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1)$$

Відносна зміна опору тензорезистора, зумовлена зміною геометричних розмірів та фізичних властивостей, зокрема питомого опору матеріалу чутливого елемента, і при деформаціях стиску і розтягу визначається таким наближеним співвідношенням:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

Основними характеристиками тензорезистора є його активний опір R_0 , база l та коефіцієнт тензочутливості K , який визначається виразом:

$$K = \frac{\Delta R}{R_0 \varepsilon}, \quad (3)$$

де $\varepsilon = \Delta l/l$ – відносна деформація тензорезистора.

Для рідких матеріалів (ртуті, електролітів), що практично не змінюють свого об'єму під час деформації, коефіцієнт тензочутливості $K = 2$. Це стає зрозумілим, якщо згадати, що опір провідника при постійному об'ємі залежить від квадрату його довжини:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad \Delta R = \frac{\rho}{V} 2l\Delta l$$

звідки

$$K = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} = 2, \quad (4)$$

де V – об'єм провідника.

При пружних деформаціях у твердих тілах зміна їхньої довжини пов'язана зі зміною поперечних розмірів і характеризується коефіцієнтом Пуассона $\mu = \varepsilon_{\perp}/\varepsilon$, де $\varepsilon_{\perp} = \Delta b/b$ – відносна величина поперечної деформації; b – поперечний розмір провідника квадратного перерізу (або радіус для круглого). У цьому випадку

$$K = \frac{\Delta R}{R\varepsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta\rho}{\varepsilon\rho}. \quad (5)$$

Коефіцієнт Пуассона має значення 0,24–0,4, отже, складова коефіцієнта тензочутливості, яка зумовлена зміною геометричних розмірів провідника K_l , лежить в межах 1,48–1,8.

Феноменологічна теорія п'єзорезистивного ефекту встановлює зв'язок між зміною питомого електричного опору провідника і механічним напруженням в ньому або його деформацією. Цей зв'язок у тензорному вигляді (див. рис. 1, а, б) можна подати як

$$\lambda_{im} E_m = j_i + \pi_{ijkl} \sigma_{kl} j_j, \quad (6)$$

або

$$\lambda_{im} E_m = j_i + m_{ijkl} \varepsilon_{kl} j_j, \quad (7)$$

де $i, j, k, l, m = (1, 2, 3)$, $\lambda_{im} = 1/\rho_0$ – питома провідність у відсутності механічних напружень і деформацій, E_m – компоненти вектора напруженості електричного поля, j_i – компоненти вектора густини струму. Коефіцієнти π_{ijkl} та m_{ijkl} називаються відповідно п'єзорезистивними та еласторезистивними коефіцієнтами і є тензорами четвертого рангу. Вони зв'язані між собою через коефіцієнти податливості s та модулі пружності c : $\pi = ms$, $m = cs$ (s і c є також тензорами четвертого рангу).

Питомий опір у металах залежить тільки від напруги розтягу

або стиснення, тому з урахуванням симетрії тензора σ та загальноприйнятих скорочень для індексів тензора (11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 12=21 \rightarrow 6, 13=31 \rightarrow 5, 23=32 \rightarrow 4) рівняння (6) можна переписати як

$$E_1/j_1 = \rho_1 = \rho_0(1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}\sigma_2 + \pi_{13}\sigma_3) = \rho_0 [1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)], \quad (8)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – механічні напруги в трьох взаємно перпендикулярних напрямках; $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{13}$ – тензорезистивні коефіцієнти, які називаються, відповідно, поздовжнім і поперечними; E_1 і j_1 – напруженість поля і густина струму в напрямку 1, що співпадає з напрямком дії напруги σ_1 .

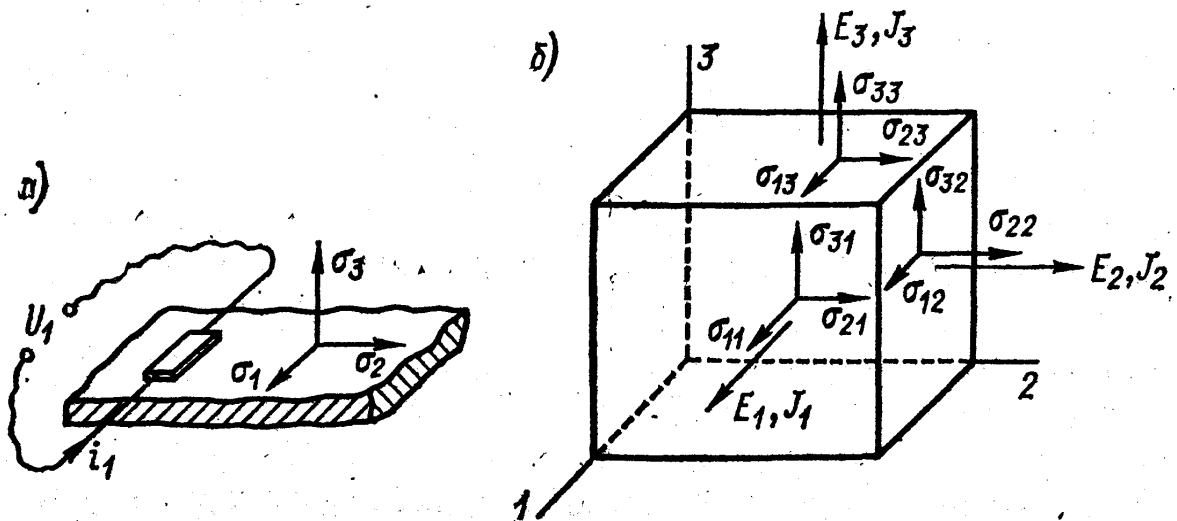


Рис. 1. Тензорезистивний ефект (а) та компоненти тензора механічних напружень σ , векторів напруженості електричного поля E і густини струму j (б).

Для металевого тензоелемента $\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$ і $\pi_{12} = \pi_{21} = \pi_{13} = \pi_{31} = \pi_{23} = \pi_{32}$. Для константана, з якого найчастіше виготовляються тензорезистори, $\pi_{11} = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$, $\pi_{12} = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$. При лінійно напруженому стані $\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, отже

$$K = [\pi_{11}\sigma_1 + (1 + 2\mu)]. \quad (9)$$

Для виготовлення дротяних і плівкових металевих тензорезисторів використовуються матеріали, які мають велике значення коефіцієнта тензочутливості та мале значення температурного коефіцієнта опору. Основні параметри таких матеріалів наведено у табл. 1.

Основним критерієм оцінки придатності матеріалу для цього типу тензорезисторів є залежність відносної зміни опору від зміни відносної деформації самого матеріалу в областях пружної та пластичної деформації. Експериментально встановлено, що константан є єдиним матеріалом, який має однакову залежність для обох областей деформації

Мале значення чутливості металевих тензорезисторів спонукало розробку сенсорів деформацій на основі напівпровідникових матеріалів, в яких тензочутливість обумовлена, в основному, зміною питомого опору при деформації.

Таблиця 1. Параметри матеріалів металевих тензорезисторів

Матеріал	Коефіцієнт тензочутливості	Температурний коефіцієнт опору (ТКО), 10^{-6} K^{-1}	Температурний коефіцієнт лінійного розширення, 10^{-6} K^{-1}	Термо-ЕРС з міддю, мкВ/К^{-1}
Константан	1,7–2,1	± 50	14–15	–40
Ніхром	2,1–2,3	150	4	+22
Нікель	12	6000	12	–22,2
Манганін	0,47–0,5	± 10	16–18	–2
Елінвар	3,2–3,5	300	13–14	+20
Хромель	2,5	100–500	14,8	+ 16

Головні п'єзорезистивні коефіцієнти залежать від багатьох факторів, а саме: матеріалу напівпровідника, типу його провідності, питомого опору (кількості домішок), температури, величини механічних напружень і деформацій.

В алмазоподібних кристалічних напівпровідниках (Ge, Si), які мають високу ступінь симетрії, питома провідність при нормальних умовах ізотропна. Але, якщо по одній або кількох кристалографічних осях германію або кремнію прикладена механічна напруга, то відбувається анізотропна зміна провідності. При цьому в умовах одночасної дії електричного поля і механічних напружень як стиску-розтягу, так і зсуву, кожна із

компонент E_1, E_2, E_3 напруженості електричного поля є функцією густини струму, що протікають у всіх трьох напрямках, тобто

$$E_i = \varphi_i(j_1, j_2, j_3)$$

$$E_1/\rho_0 = j_1(1 + \pi_{1111}\sigma_{12} + \pi_{1122}\sigma_{22} + \pi_{1133}\sigma_{33}) + j_2 \pi_{1212}\sigma_{12} + j_3 \pi_{1313}\sigma_{13}$$

$$E_2/\rho_0 = j_2(1 + \pi_{2211}\sigma_{12} + \pi_{2222}\sigma_{22} + \pi_{2233}\sigma_{33}) + j_1 \pi_{1212}\sigma_{12} + j_3 \pi_{2323}\sigma_{23} \quad (10)$$

$$E_3/\rho_0 = j_3(1 + \pi_{3311}\sigma_{12} + \pi_{3322}\sigma_{22} + \pi_{3333}\sigma_{33}) + j_1 \pi_{1212}\sigma_{12} + j_2 \pi_{2323}\sigma_{23}$$

Переходячи до заміни індексів і враховуючи, що внаслідок симетрії для кремнію

$$\begin{aligned} \pi_{11} &= \pi_{22} = \pi_{33}, \\ \pi_{11} &= \pi_{23} = \pi_{13}, \\ \pi_{44} &= \pi_{55} = \pi_{66}, \end{aligned} \quad (11)$$

приведені вирази (10) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} E_1/\rho_0 &= j_1[1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)] + \pi_{44}(j_2 \sigma_6 + j_3 \sigma_5) \\ E_2/\rho_0 &= j_2[1 + \pi_{11}\sigma_2 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_3)] + \pi_{44}(j_1 \sigma_6 + j_3 \sigma_4) \\ E_3/\rho_0 &= j_3[1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_1)] + \pi_{44}(j_2 \sigma_4 + j_1 \sigma_5) \end{aligned} \quad (12)$$

Коефіцієнти $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ називаються відповідно поздовжнім, поперечним і зсувним тензорезистивними коефіцієнтами. Якщо тензоелемент вирізаний вздовж однієї із кристалографічних осей, наприклад вздовж осі 1, і механічна напруга прикладена вздовж цієї ж осі, то

$$E_1/\rho_0 = j_1(1 + \pi_{11}\sigma_1). \quad (13)$$

У загальному ж випадку сумарний тензорезистивний коефіцієнт залежить від орієнтації тезочутливого елемента відносно кристалографічних осей.

Значення тензорезистивних коефіцієнтів залежать від концентрації домішок в кремнії і, отже, зв'язані із значенням питомого опору. Для кремнію:

$$p\text{-типу з } \rho_0 = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см} \quad \pi_{44} = 94,5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}, \quad \pi_{11} = 0,048\pi_{44} = 0,45 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}, \quad \pi_{12} = -0,008\pi_{44} = 0,07 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1};$$

$$n\text{-типу з } \rho_0 = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см} \quad \pi_{11} = -72,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}, \quad \pi_{12} = -0,52\pi_{11} = 38 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}, \quad \pi_{44} = 0,13\pi_{11} = -0,5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}.$$

З фізичної точки зору тензорезистивний ефект пояснюється на основі багатодолинної моделі енергетичних зон кристалів. Суть її полягає в тому, що залежність енергії E від хвильового вектора k має складний вигляд: в зоні провідності є не один а

декілька мінімумів енергії для електронів (рис. 2, *a*). Відповідні мінімумам ізоенергетичні поверхні в k -просторі є еліпсоїдами обертання, які витягнуті вздовж осей симетрії кристалу. В Si – це напрям $[100]$, тобто є 6 еквівалентних еліпсоїдів, в Ge - напрям $[111]$, тобто 4 еліпсоїди. У відповідності з осями еліпсоїдів розрізняють поздовжню m_{\parallel}^* і поперечну m_{\perp}^* ефективні маси. Оскільки маси різні, то різними будуть і рухливості u ($u \sim 1/m^*$). При відсутності деформації мінімуми енергії в зоні провідності знаходяться на одному рівні (рис. 2, *б*). При деформації один мінімум зони провідності піднімається, а другий – опускається (рис. 3). При цьому частина електронів переходить з першої долини в другу. Кількість електронів з великою рухливістю, які рухаються в напрямі електричного поля, зростає. Відповідно, зростає і питома провідність. Таким чином, ефект зміни питомого опору при деформації кристала визначається кількістю електронів, які перейшли з долини в долину, і анізотропією ефективних мас. В кремнії n -типу анізотропія ефективних мас складає $m_{\parallel}^*/m_{\perp}^* = 5$, а в германії n -типу – $m_{\parallel}^*/m_{\perp}^* = 20$.

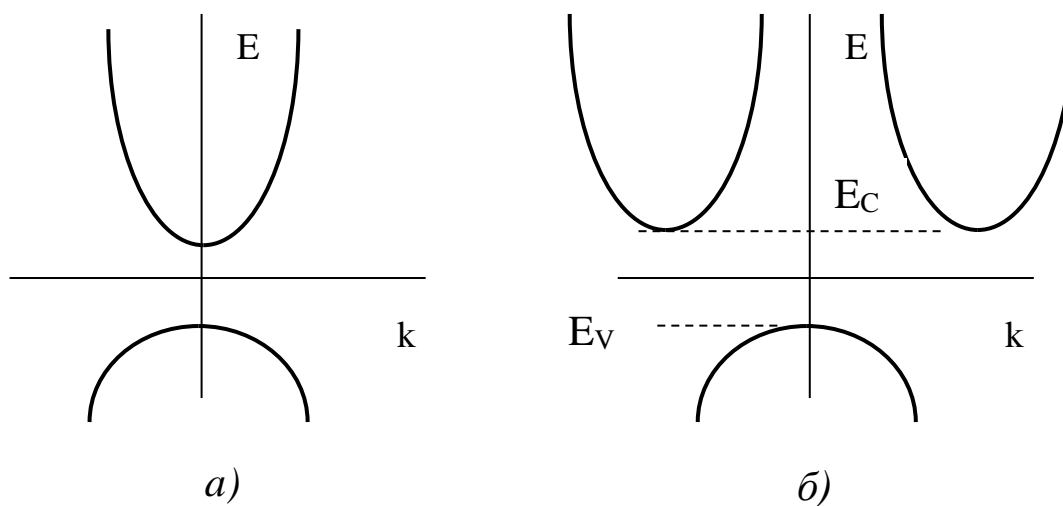


Рис. 2. Структура енергетичних зон в напівпровідникових кристалах.

Величина K в напівпровідниках залежить від кристалографічного напрямку, типу провідності і питомого опору і може досягати 200. Тобто тензочутливість напівпровідникових

сенсорів деформацій обумовлена, на відміну від металевих, не зміною їх геометричних розмірів, а, в першу чергу, зміною питомого опору. Разом з тим слід відмітити, що за температурною стабільністю напівпровідникові тензорезистори значно поступаються металевим. В германії з провідністю n - і p -типу найбільша тензочутливість має місце в напрямку [111], в кремнії n -типу – в напрямку [100] і в кремнії p -типу – в напрямку [111]. Найбільш сильно тензорезистивний ефект виражений в Ge, Si, InSb, InP, GaAs, GaSb. Для тензорезисторів найбільш часто використовується кремній. Він має високі значення тензочутливості, руйнівної механічної напруги (9-10 Па) та допустиму робочу температуру.

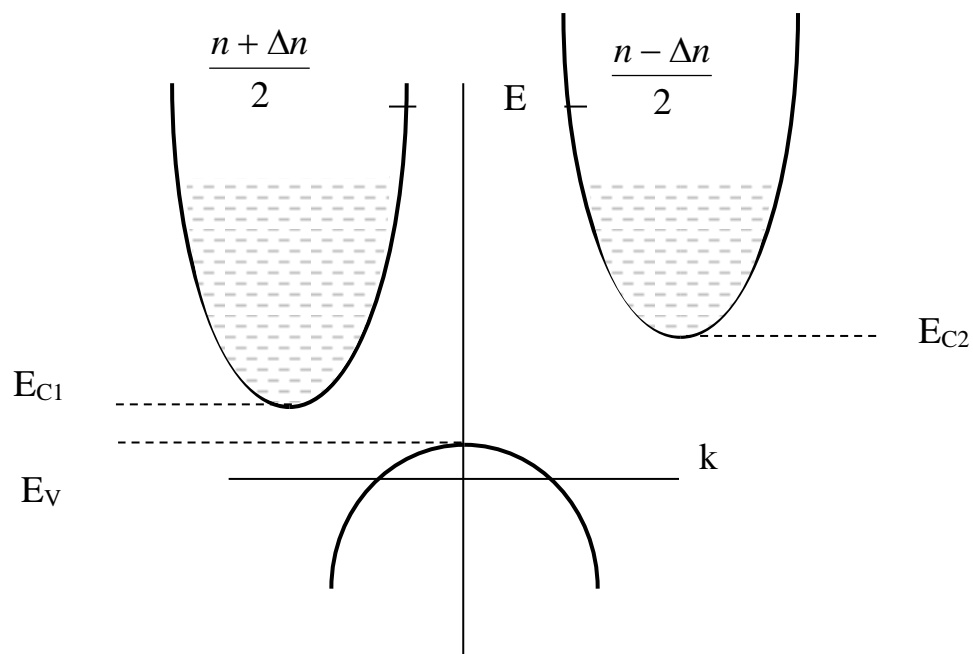


Рис. 3. Зміщення долин енергетичної діаграми при одновісній деформації кристалу кремнію.

Технологія виготовлення напівпровідникових тензорезисторів дуже різноманітна: дифузія домішок у пластинку напівпровідника; виготовлення з германієвої дендритної стрічки; витравлювання тензочутливих елементів з монокристалу напівпровідника; нанесення епітаксціальних плівок напівпровідника на діелектричні та напівпровідникові підкладки і.т.д.

Конструкція тензорезисторів

Конструкція *найбільш простих тензорезисторів* представляє собою смужку тонкого паперу або лакової плівки, на яку наклеюється так звана гратка із зигзагоподібно зігнутої дротини діаметром 0,02 – 0,05 мм, як показано на рис. 4, а. До кінців цієї дротини прикріплюються (пайкою або зварюванням) виводи з міді. Зверху такий перетворювач покривається гнучким лаком та приклеюється до досліджуваної деталі і сприймає деформацію її поверхневого шару. Вимірювальною базою перетворювача є довжина, яка занята тензочутливою дротиною. Найбільш часто використовують перетворювачі із базами 5–20мм, які мають номінальний опір 30 – 500 Ом.

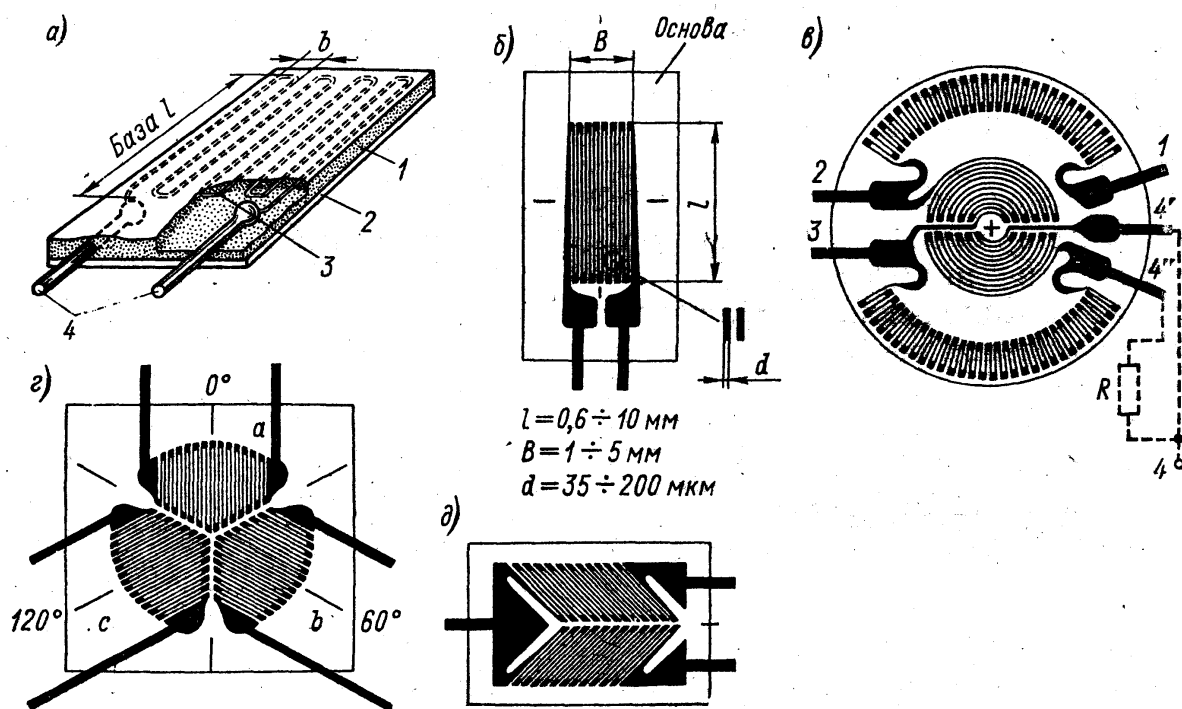


Рис. 4. Конструкції дротяних (а) та плівкових (б, в, г, д) металевих тензорезисторів.

Важливим параметром тензочутливої гратки є відстань між витками. Ця відстань при заданих габаритних розмірах визначає число витків, і, отже, опір тензорезистора, а також допустимий струм, який обмежується саморозігрівом і буде тим меншим, чим менша відстань між витками.

Крім того, наявність поперечних ділянок завдовжки b (рис. 4, *a*) викликає зміну опору тензорезистора за рахунок деформації цих ділянок при дії на деталь напруги, перпендикулярної до осі чутливості тензорезистора. Для дротяних тензорезисторів відношення поперечної і поздовжньої чутливостей визначається відношенням b/l . У плівкових та фольгових тензорезисторах поперечна чутливість значно менша за рахунок зменшення поперечних ділянок (рис. 4, *б*).

Металічні **плівкові перетворювачі** (рис. 4, *б–д*) виготовляються шляхом вакуумного напилення металічної плівки на тонку підкладку. Форма тензорезистора задається маскою, через яку проводиться напилення. Плівкові тензорезистори мають товщину меншу 1 мкм.

Характерні типи плівкових перетворювачів показані на рис. 4, *в, з, д*. На рис. 4, *в* зображений елемент, що складається з чотирьох тензорезисторів, які утворюють чотири плечі моста. Такі елементи наклеюються на мембрану. Тензорезистори, розташовані в центрі, зазнають розтяг, на периферії – стиснення. До виводів 1 і 3 підводиться живлення, виводи 2, 4' і 4'' утворюють вимірювальну діагональ. Виводи 4' і 4'' розімкнені для того, щоб можна було включити додатковий резистор R в потрібне плече і добитися підбором R рівноваги моста. Розетка з трьох тензорезисторів, показана на рис. 4, *з* застосовується при вимірюванні напруг деталі, що знаходиться у плоско-напруженому стані, у тому випадку, коли напрями дії напруг невідомі. За зміною опорів трьох тензорезисторів визначаються напрями головних напруг та їх значення. Елемент, показаний на рис. 4, *д* складається з двох тензорезисторів і використовується при вимірюванні деформації валів при їх скручуванні.

Фольгові перетворювачі (рис. 5) представляють собою стрічку із фольги товщиною 4 – 10 мкм, із якої частина металу видалена травленням таким чином, щоб та частина, яка залишилася, утворила ґратку із виводами. Такий перетворювач придатний для вимірювання напружень або деформацій у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Фольгові перетворювачі мають менші розміри ніж дротяні; відомі фольгові перетворювачі із базою 0,8 мм.

Основа, на яку наноситься дріт, плівка або фольга тензорезистора і яка прикріплюється здебільшого **наклеюванням** до досліджуваного об'єкта, повинна задовольняти певні умови, її товщина повинна бути малою. Основа повинна гарантувати надійність ізоляції тензорезистора відносно поверхні досліджуваного об'єкта. Як основу застосовують папір або органічну плівку.

Основа, як і клей для закріплення, повинні забезпечити сенсору максимальну гнучкість, яка дозволяє йому повністю відтворювати деформації об'єкта. Спочатку використовувались клеї на основі целюлози, оскільки вони забезпечували сильне зчеплення. Однак повзучість спотворює залежність між деформацією та зміною опору перетворювача. Сьогодні широко використовуються полімерні клеї.

Наявність основи та клею, окрім повзучості, викликає і гістерезис залежності відносної зміни опору від відносної деформації. Паперова основа має бути пористою, щоб розчинник клею міг випаровуватися. Клей має володіти доброю адгезією до різних матеріалів та витримувати без розм'якшення якомога вищу температуру, при цьому його повзучість при тривалому навантаженні повинна бути дуже малою. Клей мусить бути стійким до впливу води та масел. Він повинен точно повторювати деформацію поверхні досліджуваної деталі, в тому числі при зміні деформації у часі.

Клеї, які зараз застосовують для звичайних вимірів, переважно гігроскопічні. Проте, ця властивість не впливає на робочі якості тензорезисторів, оскільки за допомогою відповідного покриття після наклеювання тензорезистор стає нечутливим до впливу вологи. Крім цього клеї не витримують підвищених температур. Для наклеювання тензорезисторів на плівковій основі краще використовувати лаки та клеї, які використовувались при виготовленні основи. В умовах нормальних температур доцільно застосовувати клей, який являє собою термопластичний матеріал. За температури близько 140 °C клей розм'якшується, що дозволяє відклеювати тензорезистор під час нагрівання досліджуваної деталі для багаторазового використання та індивідуального градування тензоперетворювачів.

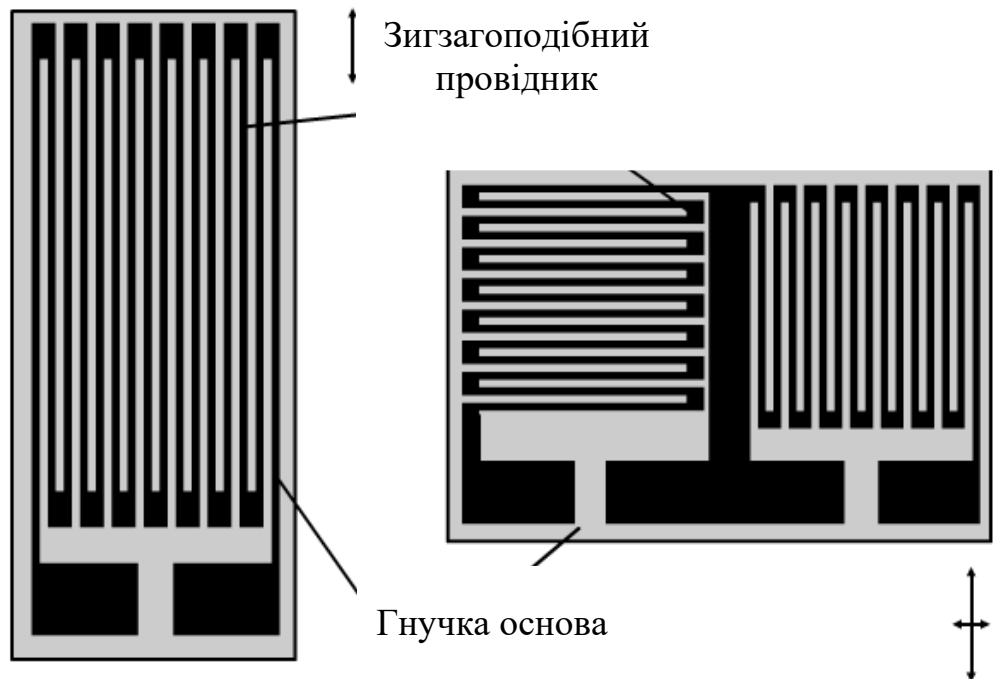


Рис. 5. Конструкція фольгових металічних тензорезисторів.

Напівпровідникові тензорезистори дискретного типу представляють собою тонкі пластинки з кремнію p -типу, вирізані у напрямі осі [111], або з кремнію n -типу, вирізані у напрямі осі [100]; застосовується також германій p і n -типів. На кінцях пластинки розташовані контактні площадки, до яких припаюються виводи; довжина контактної площадки 0,25–0,6 мм. Напівпровідникові тензорезистори мають довжину 2–12 мм, ширину 0,15–0,5 мм. Початкові опори тензорезисторів лежать в діапазоні 50–10 000 Ом, коефіцієнт тензочутливості $K_T = 50 - 200$.

Унаслідок дуже великих температурних похибок дискретні напівпровідникові тензорезистори знаходять застосування тільки для вимірювання дуже малих динамічних деформацій, де вирішальним чинником є коефіцієнт тензочутливості.

Конструкції **інтегральних напівпровідникових тензорезисторів**. Завдяки широкому розвитку планарної технології з'явилася можливість виготовляти датчики з напівпровідниковими тензорезисторами, вирошуючи останні безпосередньо на пружному елементі, виконаному з кремнію або сапфіру. Пружні елементи з кристалічних матеріалів володіють пружними властивостями, близькими до ідеальних, та істотно

меншими похибками гістерезису і лінійності в порівнянні з металевими. Тензорезистор “з’єднується” з матеріалом пружного елемента за рахунок внутрімолекулярних сил, що виключає всі похибки, пов’язані з передачею деформації від пружного елемента до тензорезистора. На одному пружному елементі вирощується, звичайно, не один тензорезистор, а структура у виді напівмоста або навіть цілого моста і, крім того, ще і термокомпенсуючих елементів. Завдяки використанню мікроелектронних технологій два тензорезистори, що входять у півміст, мають значно більшу ідентичність, ніж дискретні резистори; крім того, завдяки малим габаритам тензорезисторів забезпечується більша ідентичність зовнішніх умов і, таким чином, істотно знижуються похибки. Все це веде до широкого розвитку останніми роками датчиків з так званими інтегральними тензорезисторами, виконаними у вигляді КНК–структур (кремній на кремнії) і КНС–структур (кремній на сапфірі). У КНК–структурах електрична ізоляція здійснюється *p-n*-переходом, недосконалість ізоляційних властивостей якого зменшує їх надійність; датчики з КНС–структурами володіють більшою стабільністю характеристик.

Як приклад, на рис. 6, *a* приведений мініатюрний датчик, призначений для вимірювання тиску крові в судинах. Пластина 2 з кремнію приклеюється спеціальним клеєм до кремнієвої підкладки 4. Цей вузол з двох кремнієвих пластин кріпиться до корпусу 1 за допомогою силіконового каучуку 3. Матеріал корпусу повинен бути індиферентний до фізіологічного розчину і мати коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР), близький до КЛТР кремнію. У описуваній конструкції корпус виготовлений із сплаву нікелю, кобальту і кремнію. Датчик кріпиться на кінці поліетиленового катетера і знаходиться безпосередньо в кровоносній судині. Через катетер виводяться провідники вимірювального кола і кріпильний тросик діаметром 200 мкм, крім того, через катетер порожнина між кремнієвими пластинами зв’язана із зовнішнім середовищем; таким чином, в цій порожнині тиск атмосферний. На зовнішні сторони пластин діє вимірюваний тиск.

На рис. 6, *б* зображена у збільшеному масштабі кремнієва пластинка 1, в центрі якої витравлено до товщини 15 мкм

мембрану площею 3×1 мм. На тому ж рисунку показана кремнієва підкладка 2, яка лежить під пластиною 1. На нижній стороні пластини 1 (на мембрані) розташовані тензорезистори 3.

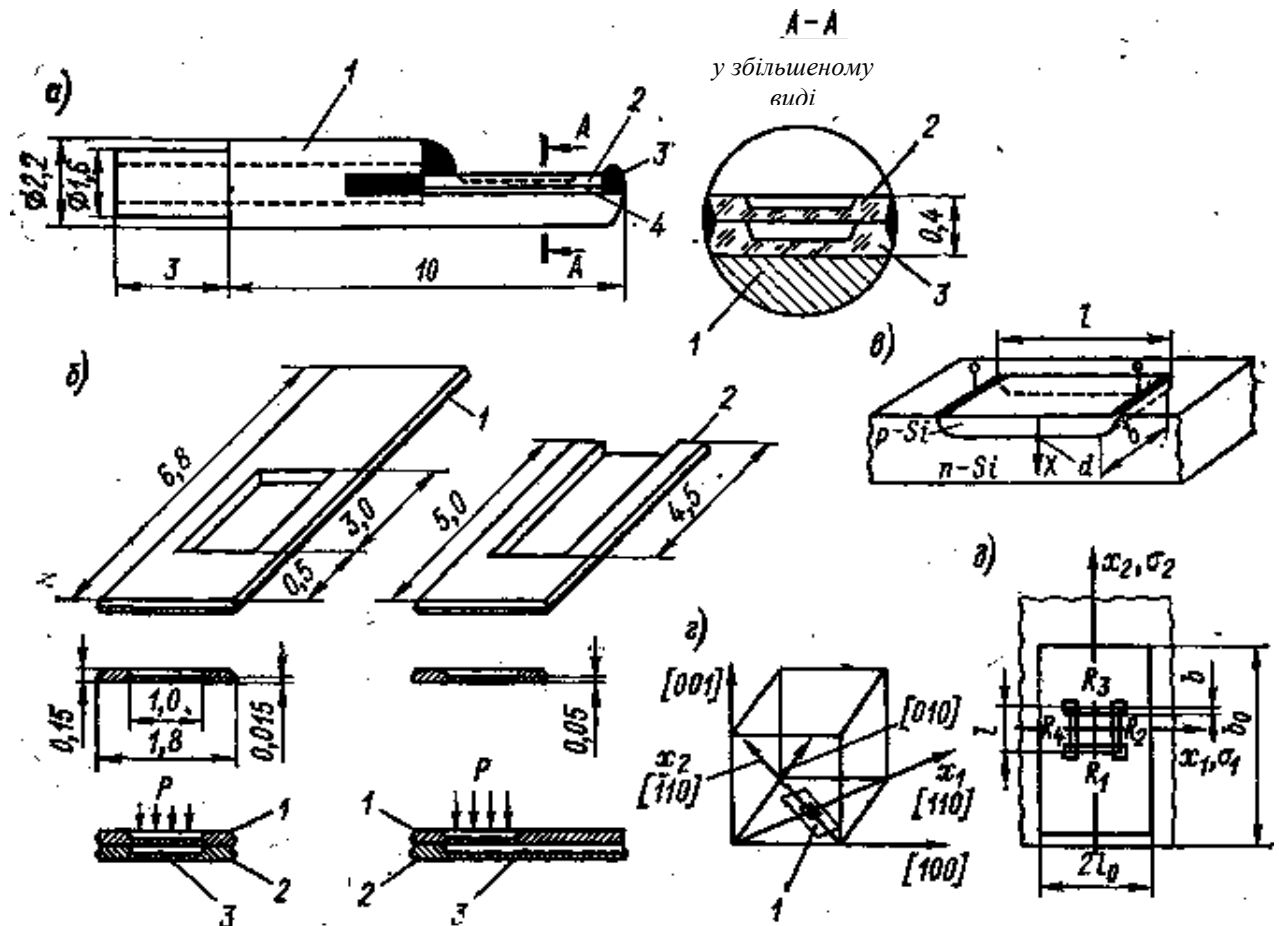


Рис. 6. Конструкції напівпровідникових дискретних та інтегральних тензорезистивних сенсорів.

Тензорезистори на елементі із високоомного кремнію n -типу одержуються методом дифузії, як показано на рис. 6, в, ізоляцією в цьому випадку служить опір p - n переходу. На рис. 6, г показана орієнтація пластини 1 відносно кристалографічних осей. Розміри тензорезистора $l = 320$ мкм, $b = 60$ мкм. На рис. 6, д показана структура, яка представляє собою міст із чотирьох тензорезисторів.

Основні технічні характеристики і параметри тензорезисторів

Деформаційна характеристика – залежність відносної зміни опору тензорезистора $\Delta R/R$ від відносної деформації ϵ .

Номинальний опір ($R_{\text{НОМ}}$) – опір тензорезистора при відсутності його деформації при температурі 293 К. Як правило, $R_{\text{НОМ}}$ має величину від декількох десятків до декілька тисяч Ом.

Коефіцієнт тензочутливості K , заданий формулою (3). Для металевих тензорезисторів K практично постійна величина в той час, як для напівпровідникових K залежить від температури і відносної деформації, оскільки деформаційна характеристика не є лінійною. Зміна коефіцієнта тензочутливості, зв'язана з деформацією, тим більша, чим більший питомий опір напівпровідникового матеріалу тензорезистора.

Взагалі, температурна нестабільність, або вплив температури середовища на основні параметри тензорезисторів, полягає у зміні опору за рахунок ТКО, а також у появі додаткових механічних напруг внаслідок різниці в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу тензорезистора і підкладки.

Основною динамічною характеристикою тензорезисторів є їх власна частота коливань, значення якої для наклеєних резисторів лежить в межах 100–300 кГц.

Важливим параметром тензорезисторів є *допустима потужність розсіювання* $P_{\text{ДОП}}$, яка визначається з умови, що його перегрів не перевищить допустимого значення. Величина $P_{\text{ДОП}}$ залежить від геометричних розмірів тензорезистора. Питома ж потужність існуючих тензорезисторів різного типу має значення $P_{\text{ДОП}} = 20\text{--}200 \text{ мВт/мм}^2$.

При малих значеннях деформацій і тисків чутливість тензорезисторів недостатня і ефективнішими є тензодіоди, які мають значно більший коефіцієнт K . Принцип дії тензодіодів заснований на зміні висоти потенціального бар'єру в p – n -переході при деформації. В якості тензодіодів можуть бути використані тунельні діоди, динамічний опір яких залежить від ступеня деформації і не залежить від температури. При шунтуванні тунельного діода опором, величина якого співрозмірна з від'ємним опором діода, можна одержати величину $K > 10000$.

Методика проведення експерименту

Опис схем вимірювання

Для виконання даної роботи використовується консольна балка рівного перерізу (рис. 7) у вигляді тонкої (3 мм) плоскопаралельної (30х300 мм) пластмасової пластини. При прикладанні сили F до точки А балка буде прогинатись і при цьому її одна (на рис. 7 – верхня) поверхня розтягуватиметься, а інша – стискуватись. Такою ж будуть деформації тензодатчиків, наклеєних на ці поверхні.

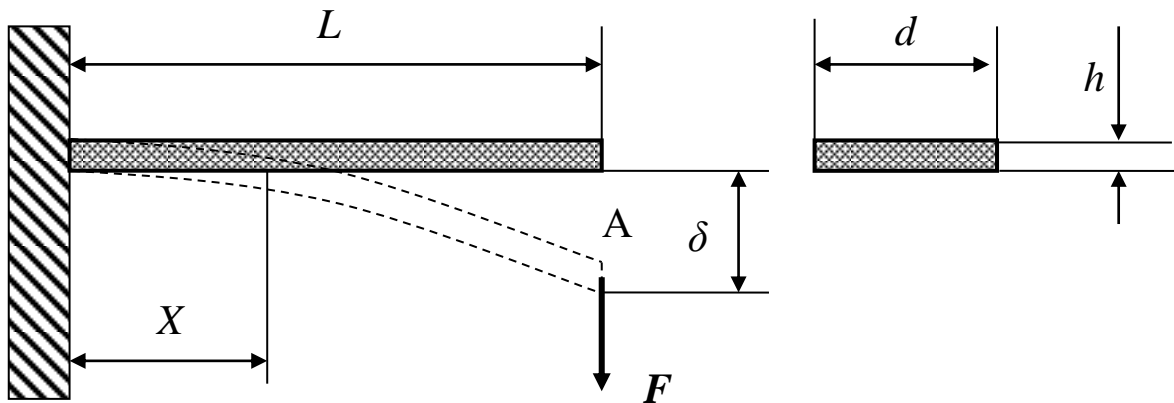


Рис. 7. Деформація консольної балки рівного перерізу.

В точці А відносна деформація $\varepsilon_A = 0$, а в довільній точці X визначається виразом

$$\varepsilon_X = \frac{6(L-X)}{Eh^2d} F, \quad (14)$$

де F – прикладене зусилля; E – модуль пружності.

Прогин точок консольної балки визначається виразом:

$$\delta_X = \frac{6X^2}{Eh^3d} \left(L - \frac{X}{3} \right) F. \quad (15)$$

Для точки А

$$\delta_A = \frac{4L^3}{Eh^3d} F. \quad (16)$$

Звідки

$$\varepsilon_X = \frac{3(L-X)\delta_A h}{L^3}. \quad (17)$$

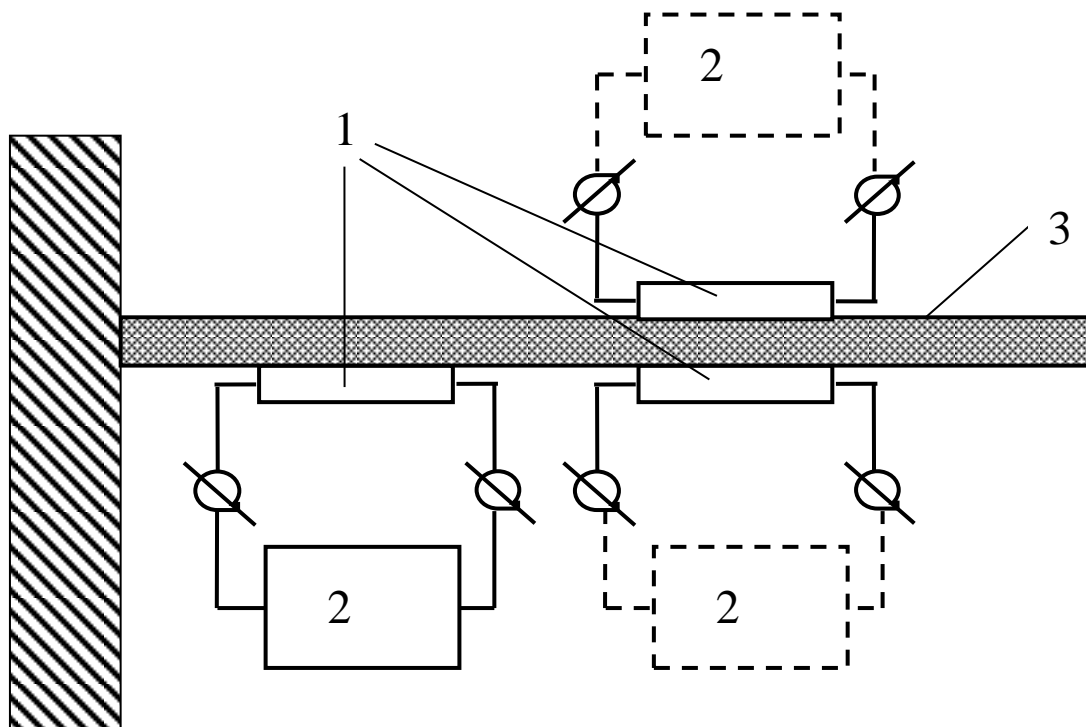
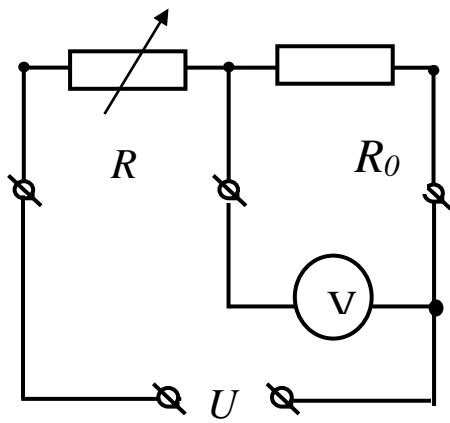


Рис. 8. Схема дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів: 1 – тензорезистори, 2 – цифровий вимірювач опору, 3 – балка рівного поперечного перерізу.

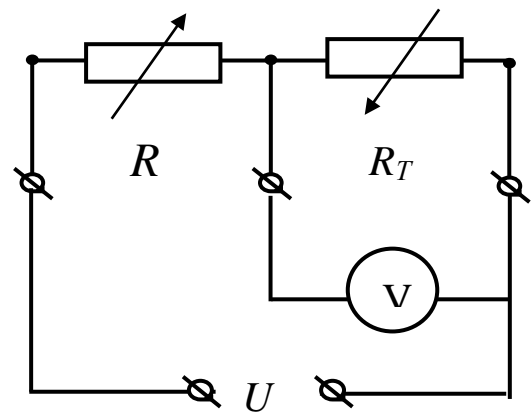
Тензорезистори наклеєні на обидві сторони консольної балки на відстані X_1 та X_2 . Їх виводи виведені на відповідні клеми лабораторного макету. Під дією прикладеного зусилля кінець балки (т. А рис. 7) може відхилитися від середнього положення на ± 40 мм.

Для дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів використовується високоточний цифровий вимірювач опору 2 (рис. 8), оскільки відносні зміни опорів тензорезисторів 1 на консольній балці 3 дуже малі.

В лабораторній роботі використовується схеми послідовного (рис. 9, а) та простого диференціального і мостового диференціального включення перетворювачів (рис. 9, б, в), в яких на один тензорезистор діє деформація розтягу, а на другий – деформація стиску. Оскільки важко підібрати два абсолютно однакових тензорезистори, то для зрівноваження моста при відсутності деформації один із резисторів R_0 може бути змінним.



а)



б)

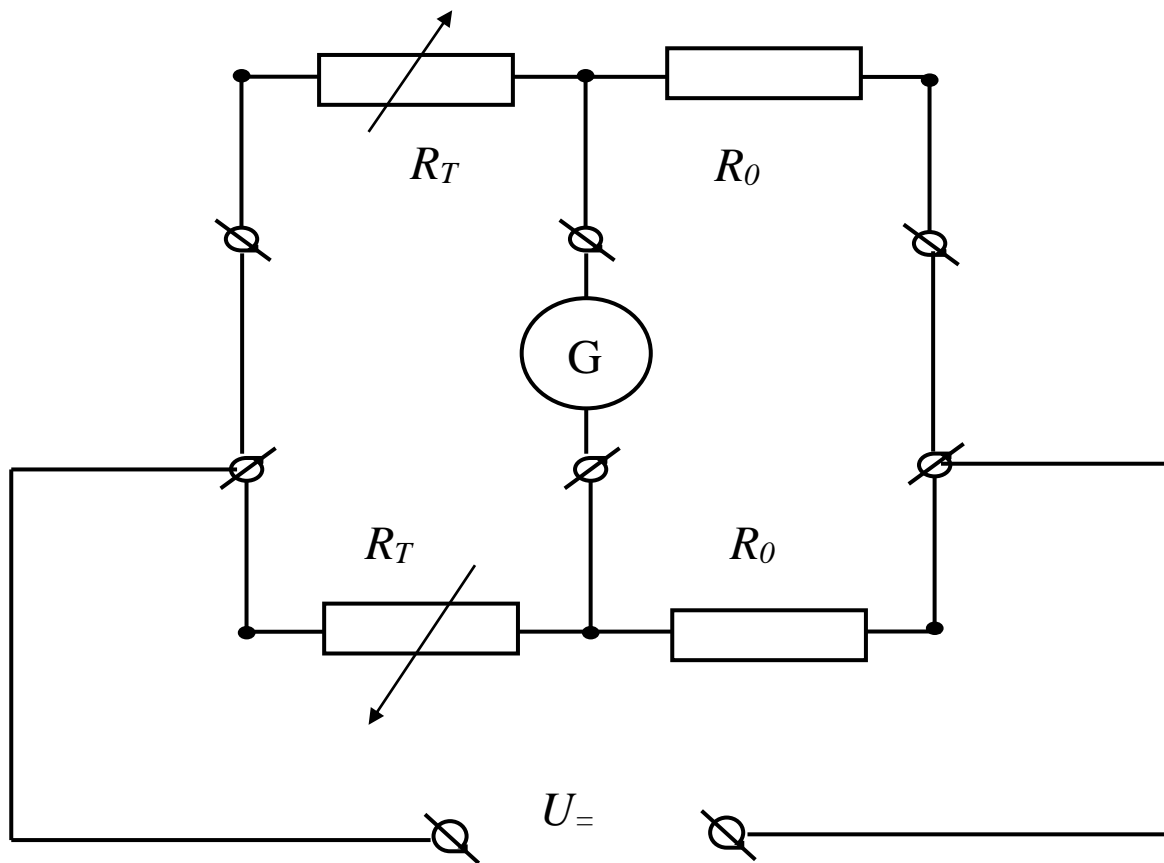


Рис. 9. Схеми включення тензорезисторів: а – послідовна, б – диференціальна, в – мостова диференціальна.

Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. *Визначення основних параметрів тензорезистора.*

1. Провести калібрування високоточного омметра. Виміряти активний опір на постійному струмі кількох тензорезисторів одного типу, знайти їх номінальний опір (середнє значення), визначити середнє абсолютне і відносне відхилення опорів від його номінального значення.

2. Зняти залежності опору тензорезисторів від прогину δ_A консольної балки, обчислити за формулою (17) деформацію кожного з досліджуваних тензорезисторів.

3. Побудувати графіки залежностей $R_T(\varepsilon)$ (деформаційні характеристики) і провести їх апроксимацію прямими лініями методом найменших квадратів. Визначити коефіцієнт чутливості K та межі зміни опорів тензорезисторів. Визначити середньоквадратичне відхилення залежності $R_T(\varepsilon)$ від прямої лінії, оцінити похибку.

Завдання 2. *Вивчення схем включення тензорезисторів.*

1. Дослідити схеми послідовного і диференціального включення тензорезистора (рис. 9, а, б). Зняти залежність $U_{ВИХ}(\varepsilon)$, порівняти одержані результати із теоретично розрахованими з використанням значень R_T , знайдених в п.2 завдання 1. Максимальну напругу живлення розрахувати враховуючи, що $P_{доп}=0,05\text{Вт}$.

2. Дослідити схему мостового диференціального включення тензорезистора (рис. 9, в). Зняти залежність $U_{ВИХ}(\varepsilon)$, порівняти одержані результати із теоретично розрахованими з використанням значень значень R_T , знайдених в п.1, п.2 завдання 1. Максимальна напруга живлення схеми не може перевищувати 2,5 В.

3. Порівняти чутливості схем послідовного, диференціального та мостового включення тензорезисторів. Зробити висновки.

Лабораторна робота № 2

Вивчення роботи та дослідження характеристик сенсорів переміщення

Мета роботи: визначити параметри і дослідити характеристики первинних перетворювачів переміщення.

Теоретичні відомості

1. Ємнісні сенсори переміщень

Принцип роботи ємнісних сенсорів базується на використанні залежності зміни електричної ємності конденсаторів при дії на них вимірювальної величини.

Ємність плоского конденсатора можна виразити формулою:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

де S – площа діючих частин обкладок конденсатора, ε – відносна діелектрична проникність, d – товщина діелектрика (або ширина проміжку між обкладками).

Ємність циліндричного конденсатора задається формулою:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 L}{\ln \frac{r}{r_0}}, \quad (2)$$

де L – довжина діючих частин обкладок конденсатора, ε – відносна діелектрична проникність, r та r_0 – радіуси відповідно зовнішнього та внутрішнього циліндрів, які утворюють конденсатор.

Ємність датчика може бути змінена шляхом зміни площі діючих частин обкладок, зміни відстані між обкладками або зміни діелектричної проникності.

Для вимірювання лінійного або кутового переміщення найбільш ефективні датчики, в яких ємність змінюється шляхом зміни $S = b \cdot x$ або L (див. рис. 1). В цьому випадку чутливість сенсора є сталою величиною і становить

– для плоского конденсатора

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 b}{d}; \quad (3)$$

– для циліндричного конденсатора

$$\frac{\Delta C}{\Delta L} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln \frac{r}{r_0}}, \quad (4)$$

тобто, при нехтуванні краєвими ефектами, їх передавальна характеристика є лінійною.

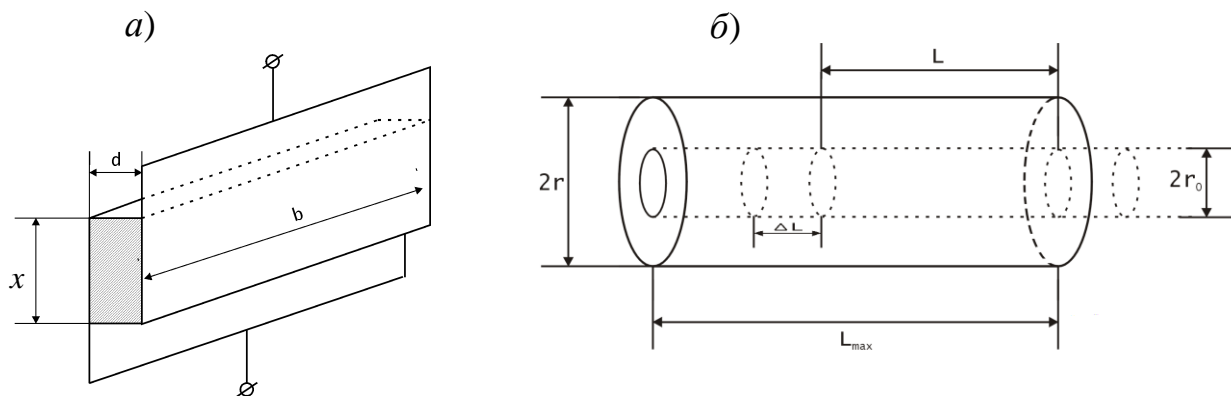


Рис. 1. Схеми ємнісних сенсорів переміщення зі змінною діючою площею електродів: *a* – плоский конденсатор, *б* – циліндричний конденсатор.

При зміні відстані d між обкладками плоского конденсатора чутливість ємнісного сенсора переміщень

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d^2}, \quad (5)$$

тобто залежить від відстані між пластинами, а, отже, передавальна характеристика нелінійна.

При використанні ємнісного сенсора в якості датчика рівня рідкого діелектрика можливі два варіанти розташування обкладок конденсатора. Якщо обкладки розташовані вертикально (рис. 2, *a*), сенсор являє собою два паралельно включених конденсатори C_1 та C_2 із загальною ємністю

– для плоского конденсатора

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 b x}{d} + \frac{\varepsilon_2\varepsilon_0 b(l-x)}{d} \quad (6)$$

– для циліндричного конденсатора

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 x}{\ln \frac{r}{r_0}} + \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 b(L-x)}{\ln \frac{r}{r_0}} \quad (7)$$

В другому випадку сенсор може бути виконаний так, що товщина діелектричного шару змінюється по висоті, паралельно до площини електродів. Такий датчик схожий на конденсатор з двошаровим діелектриком, ємність якого визначається формулами:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d_2}, \quad C_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S}{d_1}, \quad (8)$$

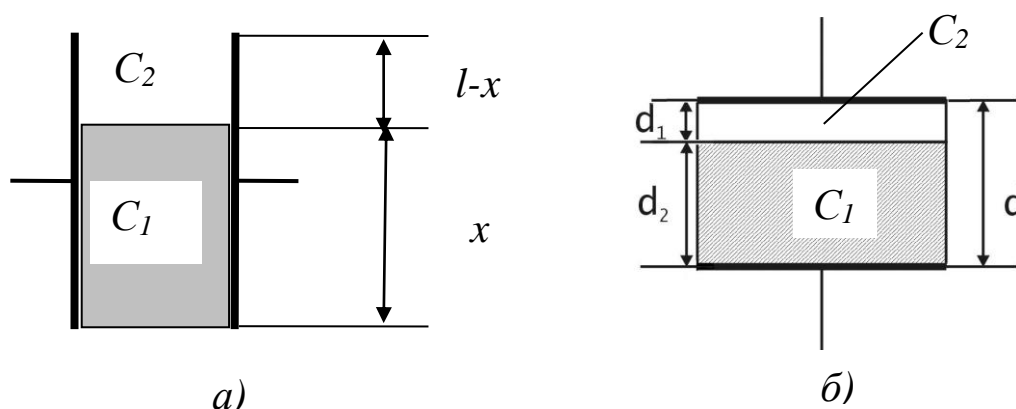


Рис. 2. Ємнісний сенсор рівня діелектричної рідини при вертикальному (а) та горизонтальному (б) розміщенні обкладок (пластин) конденсатора.

Ємнісні датчики прості по конструкції, однак в ряді випадків їх використання обмежене через їх незначну ємність та необхідність застосування для вимірювань високих частот.

2. Індуктивні сенсори переміщень

Принцип роботи індуктивних сенсорів переміщення ґрунтується на зміні індуктивності при переміщенні конструктивних елементів первинного перетворювача. На рис. 3, а приведений перетворювач з малим повітряним проміжком δ , який змінюється під впливом вимірюваної величини P , а на рис. 3, б – із розімкнутим магнітним колом, який представляє собою котушку 1, в якій рухається феритовий сердечник 2.

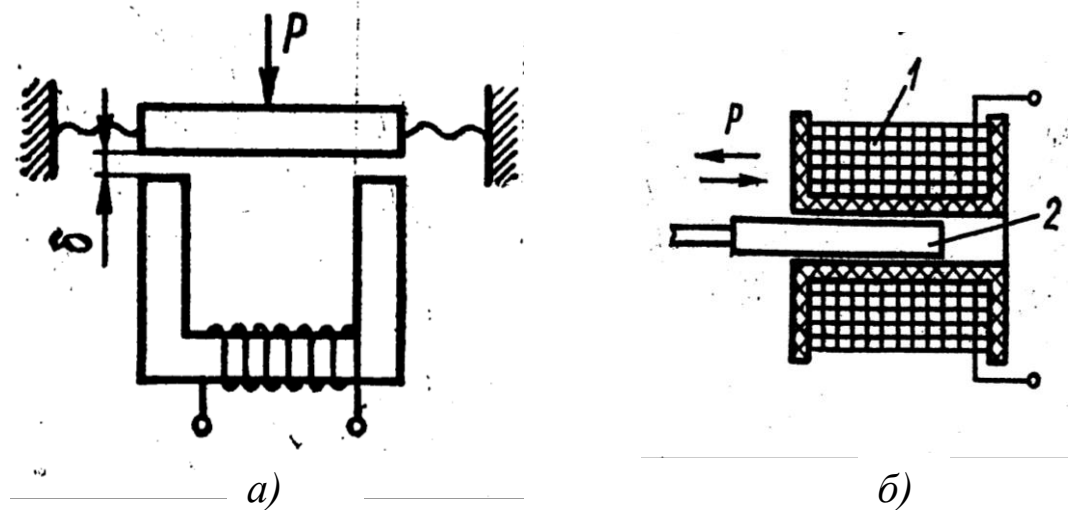


Рис. 3. Основні типи індуктивних сенсорів переміщення.

Робоче переміщення в перетворювачах із повітряним проміжком складає 0,01 – 10 мм, в той час як у перетворювачах із розімкнутим магнітним колом воно може досягати 10 – 100мм.

Індуктивність перетворювача з повітряним проміжком (рис. 3, а)

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{\frac{l}{\mu} + 2\delta}, \quad (9)$$

де l і S довжина та поперечний переріз магнітопроводу, на якому розташована котушка, що містить N витків. Як видно, в цьому випадку індуктивність L нелінійно залежить від ширини повітряного проміжку δ .

Індуктивність перетворювача із розімкнутим магнітним колом (рис. 3, б) можна обчислити як сумарну індуктивність двох послідовно з'єднаних котушок, в одній із яких знаходиться феромагнітний сердечник із магнітною проникністю μ :

$$L = L_1 + L_2,$$

$$L_1 = \frac{\mu\mu_0 N_1^2 S}{x}, \quad L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2 S}{l-x}$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \left(1 + \frac{x}{l} (\mu - 1) \right).$$

Чутливість такого перетворювача

$$\frac{\Delta L}{\Delta x} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \left(\frac{1}{l} (\mu - 1) \right) \quad (10)$$

є сталою величиною і, отже, статична передавальна характеристика – лінійна.

Приведені формули справедливі лише у випадку, коли діаметр котушки (соленоїда) набагато менший від її довжини, а сердечник повністю заповнює котушку, що необхідно для нехтування полями розсіювання. На практиці для реальних котушок вводяться безрозмірні коректуючі множники і ефективне значення магнітної проникності сердечника, які є функціями відношення діаметра до довжини сердечника. Перераховані фактори значно змінюють теоретичні значення індуктивності котушки в сторону її зменшення.

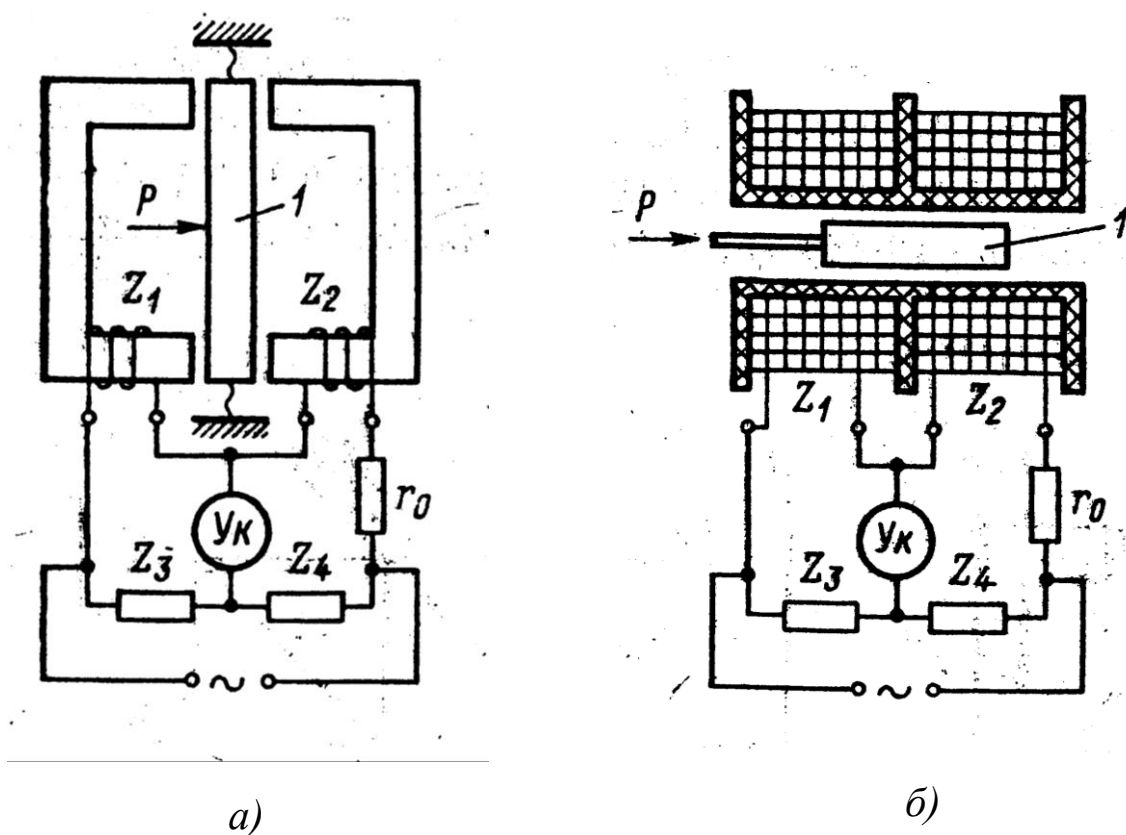


Рис. 4. Диференціальні індуктивні сенсори переміщень.

Суттєво зменшити похибки і збільшити лінійну ділянку передавальної характеристики індуктивних датчиків переміщення дозволяє застосування диференціальних перетворювачів. Тому на практиці індуктивні перетворювачі завжди виготовляються диференціальними. На рис 4. показана схематична конструкція індуктивних перетворювачів для вимірювання малих (а) та великих (б) переміщень. І в першому і в другому перетворювачах відбувається переміщення сердечника 1, причому при русі в напрямку стрілки комплексний опір Z_1 зменшується, а Z_2 – зростає.

3. Трансформаторні (взаємоіндуктивні) сенсори переміщень

В основі роботи трансформаторних первинних перетворювачів переміщень лежить зміна взаємної індуктивності обмоток сенсора під впливом механічних переміщень феромагнітного осердя.

Якщо на магнітне осердя (рис. 3, а) помістити дві обмотки з кількістю витків N_1 та N_2 , то ЕРС ε_2 на кінцях вторинної обмотки (N_2).

$$\varepsilon_2 = M \frac{dI_1}{dt},$$

де M – коефіцієнт взаємоіндукції, I_1 – струм у первинній обмотці. Величина M визначається кількістю витків у первинній і вторинній обмотках та магнітним опором осердя R_M

$$M = \frac{N_1 N_2}{R_M},$$

де

$$R_M = \frac{l}{\mu\mu_0} + \frac{2\delta}{\mu_0}.$$

Тут l та δ мають той же зміст, що і при розгляді індуктивного перетворювача.

Таким чином

$$\varepsilon_2 = \frac{\mu\mu_0 N_1 N_2}{l + 2\delta\mu} \times \frac{dI_1}{dt} \quad (11)$$

Отже зміна ширини повітряного проміжку в магнітопроводі трансформатора приводить до зміни магнітного опору R_M осердя, зміни взаємної індуктивності M між котушками і, в кінцевому рахунку, до зміни ЕРС (вихідної напруги) \mathcal{E}_2 . Як і у випадку індуктивних сенсорів такого типу, передавальна характеристика первинного перетворювача є нелінійною, а чутливість залежить від значення переміщення δ .

Конструкції перетворювачів переміщень

Досліджувані первинні перетворювачі переміщень змонтовані на окремих лабораторних макетах, на кожному з яких закріплений мікрометричний гвинт. Він служить для калібрування (градування) перетворювачів, оскільки придатний для відтворення переміщень із точністю 0,01 мм. Крок гвинта становить 0,5 мм. Із стержнем гвинта 1 зв'язаний барабан 2 зі шкалою, яка має 50 поділок, таким чином ціна поділки на барабані 0,01 мм. На поверхні циліндричного корпуса, в якому повертається гвинт, нанесено лінійну шкалу із ціною поділки 0,5 мм. Для зручності відліку штрихи півміліметрових поділок нанесено нижче осьової розмітки лінійної шкали.

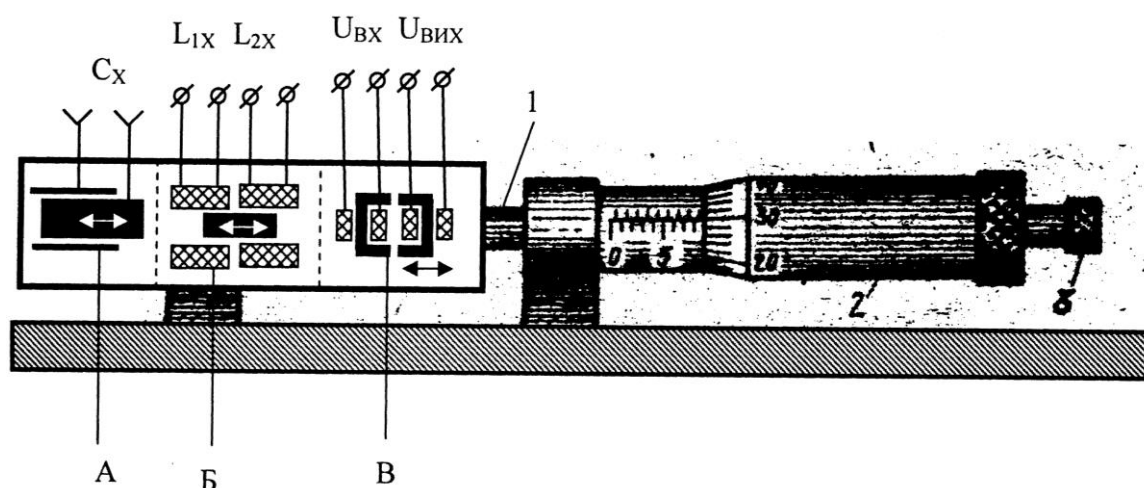


Рис. 5. Загальний вигляд лабораторних макетів із ємнісним (А), індуктивним (Б) та індукційним (В) перетворювачами і мікрометричним гвинтом для їх калібрування.

Ємнісний перетворювач переміщень (А) представляє собою циліндричний конденсатор із внутрішнім і зовнішнім діаметром циліндричних електродів відповідно 8 та 8,5 мм та довжиною порядку 15 мм. У проміжку між електродами розташована ізолююча плівка із фторопласту. Електроди циліндричного конденсатора під'єднані до високочастотного розйому.

Індуктивний перетворювач складається із двох, розташованих на відстані 15 мм, окремих але співосних котушок, які містять кожна 2000 витків на каркасі внутрішнім діаметром 10 мм і довжиною 10 мм. По осі котушок за допомогою мікрометричного гвинта можна переміщати феромагнітне осердя, змінюючи їх індуктивність. При цьому, якщо індуктивність однієї із котушок зростатиме, то іншої зменшуватиметься, що дозволяє використовувати перетворювач як диференціальний.

Індукційний перетворювач представляє собою дві однакові котушки, які розташовані на П подібних сердечниках. При переміщенні однієї із котушок змінюється коефіцієнт їх взаємодукції, а, отже, ЕРС, яка індукується у вторинній котушці, якщо первинна живиться змінним струмом постійної амплітуди. Слід зауважити, що передавальна характеристика такого індукційного перетворювача переміщень є суттєво нелінійною.

Основні технічні характеристики первинних перетворювачів переміщень залежать від їх принципу дії та конструктивних особливостей. Однак спільними для них є:

- *діапазон вимірюваних переміщень;*
- *межі зміни вихідного сигналу або вихідного параметра;*
- *чутливість* в робочій точці або в кількох точках робочого діапазону;
- *межі допустимих похибок;*
- *споживана потужність, умови експлуатації і т.п.*

Методика проведення експерименту

Опис схем вимірювання

Дослідження ємнісного сенсора переміщення проводиться за допомогою Q-метра, основою якого є послідовний контур, що

містить зразковий конденсатор змінної ємності C та зразкову котушку індуктивності L (рис. 6.)

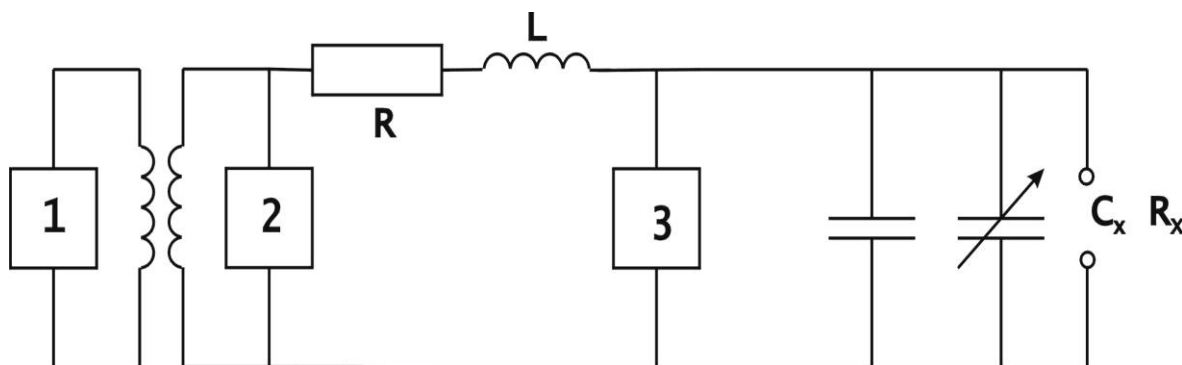


Рис. 6. Принципова схема Q-метра : 1 – генератор; 2 – вольтметр рівня; 3 – вольтметр (індикатор резонансу).

Досліджуваний сенсор, який в загальному випадку представляє собою двополюсник C_x , R_x , підключається до зразкового конденсатора за допомогою коаксіального кабелю паралельно до зразкового конденсатора C . Для роботи електронного вольтметра 3, який вимірює напругу на конденсаторі, необхідна резонансна напруга порядку одиниць вольт, відповідно від генератора 1 в контур з добротністю Q порядку 100 необхідно ввести напругу величиною близько 0,01В. Ця напруга вводиться в контур через трансформатор зв'язку і контролюється вольтметром рівня 2. Конструкція трансформатора виконана таким чином, щоб опір, який вноситься ним в контур, був нехтовно малим.

При підключенні невідомого конденсатора C_x паралельно до вимірного зразкового конденсатора C ємність, яка включена в контур, збільшиться. Отже, при незмінній частоті, для відновлення резонансу ємність зразкового вимірного конденсатора необхідно зменшити на величину

$$C_x = C_1 - C_2, \quad (12)$$

де C_1 і C_2 – ємності зразкового вимірного конденсатора при резонансі до і після підключення сенсора до Q – метра. Значення C_1 і C_2 відраховуються по лімбу приладу з точністю не менше 0,2 пФ. Необхідно відмітити, що загальна ємність контуру

складається крім C та C_x ще із паразитних ємностей монтажу та Власної ємності котушки індуктивності, які на позначені C_0 .

При проведенні досліджень слід врахувати, що сенсор підключається до Q-метра за допомогою коаксіального кабеля, який має власну ємність C_k та опір R . Цей фактор, а також наявність паразитних ємностей, зумовлених краєвими ефектами, необхідно врахувати у спрощеній еквівалентній схемі сенсора (рис. 7).

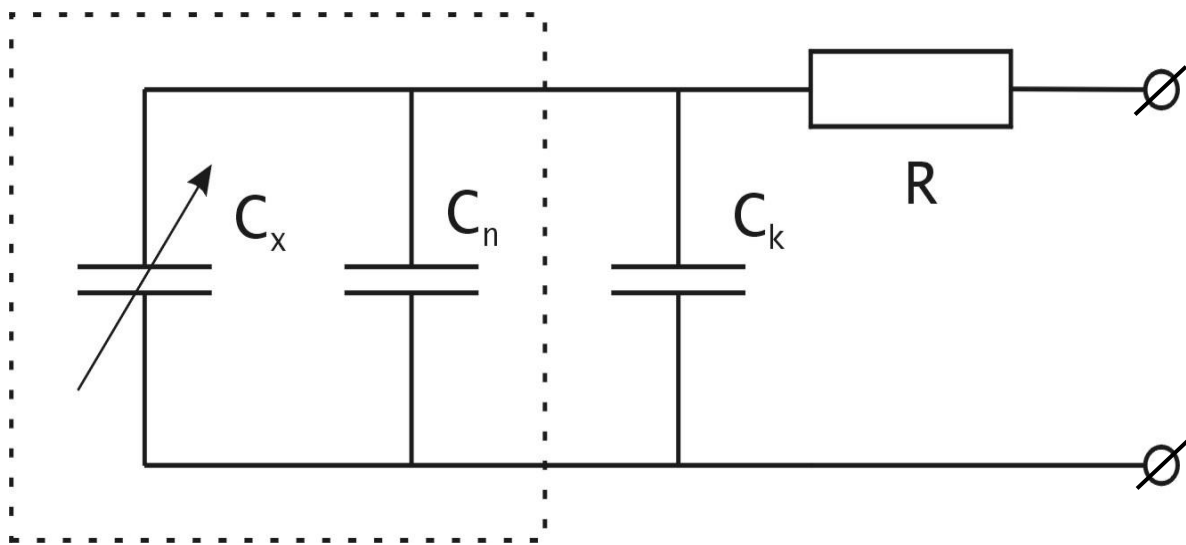


Рис. 7. Спрощена еквівалентна схема ємнісного сенсора.

Дослідження індуктивного сенсора переміщення проводиться за допомогою стандартних цифрових та аналогових вимірних приладів, зокрема мультиметра для вимірювання RLC, джерела змінного струму (понижувального трансформатора, або генератора), вольтметра змінного струму.

При дослідженні взаємоіндуктивного сенсора переміщень через понижувальний трансформатор на одну обмотку подається змінна напруга 0,5 – 2В, а ЕРС у іншій обмотці контролюється цифровим вольтметром змінного струму. Кількість витків у обмотках сенсора однакова, тобто при ідеальному контакті між частинами осердя (зменшенні повітряного проміжку до нуля) коефіцієнт трансформації рівнявся б 1.

Завдання і хід виконання роботи

Завдання 1. Дослідження характеристик ємнісного сенсора.

1. Включити Q-метр і після прогріву провести його калібровку, для чого:

– встановити перемикачем ”ЧАСТОТА” вибраний піддіапазон частоти, підключити до клем відповідну котушку індуктивності та підібрати ручкою ”ЧАСТОТА” вимірювальну частоту;

– встановити перемикач “Q – ΔQ” в положення “Q”, натиснути кнопку “КАЛИБРОВКА Q▼” стрілку вимірного приладу (індикатора рівня 2 по схемі рис. 6) виставити точно на позначку ▼, відпустити кнопку “КАЛИБРОВКА Q▼”

2. Налаштувати контур на резонанс, змінюючи ручкою “ЕМКОСТЬ pF” ємність зразкового конденсатора, або при вибраному початковому значенні C_1 , змінюючи ручкою ”ЧАСТОТА” частоту генератора. При резонансі покази вольтметра 3 будуть максимальними.

3. Під’єднати коаксіальний кабель (без сенсора) до зразкового вимірного конденсатора (до клем C_X), ручкою “ЕМКОСТЬ pF” налаштувати контур в резонанс і відмітити значення C_2 , визначити ємність кабелю $C_K = C_1 - C_2$.

4. Під’єднати сенсор до кабелю і при мінімальному перекритті електродів конденсатора відновити резонанс у контурі, відмітити нове значення C_3 ємності зразкового конденсатора. Визначити початкову (паразитну) ємність сенсора $C_{II} = C_2 - C_3$.

5. Змінюючи перекриття електродів за допомогою мікрометра і налаштовуючи контур в резонанс, зняти залежність зміни ємності сенсора від переміщення $\Delta C = C(x) - C_3$. Побудувати графік залежності ємності сенсора від переміщення, провести апроксимацію одержаних експериментальних даних прямою лінією, визначити чутливість S та діапазон зміни ємності сенсора.

Завдання 2. Дослідження резонансної характеристики контура із ємнісним сенсором.

1. При незмінному значенні частоти та ємності зразкового вимірного конденсатора зняти частину резонансної кривої контура, змінюючи перекриття електродів сенсора.

2. Побудувати залежність $U(x)$, вибрати на ній лінійну ділянку, визначити чутливість сенсора з використанням резонансного кола.

3. Пункти 1,2 цього завдання виконати на різних частотах (при різних добротностях контура), порівняти чутливості сенсора, зробити висновки.

Завдання 3. Дослідження характеристик індуктивного сенсора.

1. За допомогою мультиметра виміряти активний опір на постійному струмі R_{L1} та R_{L2} котушок L_1 та L_2 диференціального індуктивного сенсора.

2. Зняти залежності індуктивності $L_1(x)$ та $L_2(x)$ від переміщення феромагнітного сердечника (рис. 8, а).

3. Побудувати графіки залежностей $L_1(x)$ та $L_2(x)$ і провести їх апроксимацію прямими лініями, визначити чутливість до переміщення та межі зміни індуктивностей L_1 та L_2 .

4. Дослідити схему диференціального включення індуктивного сенсора (рис. 8, б). Зняти залежність $U_{ВИХ}(x)$, порівняти одержану результати із теоретично розрахованими з використанням значень R_{L1} , R_{L2} , $L_1(x)$ та $L_2(x)$ знайдених в п.1, п.2 цього завдання.

5. Дослідити схему мостового диференціального включення індуктивного сенсора (рис. 8, в). Зняти залежність $U_{ВИХ}(x)$, порівняти одержану результати із теоретично розрахованими з використанням значень R_{L1} , R_{L2} , $L_1(x)$ та $L_2(x)$ знайдених в п.1, п.2 цього завдання.

Завдання 4. Дослідження характеристик індукційного сенсора.

1. За допомогою лабораторного макету (рис. 9) дослідити характеристики взаємоддуктивного сенсора переміщень, зняти залежності $U_2(x)$ при різних значеннях напруги U_1 (або частоти).

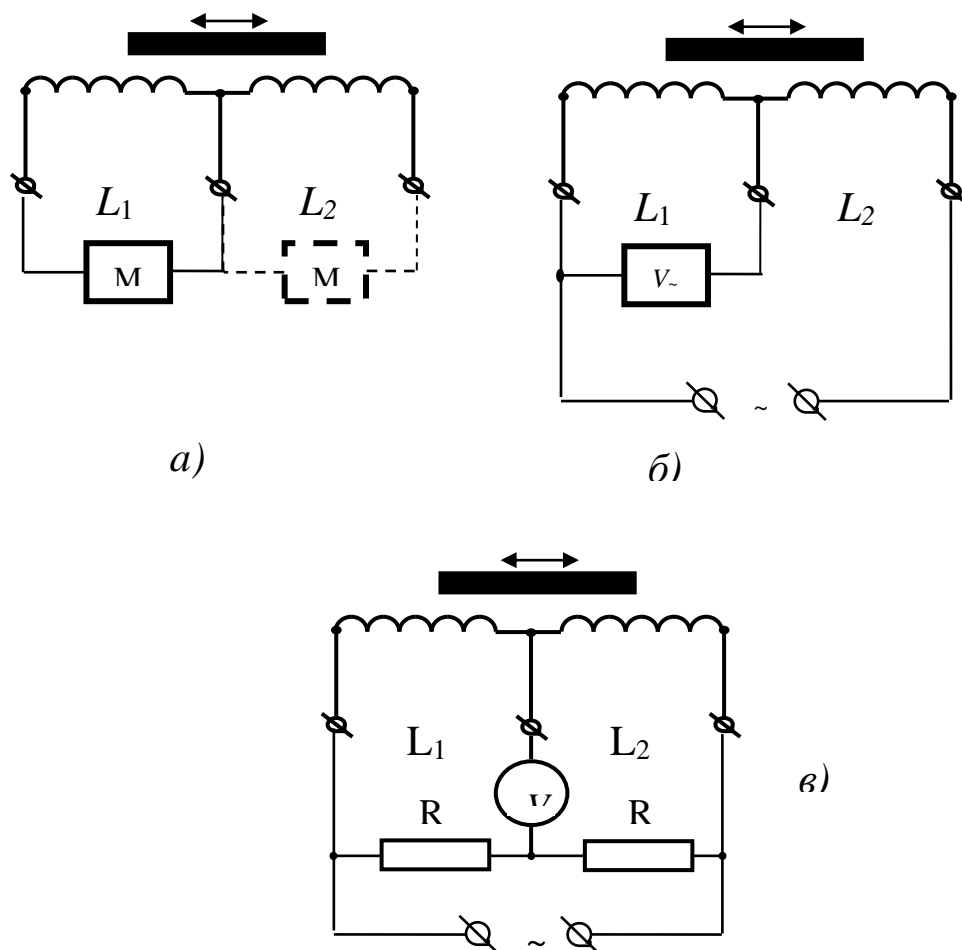


Рис. 8. Схеми дослідження індуктивного сенсора переміщень.

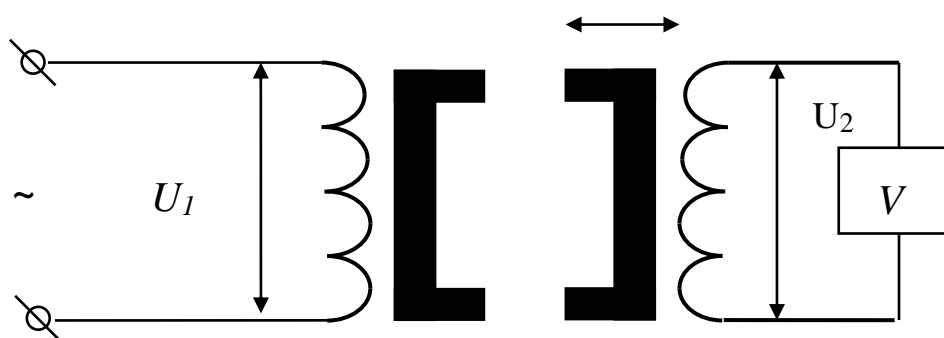


Рис. 9. Схема для дослідження взаємоддуктивного сенсора.

2. Побудувати графіки залежності вихідної напруги від переміщення $U_2=f(x)$, провести апроксимацію одержаних даних залежністю $U_2 = A/(B+Cx)$, визначити коефіцієнти A , B , C .

3. Визначити чутливість взаємоіндуктивного сенсора у кількох точках робочого діапазону, побудувати графік залежності $S=f(x)$, зробити висновки.

Лабораторна робота № 3

Вивчення методів вимірювання температури

Мета роботи: дослідити характеристики первинних перетворювачів температури (термоопору, термопари, р-п переходу), виміряти температуру розжареної спіралі безконтактним методом.

Теоретичні відомості

Температурою називається фізична величина, яка характеризує ступінь нагрітості тіла. Вона визначається середньою кінетичною енергією руху молекул в термодинамічній системі. Вимірювання температури можна проводити тільки непрямыми методами, які базуються на залежності від температури таких фізичних властивостей, які піддаються безпосередньому вимірюванню.

Методи вимірювання температури поділяються на контактні (наприклад, термометри опору, термоелектричні термометри,) і безконтактні (пірометри).

1. Терморезистори

При вимірюванні температури за допомогою **терморезисторів** використовується температурна залежність опору металів та напівпровідників від температури. Для металів в першому наближенні

$$R_M = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (1)$$

де R_M та R_0 – опір металевого провідника при температурах T і T_0 відповідно. Параметр α , який характеризує зміну електричного опору з температурою, називають температурним коефіцієнтом електричного опору (ТКО). Він чисельно рівний відносній зміні опору провідника при зміні його температури на 1К. Величина α для чистих металів становить $(0,0035 \div 0,0065 \text{ K}^{-1})$.

Для напівпровідникових терморезисторів

$$R_H = R_0 \exp(E_a/kT), \quad (2)$$

де R_H – опір напівпровідника при температурі T , а R_0 – при умові $T \rightarrow \infty$, E_a – енергія активації провідності напівпровідника, k – постійна Больцмана, рівна $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Чутливість напівпровідникових терморезисторів

$$S = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{E_a}{kT^2} \quad (3)$$

значно більша за металевих і може досягати значення $0,1 \text{ K}^{-1}$, однак вона не є сталою величиною, тобто статична характеристика напівпровідникового терморезистора нелінійна.

Якісно зміну опору металів і напівпровідників при зміні температури можна пояснити виходячи із класичної теорії електропровідності твердих тіл. В цій теорії нехтується взаємодією електронів між собою, а взаємодія електронів із позитивними іонами зводиться тільки до непружних зіткнень. Іншими словами, електрони провідності розглядаються як електронний газ, подібний ідеальному атомарному газу в молекулярній фізиці. Такий електронний газ підчиняється всім законам ідеального газу і, зокрема, закону рівномірного розподілу енергії за степенями вільності, згідно якого середня кінетична енергія теплового руху, яка припадає на кожну степінь вільності рівна $(1/2)kT$. Так як вільний електрон має три степені вільності, то середня енергія безладного теплового руху, яка припадає на один електрон рівна

$$(1/2)m\langle v_T^2 \rangle = (3/2) kT, \quad (4)$$

де $\langle v_T^2 \rangle$ – середнє значення квадрату швидкості теплового руху.

В електричному полі з напруженістю E на кожний електрон діє сила, рівна eE (e – заряд електрона), під дією якої електрон одержує прискорення eE/m (m – маса електрона). Вважається, що при кожному зіткненні електрон передає накопичену енергію іонам ґратки повністю, отже його швидкість після зіткнення рівна нулю. Тому під кінець вільного пробігу напрямлена швидкість руху електрона

$$u_{max} = \frac{eE}{m} \tau,$$

де $\tau = \langle l \rangle / \langle v_T \rangle$ – середній час вільного пробігу електрона (середній час між двома послідовними зіткненнями), $\langle l \rangle$ – середня довжина вільного пробігу.

Оскільки електрон між двома зіткненнями рухається рівноприскорено, то середнє значення швидкості впорядкованого руху рівна половині максимального значення

$$u = \frac{eE}{2m} \tau, \quad (5)$$

тобто швидкість дрейфу електрона пропорційна напруженості електричного поля

$$u = \mu E, \quad (6)$$

де $\mu = (e/2m)\tau$ – називається рухливістю носія струму і має фізичний зміст швидкості дрейфового руху в електричному полі з напруженістю рівною одиниці. Враховуючи, що густина струму $j = enu = \lambda E = (1/\rho)E$ очевидно, що питома електропровідність λ , яка є оберненою величиною до питомого опору ρ , визначається величиною заряду, концентрацією та рухливістю вільних носіїв струму. Для металів

$$\lambda = en\mu_n. \quad (7)$$

Для напівпровідників

$$\lambda = en\mu_n + ep\mu_p \quad (8)$$

де n і p – концентрація електронів і дірок відповідно, μ_n та μ_p – їх рухливості.

У випадку металів температурна залежність електропровідності визначається рухливістю μ_n електронів, а їх концентрація є постійною величиною. Рухливість в свою чергу, в основному, визначається розсіюванням електронів на фононах – теплових коливаннях атомів кристалічної ґратки, тобто величиною τ . Аналіз приведених вище формул показує, що з підвищенням температури величина $\tau = \langle l \rangle / \langle v_T \rangle \sim \langle l \rangle / T^{0,5}$ зменшується, а, отже, питомий опір ρ зростає.

Для вимірювання температур використовуються терморезистори з матеріалів, що володіють високостабільними ТКО, лінійною залежністю опору від температури, хорошою відтворюваністю властивостей і інертністю до дій навколишнього середовища. До таких матеріалів в першу чергу відноситься

платина. Завдяки своїй дешевизні широко поширені мідні терморезистори, застосовуються також вольфрамові і нікелеві.

Опір платинових терморезисторів в діапазоні температур від 0 до +650 °С виражається співвідношенням $R = R_0 (1 + A\Theta + B\Theta^2)$, де R_0 — опір при 0 °С; Θ — температура в °С. Для платинового проводу з відношенням $R_{100}/R_0 = 1,385$ значення $A = 3,90784 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B = 5,7841 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$. У інтервалі температур від 0 до -200 °С залежність опору платини від температури має вигляд $R = R_0 [1 + A\Theta + B\Theta^2 + C(\Theta - 100)]$, де $C = -4,482 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$. Промислові платинові термометри використовуються в діапазоні температур від -260 до +1100 °С.

При розрахунку опору мідних провідників в діапазоні температур від -50 до +180 °С можна користуватися формулою $R = R_0(1 + A\Theta)$, де $A = 4,26 \cdot 10^{-2}$; R_0 — опір при 0 °С. Мідний терморезистор можна застосовувати тільки до температури 200 °С у атмосфері, вільній від вологості і газів, які викликають корозію. При вищих температурах мідь окислюється. Нижня межа температури для мідних термометрів опору рівна -200 °С, хоча при проведенні індивідуального градування їх можливо застосування аж до -260 °С.

Похибки, які виникають при вимірюванні температури термометрами опору, викликані нестабільністю в часі початкового опору термометра і його ТКО, зміною опору лінії, що сполучає термометр з вимірювальним приладом, перегрівом термометра вимірювальним струмом. Зокрема, для визначення допустимого вимірювального струму через термометр в діапазоні вимірюваних температур до 750 °С можна користуватись співвідношенням $I = 2d^{1,5} \Delta\Theta^{0,5}$, де I — струм, А; d — діаметр проводу термометра, мм; $\Delta\Theta$ — допустимий приріст показів термометра за рахунок його нагрівання струмом. У діапазоні температур від -50 до +100 °С перегрів проводу, що знаходиться в спокійному повітрі, діаметром $d = 0,05 - 0,1$ мм визначається за наближеною формулою $\Delta\Theta = 5I^2/d^2$.

Суттєво інша картина у напівпровідникових терморезисторах, де температурну залежність провідності в основному обумовлює концентрація носіїв заряду — електронів n і дірок p . Остання ж визначається числом електронів, які мають енергію достатню для розриву хімічного зв'язку у кристалічній

гратці. В найбільш простому випадку це число можна обчислити із розподілу частинок за енергією – розподілу Больцмана

$$n = n_0 \exp(-E_a/kT). \quad (9)$$

Як видно з формули (9), з підвищенням температури концентрація носіїв, отже і електропровідність різко зростатиме, а питомий опір, відповідно, зменшуватиметься.

Напівпровідникові терморезистори відрізняються від металевих меншими габаритами і більшим значенням температурного коефіцієнту опору. Як видно з формули (3), ТКО напівпровідникових терморезисторів негативний і зменшується обернено пропорційно до квадрата абсолютної температури.

Якщо для напівпровідникового терморезистора невідомі коефіцієнти R_0 і E_a , але відомі опори R_1 і R_2 при T_1 і T_2 , то опір для будь-якої іншої температури і енергію активації провідності E_a можна визначити із співвідношень:

$$R_T = R_1 \exp\left[-\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)\right], \quad E_a = \frac{kT_2T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}.$$

Недоліками напівпровідникових терморезисторів, що істотно знижують їх експлуатаційні якості, є нелінійність залежності опору від температури і значний розкид від зразка до зразка як номінального опору, так і ТКО.

Мінімальною потужністю розсіяння P_{\min} називається потужність, при якій у терморезистора, що знаходиться в спокійному повітрі при температурі $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, опір зменшується від розігрівання струмом не більше ніж на 1%. Максимальною називається потужність P_{\max} , при якій терморезистор, що знаходиться в тих же умовах, розігрівається струмом до верхньої допустимої температури. Окрім цього, вказується допустима потужність $P_{\text{доп}}$ при максимально допустимій температурі. За стандартами для більшості терморезисторів допускаються відхилення від номінальних значень початкових опорів в межах $\pm 20\%$, при тривалій витримці за максимальної допустимої температури допускається зміна опору в межах $\pm 3\%$. При зберіганні протягом 18 місяців зміна опору не повинна перевищувати $\pm (1 - 3)\%$, при зберіганні до 10 років зміна опору

може досягати $\pm 30\%$. Проте, досвід роботи показує, що стабільність характеристик напівпровідникових терморезисторів виявляється в більшості випадків значно вище вказаного в стандартах.

2. Термопари

В замкнутому колі, що складається з декількох різних металів або напівпровідників, при однаковій температурі електричного струму немає. Якщо ж температури в місцях контактів різні, то в колі виникає електричний струм (явище Зейєбека). Його називають термоелектричним. Електрорушійна сила, що зумовлює цей струм, називається термоЕРС. Система, що складається з двох різних металів, з металу і напівпровідника або двох напівпровідників різного типу провідності (або з різною концентрацією носіїв заряду), називається **термопарою**. Для вимірювання різниці температур використовують так звану диференціальну термопару. Її спаї поміщують у ті середовища (тіла), різницю температур яких вимірюють (рис. 1, а). Термоелектрорушійну силу такої термопари можна представити у виді степеневого ряду

$$E = a_0 + a_1(\Theta - \Theta_0) + a_2(\Theta - \Theta_0)^2 + \dots \approx a(\Theta - \Theta_0), \quad (10)$$

де $\Theta - \Theta_0 = \Delta T$ – різниця температур між спаями термопари, a – стала термопари.

При електричному контакті двох різних провідників унаслідок різної концентрації електронів в них (наприклад, $n_2 > n_1$) виникне дифузійний потік електронів з металу 2 в метал 1

$$j_{\text{диф}} = D \frac{dn}{dx} \quad (11)$$

При цьому метал 1 заряджатиметься від'ємно, а в металі 2 буде нестача електронів, отже він набуде додатнього заряду. Внаслідок цього між металами виникне електричне поле, яке викличе появу дрейфового напрямленого руху електронів із металу 1 в метал 2 з густиною потоку

$$j_{\text{дрейф}} = en\mu = en\mu E. \quad (12)$$

В стаціонарному стані потоки, задані формулами (11) та (12) зрівноважують один одного, отже, з урахуванням відомого співвідношення Ейнштейна $D/\mu = kT$

$$\frac{kt}{e} \frac{dn}{n} = Edx. \quad (13)$$

Інтегрування виразу (13) приводить до висновку, що між двома провідниками виникає внутрішня контактна різниця потенціалів $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (14)$$

Спаї диференціальної термопари можна розглядати як послідовно з'єднані джерела ЕРС, загальна різниця потенціалів яких $U = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$. Оскільки у металах концентрація носіїв заряду слабо залежить від температури

$$U = \frac{k(T - T_0)}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \frac{k(\theta - \theta_0)}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (15)$$

Прирівнюючи вирази (10) та (15) видно, що

$$a = \frac{k}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (16)$$

Термоелектричний контур можна розімкнути в будь-якому місці і включити в нього один або декілька різнорідних провідників. Якщо всі місця з'єднань, що з'явилися при цьому, знаходяться при однаковій температурі, то не виникає ніяких паразитних термо-ЕРС.

Можна розімкнути контур в місці контакту термоелектродів А і В та вставити додатковий провідник С між ними (рис. 1, б). Значення термо-ЕРС в цьому випадку визначиться як $U = U_{AB}(\theta_1) + U_{BC}(\theta_0) + U_{CA}(\theta_0) = U_{AB}(\theta_1) + U_{BA}(\theta_0) = U_{AB}(\theta_1) - U_{AB}(\theta_0)$, оскільки якщо будь-яких два провідника А і В мають по відношенню до третього С термо-ЕРС U_{AC} і U_{BC} , то термо-ЕРС термопари АВ рівна $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$.

Можна розірвати також один з термоелектродів і включити додатковий провідник в місце розриву (рис. 1, в). Значення термо-ЕРС в цьому випадку буде таким же, як і в попередньому. Дійсно, $U = U_{AB}(\theta_1) + U_{BC}(\theta_2) + U_{CB}(\theta_2) + U_{BA}(\theta_0) = U_{AB}(\theta_1) - U_{BA}(\theta_0)$.

Таким чином, прилад для вимірювання термо-ЕРС може бути включений як між вільними кінцями термопари, так і в розрив одного з термоелектродів.

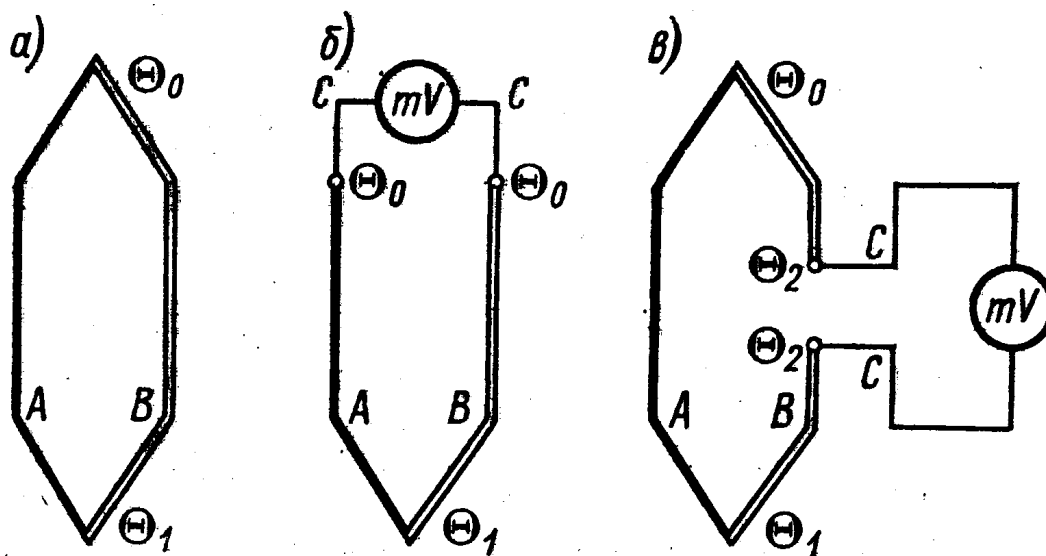


Рис. 1. Диференціальна термопара: А, В, С – різнорудні метали, спаї яких знаходяться при температурах Θ_0 , Θ_1 і Θ_2 .

Для вивчення термоелектричних характеристик багаточисельних термоелектродних матеріалів доцільно обрати один і порівнювати з ним всі інші матеріали. Як нормальні термоелектроди сьогодні застосовують термоелектроди з чистої платини. Під час випробувань вимірюють термо-ЕРС термопари, складеної з платиногого і випробовуваного термоелектродних матеріалів. Нижче подані значення термо-ЕРС з деяких термоелектродних матеріалів у парі з платиною при температурі робочих кінців $100\text{ }^\circ\text{C}$ і вільних кінців $0\text{ }^\circ\text{C}$:

Термо-ЕРС, мВ/100 $^\circ\text{C}$	Термо-ЕРС, мВ/100 $^\circ\text{C}$
Хромель	+2,96
Залізо	+1,8
Молибден	+1,2
Вольфрам	+0,8
Мідь	+0,76
Манганін	+0,76
Платинородій (10%Rh і 90%Pt)	+0,64
Платина	0,00
Алюмель	-1,2
Константан	-3,4
Копель	-4,0

Знак "плюс" у значенні термо-ЕРС мають ті термоелектродні матеріали, які у парі з платиною є додатними термоелектродами, а "мінус" характеризує від'ємні відносно платини термоелектроди. У найменуванні термопари завжди прийнято ставити на перше місце назву додатного термоелектрода, а на друге – від'ємного.

Наведені дані дозволяють визначити термо-ЕРС термопари, складеної з будь-якої пари вказаних термоелектродів. Термо-ЕРС такої термопари дорівнюватиме алгебраїчній різниці значень термо-ЕРС, що відповідають термоелектродам. Наприклад, термо-ЕРС хромель-алюмелевої термопари дорівнює $2,96 - (-1,2) = 4,10$ мВ, при цьому додатним термоелектродом є хромель.

З наведених даних видно також, що такі різні за хімічним складом матеріали, як мідь і манганін, розвивають у парі з платиною однакову термо-ЕРС $0,76$ мВ. Отже, термо-ЕРС термопари, складеної з міді і манганіна, дорівнюватиме нулю. Ця властивість манганіна і міді перешкоджає виникненню паразитних (що заважають вимірюванню) термо-ЕРС у електровимірвальних приладах, магазинах опорів, мостах, потенціометрах та інших системах, де застосовуються ці матеріали.

Залежність термо-ЕРС від температури в широкому діапазоні температур звичайно нелінійна, тому приведені вище дані не можна розповсюдити на вищі температури. Як приклад, на рис. 2 приведена залежність термо-ЕРС від температури для однієї з найбільш поширених термопар платинородій – платина.

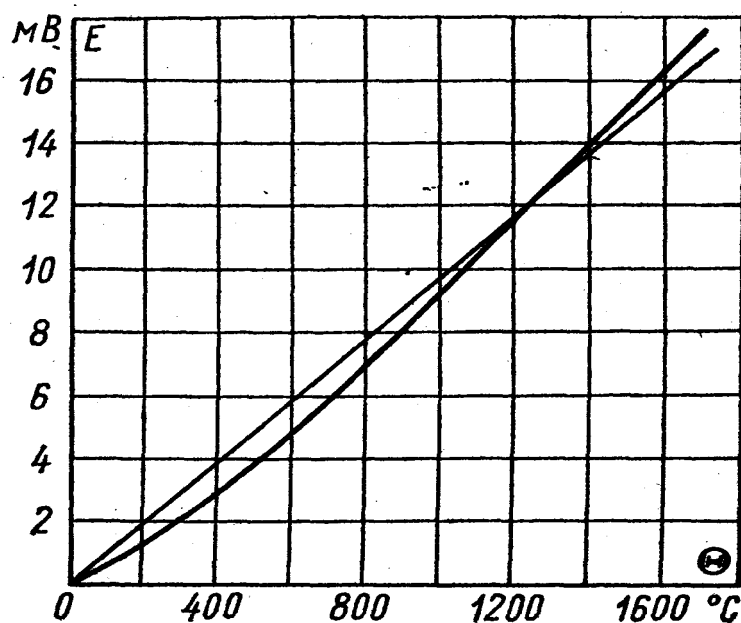


Рис. 2. Нелінійність передавальної характеристики термопари платина – платинородій.

При конструюванні термопар, природно, прагнуть поєднувати термоелектроди, один з яких розвиває з платиною додатну, а інший – від’ємну термо-ЕРС. При цьому необхідно враховувати також придатність того або іншого термоелектроду для застосування в заданих умовах вимірювання (вплив на термоелектрод середовища, температури і т. д.).

Матеріали для термопар характеризуються термоелектричною добротністю:

$$M = \frac{\alpha^2 \lambda}{\chi},$$

де α – відносний коефіцієнт термо-ЕРС матеріалу; λ – питома електропровідність; χ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Для виготовлення термопар перевагу надають матеріалам з великою добротністю, яка значною мірою визначається значенням α . Чим вищий коефіцієнт, тим більша термо-ЕРС матеріалу, розвинута у парі з еталонним матеріалом, що дає можливість підвищити чутливість термопар на основі цих матеріалів.

Термоелектричні матеріали повинні характеризуватись якомога вищою питомою потужністю, яка визначається добутком $\alpha^2 \lambda$. Властивості деяких металевих термоелектричних сплавів наведено у таблиці.

Таблиця. Властивості металевих термоелектричних матеріалів

Параметр	Константан	Копель	Хромель	Алюмель
Температура плавлення, °С	1260	1255	1435	1430-1485
Густина, кг/м ³	$8,9 \cdot 10^3$	$8,9 \cdot 10^3$	$8,7 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$
Теплопровідність, мВт/м·К	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$14,8 \cdot 10^{-6}$	$12,8 \cdot 10^{-6}$	$13,7 \cdot 10^{-6}$
ТКО при Т від 273 до 373 К, К ⁻¹	$0,02 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	(0,4-2,7)·10 ⁻³

3. Напівпровідникові діоди – як сенсори температури

В сучасній електронній техніці для вимірювання температури використовують властивості *p-n-переходу*, вольт-амперна характеристика якого описується рівнянням

$$I = I_0[\exp(Ue/kT) - 1]. \quad (17)$$

При зворотному включенні *p-n-переходу* струм через нього становить I_0 і практично не залежить від прикладеної до нього напруги та, в основному, визначається концентрацією неосновних носіїв заряду. Тому

$$I_0 = I_{00}[\exp(-\Delta E/kT)], \quad (18)$$

де ΔE – ширина забороненої зони напівпровідника.

Враховуючи, що при температурі $T = 300\text{K}$ значення $kT/e=26\text{ мВ}$ при напругах на переході $U > 26\text{ мВ}$, можна користуватися наближеними формулами для прямого і зворотного струмів:

$$I = I_{00}[\exp(-\Delta E/kT)] \cdot [\exp(Ue/kT)]. \quad (19)$$

Як видно з приведених формул, і прямий і зворотний струми *p-n-перехода* є функціями температури, проте для вимірювання температури частіше використовуються відкриті *p-n-переходи*. Падіння напруги на відкритому *p-n-переході* при струмі I через перехід визначається наближеною формулою

$$U = \frac{kT \cdot \ln(I / I_{00}) + \Delta E}{e}, \quad (20)$$

з якої видно, що падіння напруги лінійно залежить від температури і зменшується із збільшенням температури ($I_{00} > I$). Температурна чутливість *p-n-переходу* по напрузі $1,5\text{ мВ/К}$. Порівнюючи між собою коефіцієнти температурної чутливості для падіння напруги на *p-n* переході і термо-ЕРС термопар, що працюють в цьому ж температурному діапазоні (наприклад, хромель – копель), можна сказати, що чутливість *p-n-переходу* приблизно в 100 разів вища за чутливість термопар.

На практиці завжди відомий зворотний струм при певній (зазвичай кімнатній) температурі T_0 і необхідно визначити його значення при іншій температурі T . Із формули (6) легко одержати

$$\frac{I_0(T)}{I_0(T_0)} = \exp\left[-\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k} \frac{\Delta T}{T_0 T}\right), \quad (21)$$

де $\Delta T = T - T_0$.

Враховуючи, що в робочому діапазоні абсолютна температура змінюється не дуже сильно (тобто $T_0 \cdot T \approx T_0^2$), одержимо наближене співвідношення

$$I_0(T) = I_0(T_0) \exp(B\Delta T), \quad (22)$$

де для кремнію $B_{Si} = 0,13 \text{ K}^{-1}$, для германію; $B_{Ge} = 0,09 \text{ K}^{-1}$.

Цими значеннями коефіцієнтів B можна користуватися до температур $120 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ для кремнію і $70 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ для германію. Взагалі ж верхня границя температурного діапазону використання термодіодів і термотранзисторів обмежується тепловим пробоем $p-n$ -переходу і для окремих типів германієвих датчиків досягає $200 \text{ }^\circ\text{C}$, а для кремнієвих навіть $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Нижня границя температурного діапазону визначається зменшенням концентрації основних носіїв заряду і може досягати для германієвих датчиків мінус $260 \text{ }^\circ\text{C}$, для кремнієвих мінус $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Пірометри

Пристрої, які вимірюють температуру тіла або середовища за його тепловим випромінюванням, називаються **пірометрами**. Вони використовуються для вимірювання температури до $6000 \text{ }^\circ\text{C}$. Безконтактні методи вимірювання теоретично не мають верхньої межі вимірювання і можливості їхнього використання визначаються відповідністю спектрів випромінювання тіл або середовищ та спектральних характеристик пірометрів.

Тіло, що поглинає все падаюче на нього випромінювання, називається *абсолютно чорним*. *Сірим*, називають тіло, коефіцієнт поглинання якого не рівний одиниці, але не залежить від довжини хвилі і температури.

Основні закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла описуються такими законами:

1. Формула Планка встановлює співвідношення між абсолютною температурою і випромінювальною здатністю абсолютно чорного тіла.

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{2hc}{\lambda} \cdot \frac{1}{\lambda^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (23)$$

де $\varepsilon_{\lambda T}$ – спектральна густина випромінювання на довжині хвилі λ при абсолютній температурі T , h – стала Планка, c – швидкість

світла, k - стала Больцмана. Для малих значень $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3}$ м·К (діапазон видимого світла, температури до 1000°C), формула Планка (23) може бути замінена формулою Віна

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{2hc}{\lambda} \frac{1}{\lambda^4} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right). \quad (24)$$

Для великих значень $\lambda T \geq 2 \cdot 10^{-1}$ м·К, формула Планка може бути замінена формулою Релея-Джинса (середня інфрачервона область, температура більша за 2000°C)

$$\varepsilon_{\lambda T} = 2kT\lambda^{-4}. \quad (25)$$

2. Інтегральна (повна) випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла описується законом Стефана-Больцмана

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda T} d\lambda = \sigma T^4, \quad (26)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ стала Стефана-Больцмана.

3. Закон зміщення Віна пов'язує довжину хвилі λ_M , на якій спостерігається максимум спектральної густини випромінювання, із абсолютною температурою T тіла і зазвичай формулюється таким чином: із збільшенням температури максимум випромінювання зміщується в сторону більш коротких хвиль

$$\lambda_M T = b = \text{const}, \quad (27)$$

де $b = 0,0028978$ м·К – стала Віна.

У вимірювальній техніці використовують такі типи пірометрів:

1. *Квазімонохроматичні*, принцип дії яких заснований на вимірюванні залежності випромінювальної здатності $\varepsilon_{\lambda T}$ від температури тіла T на певній фіксованій довжині хвилі.

2. *Спектрального відношення*, принцип дії яких заснований на вимірюванні залежності від температури відношення випромінювальних здатностей на двох (і більше) фіксованих довжинах хвиль.

3. *Повного випромінювання*, принцип дії яких заснований на вимірюванні залежності від температури інтегральної випромінювальної здатності, що описується для абсолютно чорного тіла законом Стефана-Больцмана.

На практиці важко виконати приймач випромінювання, який поглинав би випромінювання всіх довжин хвиль від 0 до ∞ . У зв'язку з цим часто використовують пірометри з приймачами, які сприймають випромінювання в інтервалі довжин хвиль від λ_1 до λ_2 . Пірометр, принцип дії якого заснований на вимірюванні залежності від температури випромінювальної здатності в обмеженому інтервалі довжин хвиль, називають *пірометрами часткового випромінювання*.

Конструкції чутливих елементів термодатчиків

Металеві *терморезистори* зазвичай виготовляють у виді біфілярно намотаних секціонованих котушок з проводу діаметром не більше 0,1 мм. Мініатюрні високоомні платинові терморезистори виготовляють шляхом впалювання або нанесення іншим шляхом платинової плівки на керамічну основу завтовшки 0,5–2 мм. При ширині плівки 0,1–0,2 мм і довжині 5–10 мм опір терморезистора лежить в межах 200 – 500 Ом. Такого роду термочутливі елементи при нанесенні плівки з обох боків використовуються для вимірювання температурного градієнта і мають поріг чутливості $(1 - 5) \cdot 10^{-5}$ К/м. На рис. 3 показана конструкція промислового платинового термоопору, призначеного для вимірювання температури газоподібних і рідких неагресивних і агресивних середовищ в діапазоні від -50 до $+ 250$ °С. Чутливий елемент 1 платинового термометра представляє собою керамічний каркас, в канали якого поміщена спіраль із платинового проводу. Кінці спіралі приварені до виводів, через які чутливий елемент з'єднаний із трьохжильним кабелем. Канали каркаса засипані керамічним порошком, а торці герметизовані емаллю. Захисна арматура 2 термодатчика представляє собою зварену конструкцію із сталюї труби і штуцера 3. Місце з'єднання чутливого елемента з кабелем закривається ковпаком 4 із прес-матеріалу, який закріплюється гвинтами на верхній частині штуцера, і заливається компаундом.

Конструктивно напівпровідникові терморезистори можуть бути виготовлені найрізноманітнішої форми. На рис. 4 показана конструкція декількох типів терморезисторів. Терморезистори

типу ММТ-1 і КМТ-1 представляють собою напівпровідниковий стрижень, покритий емалевою фарбою, з контактними ковпачками і виводами. Цей тип терморезисторів може бути використаний лише в сухих приміщеннях.

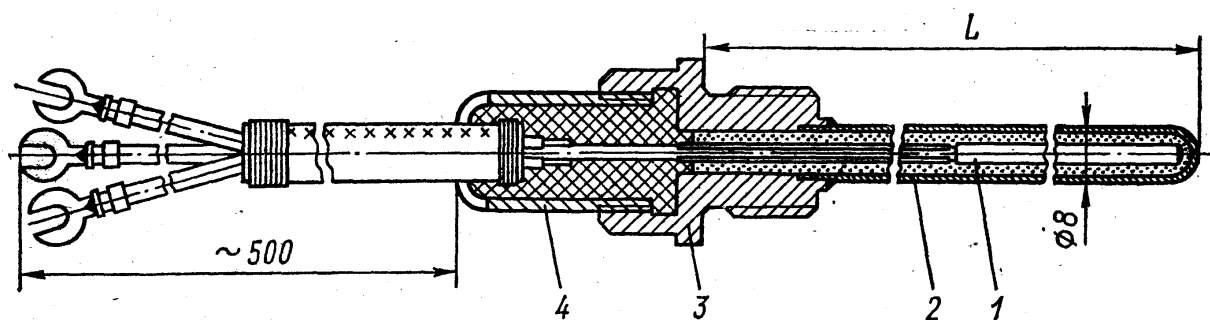


Рис. 3. Конструкція промислового платиного терморезистора.

Терморезистори типів ММТ і КМТ поміщені в металеві капсули і герметизовані, завдяки чому вони можуть бути використані при будь-якій вологості і навіть в рідинах, що не є агресивними щодо корпусу терморезистора.

Терморезистори типу СТ1 і СТ3 мають каплевидну форму. Для герметизації чутливий елемент в них оплавлений склом і забезпечений виводами з проводу, що має низьку теплопровідність. У терморезисторі СТ3-25 чутливий елемент також поміщений в скляну оболонку, діаметр якої доведений до 0,5—0,3 мм. Терморезистор за допомогою виводів прикріплений до траверсів.

Терморезистор СТ4-16, в якому для герметизації термочутливий елемент у вигляді намистинки оплавлений склом, володіє підвищеною стабільністю і відносно малим розкидом номінального опору (менш $\pm 5\%$). Терморезистор СТ17-1 призначений для роботи в діапазоні низьких температур (від -258 до $+60$ °С). При температурі кипіння рідкого азоту (-196 °С) його ТКО складає від $-0,06$ до $-0,12$ K^{-1} , при температурі $-252,6$ °С ТКО зростає і досягає значення від $-0,15$ до $-0,30$ K^{-1} , постійна часу при зануренні в рідкий азот не перевищує 3 с. Терморезистор СТ18-1 розрахований на роботу в температурному діапазоні від $+200$ до $+600$ °С, його ТКО при

+250 °C складає $-0,034 \text{ K}^{-1}$, при 600°C рівний $-0,011 \text{ K}^{-1}$.

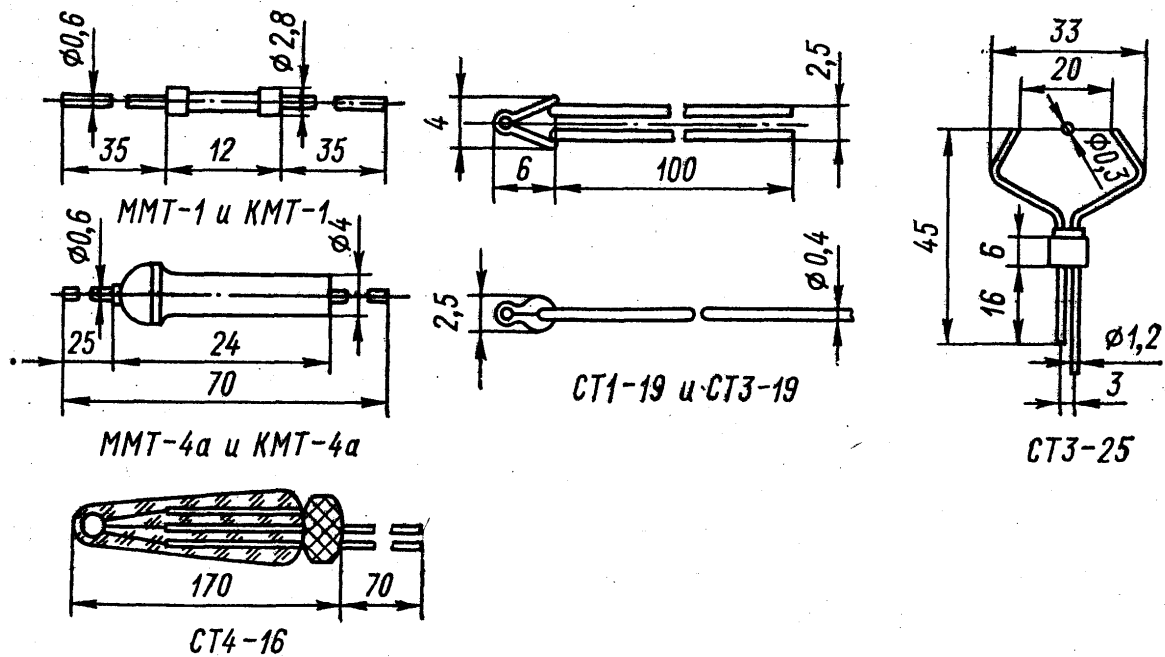


Рис. 4. Конструкції деяких напівпровідникових термо-резисторів

Конструкція **термопари**, призначеної для вимірювання температури повітря та інертних газів, показана на рис. 5, а. Робочий спай термопари відкритий. Термоелектроди є проводами діаметром 0,3 або 0,5 мм й ізольовані один від одного керамічним ізолятором, захисною арматурою також служать керамічні трубки. Термопари виконуються завдовжки $L = 40 - 10000$ мм, виводи мають довжину l , рівну 20 або 50мм, зовнішній діаметр термопари d складає 4 або 2,5 мм.

Конструкція термопари промислового типу показана на рис. 5, б. Це термопара з термоелектродами з неблагородних металів, розташованими в складеній захисній трубці з рухомим фланцем для її кріплення. Робочий спай 1 термопари ізольований від труби фарфоровим наконечником 2.

Термоелектроди ізольовані намистами 4. Захисна труба складається з робочої 3 і неробочої 6 ділянок. Пересувний фланець 5 кріпиться до труби гвинтом. Головка термопари має литий корпус 7 з кришкою 11, закріпленою гвинтами 10. У головці закріплені фарфорові колодки 8 (гвинтами 15) з

незакріпленими затискачами 12, які дозволяють термоелектродам подовжуватися під впливом температури без виникнення механічних напруг, що ведуть до швидкого руйнування термоелектродів. Термоелектроди кріпляться до цих затискачів гвинтами 13, а з'єднувальні проводи – гвинтами 14. Ці провідники проходять через штуцер 9 з азбестовим ущільненням.

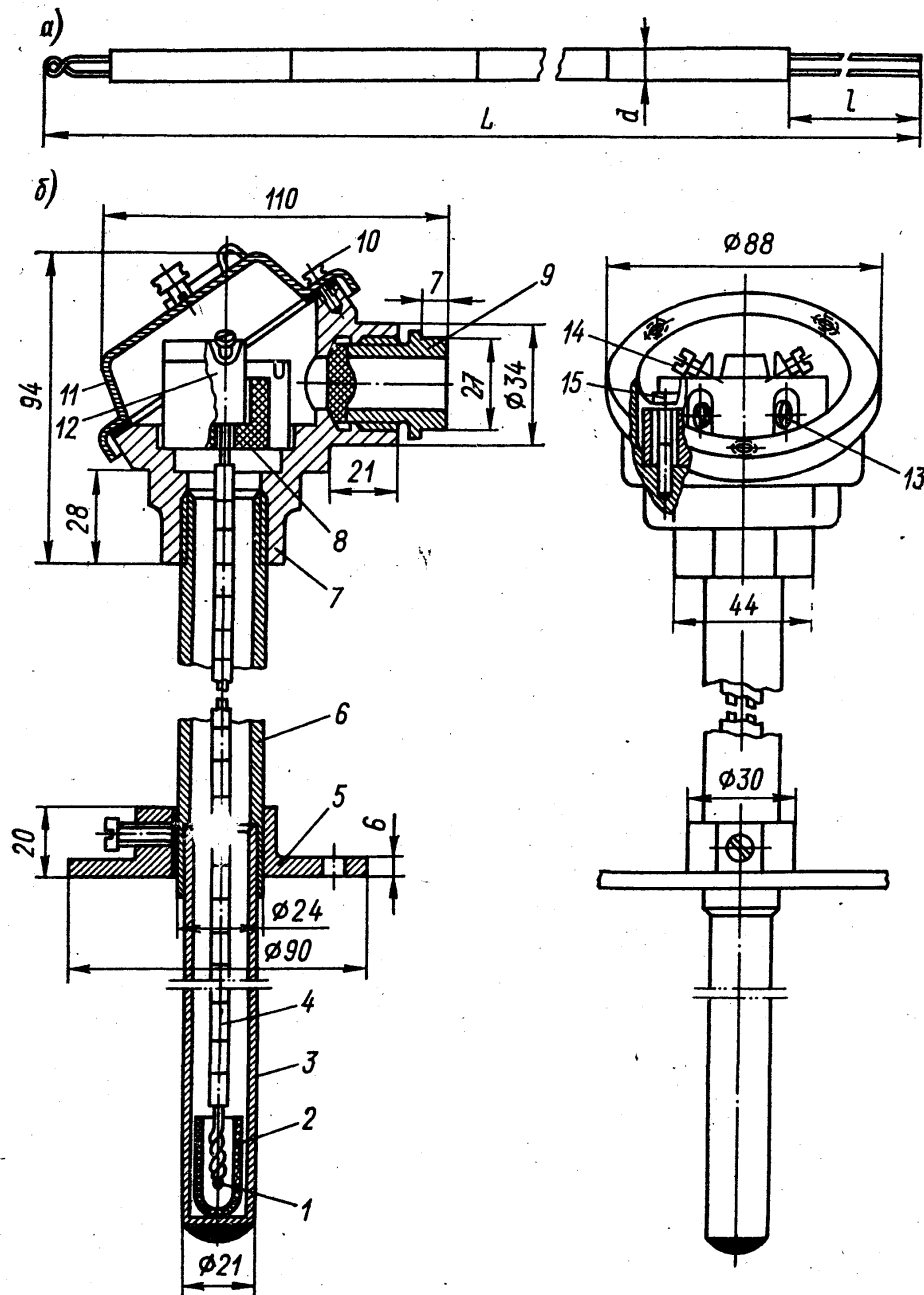


Рис. 5. Конструкція незахищеної від агресивних середовищ (а) та промислової термопар (б).

Різні типи промислових термопар мають показник теплової інерційності 5—180 с. Під показником теплової інерційності мається на увазі постійна часу термопари, визначена при зануренні її у воду.

В якості термочутливих *p–n-переходів* найбільш зручно використовувати безкорпусні діоди та транзистори. Завдяки мініатюрним розмірам вони дозволяють вимірювати температуру малих об'єктів з мінімальними спотвореннями режиму роботи, а також температуру, що змінюється в часі. Нерідко такі сенсори інтегровані в спеціалізовану мікросхему, яка виконує первинну обробку інформаційного сигналу сенсора.

Основні технічні характеристики і параметри первинних перетворювачів температури

Незважаючи на різноманітність принципів дії первинних перетворювачів температури, а, отже, на *особливості їх параметрів і характеристик*, спільними для них є:

- *діапазон вимірюваних температур;*
- *межі зміни вихідного сигналу або вихідного параметра;*
- *чутливість* в робочій точці або в кількох точках робочого діапазону;
- *межі допустимих похибок;*
- *умови експлуатації*
- *середній ресурс роботи або ймовірність безвідмовної роботи за певний період часу.*

Крім цього, кожен тип первинного перетворювача температури має специфічні параметри і характеристики, як, наприклад, *номінальний опір* та *максимальна розсіювана потужність* для терморезисторів; *максимальна генерована потужність* для термопар, яка визначається її омичним опором; для діодів і транзисторних *p–n-переходів* – *максимальна зворотна напруга* та *максимальний прямий струм*; *номінальна відстань до об'єкту* вимірювання для пірометрів і т.п.

Методика проведення експерименту

Опис схем вимірювання

Дослідження характеристик контактних сенсорів температури проводиться за допомогою термостата 1 із блоком управління 2, зразкових скляних ртутних термометрів із ціною поділки не більше 0,25 К та стандартних електровимірних приладів (рис. 6).

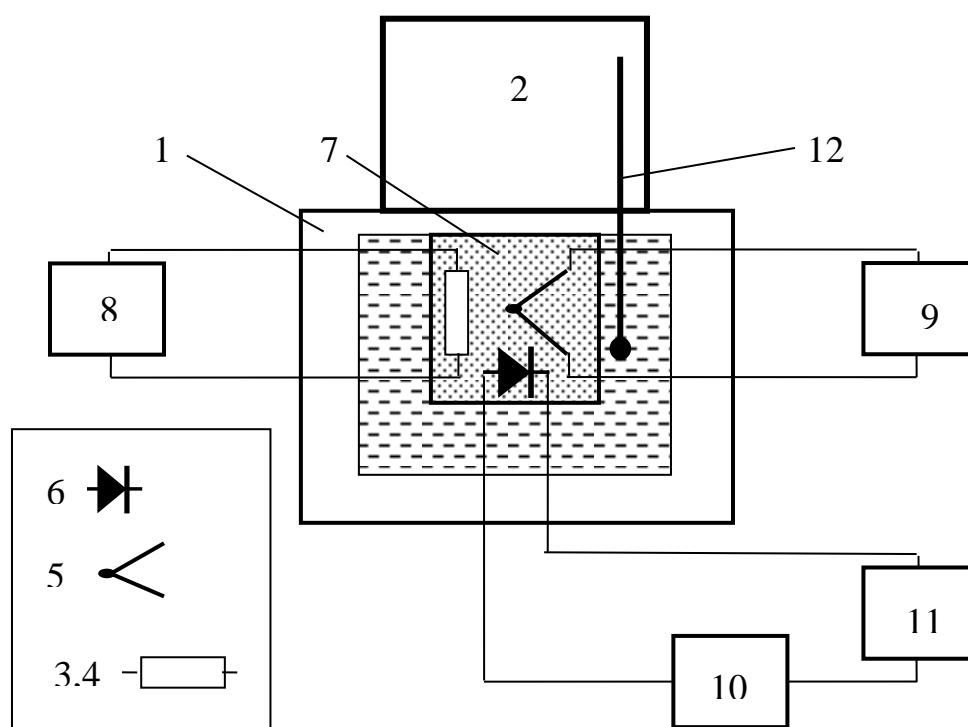


Рис. 6. Схема для дослідження контактних сенсорів температури.

Металевий та напівпровідниковий терморезистори 3, 4, термопара 5 та безкорпусний напівпровідниковий діод 6 знаходяться у мідному циліндрі 7 з маслом, що поміщений у водяний резервуар термостату (див. рис. 1). Виводи терморезисторів за допомогою тонких дротин підведені до цифрового омметра 8, а термопари до цифрового мілівольтметра 9. Напівпровідниковий діод 6 під'єднаний до джерела стабілізованої напруги 10 у зворотному напрямку. Зворотний струм діода вимірюється за допомогою мікроамперметра 11 із

кількома діапазонами вимірювань, найменший з яких не перевищує 10мкА. Температура водяної бані термостата регулюється нагрівником термостата і вимірюється високоточними ртутними термометрами розширення.

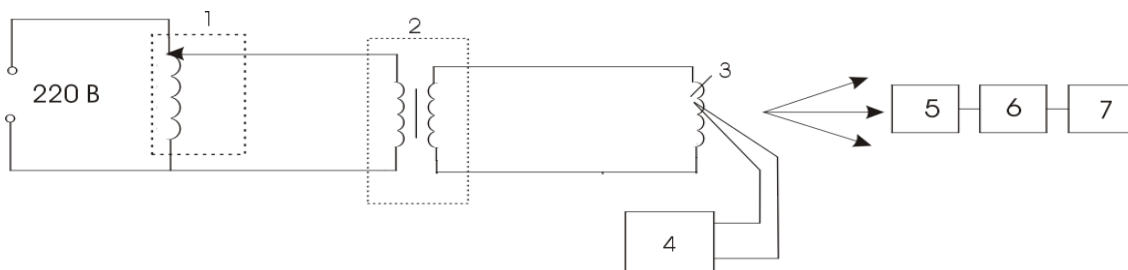


Рис. 7. Схема вимірювання температури безконтактним методом.

Схема вимірювання температури безконтактним методом приведена на рис. 7. Вона складається з лабораторного автотрансформатора 1, понижувального трансформатора 2, із яких напруга подається на спіраль із високотемпературного проводу 3, каналу пірометричного вимірювання температури та електронного термометра (4) з термопарою, розміщеною всередині спіралі. Канал пірометричного вимірювання температури включає в себе власне пірометр 5, підсилювач сигналу (6) і мілівольтметр (7).

Власне пірометр представляє собою циліндричну трубку, в якій змонтовано оптичну систему, яка фокусує випромінювання досліджуваного об'єкту на приймач – германієвий фотодіод. Фотодіод працює у вентильному режимі і температура поверхні об'єкту дослідження визначається із струму короткого замикання фотодіода.

Порівняння типової характеристики спектральної чутливості германієвого фотодіода, нормованої відносно максимального значення чутливості на довжині хвилі λ_{\max} . (а), та спектрального розподілу густини випромінювання при різних температурах, розрахованого за формулою Планка показує, що найбільш ефективно пірометр працюватиме в області 1800 К. Його характеристики можуть бути скореговані світлофільтрами, розміщеними перед фотодіодом. Описаний тут первинний перетворювач має термостатований приймач випромінювання.

Наявність термостабілізації дозволяє значно зменшити вплив температури оточуючого середовища. Температура термостатування вибрана із врахуванням характеристик фотоприймача і складає 48°C .

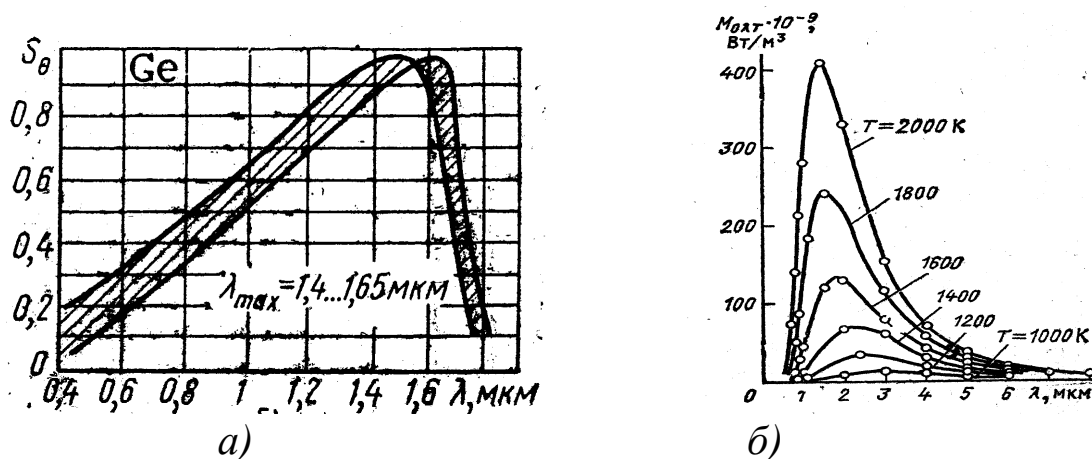


Рис. 8. Типова характеристика спектральної чутливості германієвого фотодіода (а) та спектральний розподіл густини випромінювання абсолютно чорного тіла.

Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Вимірювання температури контактним методом.

1. Ввімкнути термостат. Провести вимірювання опорів металевого R_M та напівпровідникового R_H терморезисторів, ЕРС термопари E та зворотного струму діода $I_{ЗВ}$ через кожні 2-3К в інтервалі температур від 20 до 90°C . Вимірювання зворотного струму провести при 3-5 значеннях зворотної напруги в області робочої характеристики діода.

2. Побудувати графіки $R_M=f(T)$, $R_H=f(T)$, $E=f(T)$, $I_{ЗВ}=f(T)$.

3. Для металевого терморезистора провести апроксимацію одержаної експериментальної залежності формулою (1) методом найменших квадратів, визначити діапазон зміни опору, його номінальне значення та коефіцієнт термочутливості α .

4. Для напівпровідникового терморезистора побудувати залежність $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$ і визначити з графіка E_a та R_0 . Обчислити

чутливість терморезистора $S = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T}$ в 5 - 10 точках робочого діапазону, використовуючи апроксимовану експериментальну залежність опору від температури, та побудувати графік залежності $ST^2 = f(T)$. Порівняти отримані результати з теоретичним значенням чутливості $S = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{E_a}{2kT^2}$.

Визначити діапазон зміни опору, його номінальне значення та діапазон зміни і середнє значення термочутливості S .

5. Провести апроксимацію ЕРС термопари поліномами типу $E = a_0 + a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 + \dots$, першого, другого і третього степенів, визначити коефіцієнти a_i ($i = 0, 1, 2, 3$). Знайти середньоквадратичні відхилення при кожній апроксимації, зробити висновки щодо доцільності їх використання. Порівняти одержані результати із стандартним градуванням термопари мідь-константан (константан виробництва Куйбишевського заводу „Електрокабель»).

6. Для напівпровідникового діода побудувати залежність $\ln I_{зв} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ і визначити з графіка ΔE та I_0 . При різних значеннях зворотної напруги обчислити чутливість зворотного струму діода до зміни температури $S = \frac{\Delta I}{\Delta T}$ в 5 - 10 точках робочого діапазону температур. Визначити значення зворотного струму при кімнатній температурі, діапазон його зміни.

Завдання 2. Вимірювання температури безконтактним методом.

1. Увімкнути установку. Подати на спіраль розжарювання напругу, яка приводить її до червоного каління (600-800°C).

2. Налаштувати пірометр так, щоб при заданому накалі спіралі вихідний сигнал $U_{вих}$ пірометра був максимальним. Перевірити роботу пірометра, перекриваючи потік променевої енергії до пірометра непрозорим екраном. При 2-3 значеннях температури спіралі зняти часову залежність показів пірометра

до їх кінцевого встановлення. Визначити тип перехідної характеристики пірометра та оцінити його сталу часу.

3. При незмінному положенні пірометра відносно спіралі, змінюючи напругу, зняти залежність вихідного сигналу пірометра від температури спіралі, виміряної за допомогою термопари та цифрового електронного термометра. При цьому температуру спіралі змінювати в межах 500 - 1400°C.

4. Побудувати графіки залежностей $U_{вих} = f(T)$; $\sqrt[4]{U_{вих}} = f(T)$; $\ln U_{вих} = f(T)$, зробити висновок щодо типу досліджуваного пірометра.

5. Визначити діапазон зміни вихідної напруги пірометра, при зміні температури від 500 до 1400°C, чутливість в декількох точках статичної характеристики. Зробити короткі висновки.

Лабораторна робота № 4

Вивчення роботи і дослідження характеристик перетворювача Холла

Мета роботи: дослідити роботу та визначити характеристики первинного перетворювача індукції магнітного поля на основі ефекту Холла.

Теоретичні відомості

Для вивчення фізичної суті ефекту Холла розглянемо провідник у формі прямокутної пластинки, в якій тече струм з густиною j (рис. 1). Еквіпотенціальними поверхнями усередині такої пластинки будуть площини, перпендикулярні до напрямку струму, і тому різниця потенціалів між двома металевими зондами 1 і 2, які лежать в одній з цих площин, буде рівна нулю.

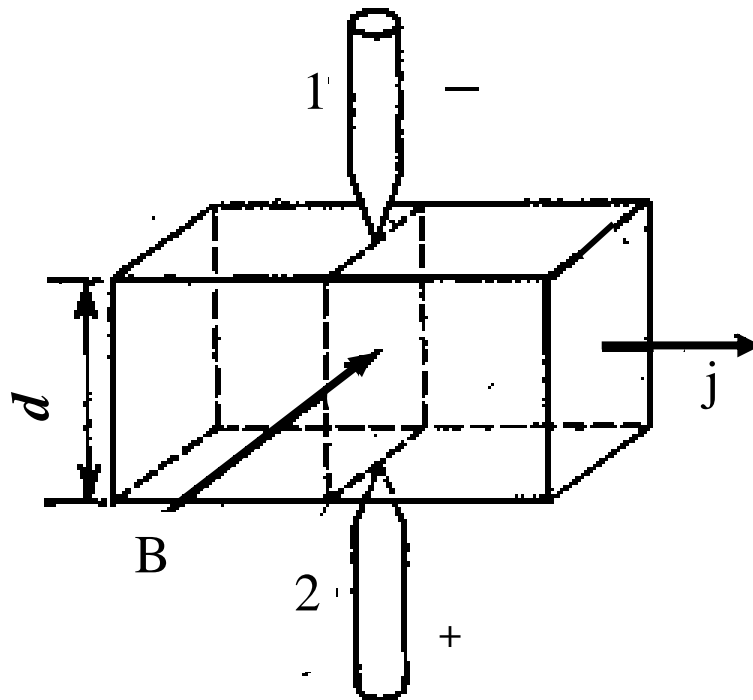


Рис. 1. Схема спостереження ефекту Холла

Проте, якщо створити в зразку магнітне поле, перпендикулярне до струму і до зондів, то між зондами виникає різниця потенціалів, вказуючи на те, що за наявності магнітного

поля еквіпотенціальні площини в пластинці стають похилими. У виникненні цієї поперечної різниці потенціалів і полягає ефект Холла. Дослід показує, що поперечна різниця потенціалів в слабких магнітних полях пропорційна магнітній індукції B ; вона пропорційна також густині струму j і відстані між зондами d :

$$U_X = RdjB, \quad (1)$$

де R – постійна, залежна від роду речовини. Вона одержала назву постійної Холла. Ефект Холла пояснюється електронною теорією і є наслідком існування сили Лоренца. Щоб краще зрозуміти це явище, обмежимося тільки спрощеною його теорією і наближено вважатимемо, що всі носії заряду – електрони в металах, електрони або дірки в напівпровідниках рухаються з постійною напрямленою швидкістю, яка рівна середній швидкості їх впорядкованого руху u . Тоді на кожну рухомию заряджену частинку діє сила F_L , перпендикулярна до напрямку струму і до магнітного поля і рівна $F_L = euB$. Під дією цієї сили носії струму, наприклад електрони, зміщуватимуться, при цьому одна з граней пластинки заряджатиметься негативно, а інша – позитивно, і усередині пластинки виникне поперечне (до струму і до магнітного поля) електричне поле E . При рівновазі $euB = eE$. Тому поперечна різниця потенціалів рівна

$$U_X = Ed = uBd. \quad (2)$$

У цьому рівнянні середню швидкість електронів u можна виразити через густину струму j , оскільки

$$j = enu, \quad (3)$$

і тому

$$U_X = (1/ne)djB. \quad (4)$$

Одержаний вираз (4) співпадає з формулою (1). Постійна Холла виявляється рівною

$$R = 1/ne \quad (5)$$

Вона залежить від концентрації електронів n , і тому, вимірюючи постійну Холла, можна визначити концентрацію електронів усередині провідника.

Легко також бачити, що знак поперечної різниці потенціалів залежить від знаку заряду рухомих частинок, що обумовлюють електропровідність. Дійсно, нехай в провідній пластинці струм тече зліва направо (рис. 2, *a*). Якщо рухомі частинки в провіднику несуть позитивний заряд, то швидкість цих частинок має той же

напряж, що і струм, і при вказаному напрямі магнітного поля відхиляюча сила буде направлена вертикально верх. У цьому випадку верхня грань пластинки заряджатиметься позитивно, а нижня – негативно. Якщо ж частинки заряджені негативно, то їх швидкість направлена протилежно струму (рис. 2, б). Так як відхиляюча сила залежить і від заряду частинок, і від їх швидкості, то її напрям не зміниться, і тому заряджені частинки також накопичуватимуться біля верхньої грані. Проте, оскільки частинки заряджені негативно, верхня грань в цьому випадку заряджатиметься негативно, а нижня - позитивно, тобто явище Холла матиме протилежний знак.

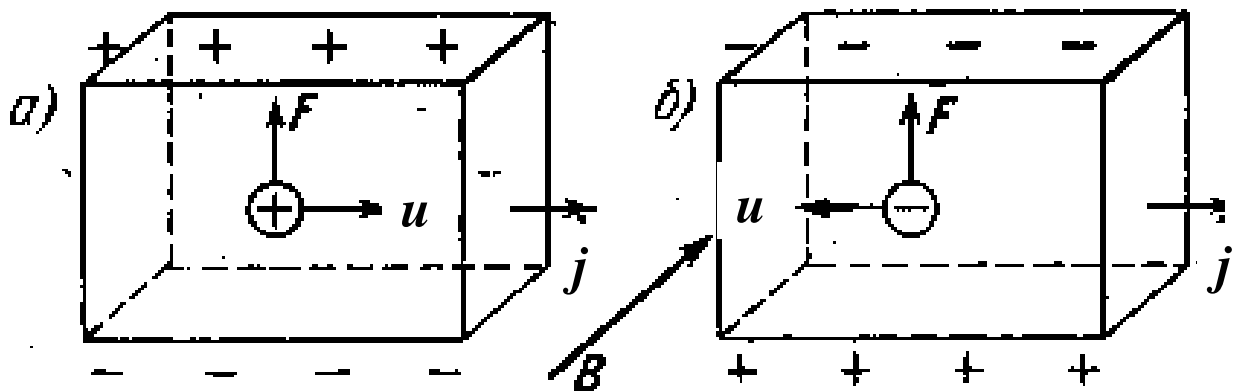


Рис. 2. До визначення знаку носіїв заряду з поперечної різниці потенціалів в ефекті Холла.

Викладена вище проста теорія ефекту Холла заснована на класичній електронній теорії, що має обмежену застосовність. Більш тонкі явища, які спостерігаються при дослідженні ефекту Холла пояснюються сучасною квантовою теорією твердих тіл.

Перетворювач Холла є чотириполюсником, який, як правило, виготовляється у вигляді тонкої пластинки або плівки з напівпровідникового матеріалу. Струмові електроди 1 і 2 (рис. 3) наносяться на всю ширину поперечних граней, що забезпечує рівномірний розподіл вхідного струму по перерізу перетворювача. Потенціальні (холловські) електроди 3 і 4 розташовані в центральній частині поздовжніх граней.

При цьому різниця потенціалів (ЕРС Холла) визначається виразом

$$U_X = Rf(K, \theta)IB\cos\alpha, \quad (6)$$

де R – постійна Холла, яка визначається властивостями матеріалу перетворювача, $f(K, \theta)$ – функція, залежна від геометрії перетворювача і так званого кута Холла θ між векторами густини струму і магнітної індукції (при $l/b = 2$, $d/l < 0,1$ і $\theta = 90^\circ$ функція $f \approx 1$); α – кут між вектором магнітної індукції і магнітною віссю перетворювача, яка співпадає в першому наближенні з нормаллю до площини перетворювача.

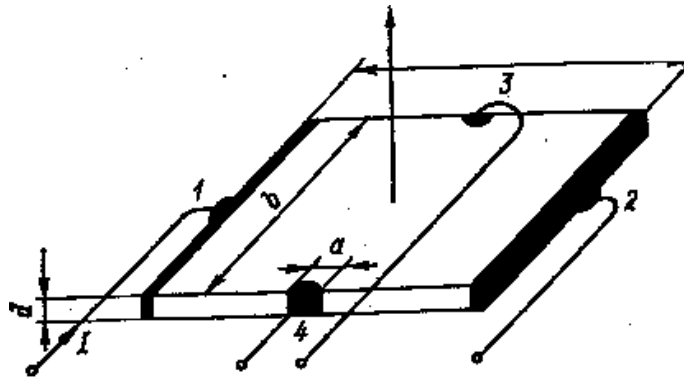


Рис. 3. Чутливий елемент перетворювача Холла.

Особливо сильно ефект Холла виявляється в германію (Ge), кремнію (Si) і в напівпровідниках, що складаються з елементів III і V групи періодичної системи. Постійні Холла напівпровідникових матеріалів мають порядок $10^{-2} - 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$, тоді як для чистих металів, наприклад для міді, $R = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{с})$,

Вихідна величина перетворювача Холла, як видно з виразу (6), пропорційна добутку двох вхідних величин – струму і магнітної індукції. Таким чином, перетворювач Холла є помножувальним перетворювачем. При постійних в часі I і B ЕРС Холла є постійною величиною. Якщо одна з вхідних величин (B або I) постійна, а інша – змінна, то ЕРС Холла буде змінною величиною тієї ж частоти, що і частота вхідної величини. У випадку якщо обидві вхідні величини мають, одну і ту ж частоту і зсунуті по фазі на кут φ , ЕРС Холла міститиме постійну складову і змінну складову подвійної частоти.

Якщо ж струм змінюється з частотою ω_1 , а магнітна індукція – з частотою ω_2 , то ЕРС Холла містить дві складові, одна з яких має частоту $\omega_1 - \omega_2$, а інша – $\omega_1 + \omega_2$.

Конструкція перетворювачів Холла

Кристалічні перетворювачі Холла виготовляються у вигляді тонких пластинок ($d = 0,01 - 0,2$ мм), які вирізаються з монокристалів і шліфовкою доводяться до необхідної товщини. Виводи прикріплюються на бічних гранях шляхом паяння або зварки. Пластинки наклеюються на підкладки з радіотехнічної слюди, ультрафарфору або ситалу.

Хорошими метрологічними характеристиками виділяються плівкові перетворювачі Холла з тонких полікристалічних плівок InAs і InSb на скляних підкладках і перетворювачі на основі гетероепітаксціальних структур InSb і GaAs на підкладках з арсеніду галія. Чутливий елемент перетворювача виконується у вигляді тонкої плівки (5 – 10 мкм) способом фотолітографії. Такі перетворювачі можна виконувати складної форми з малою площею чутливої зони (0,2 x 0,05 мм і менше). На рис. 4 показана будова перетворювачів Холла типу ПХЕ, які випускаються серійно, де 1 і 2 – струмові, а 3 і 4 – потенціальні виводи.

При проходженні через перетворювач струму виникає магнітне поле. Якщо це поле асиметричне по відношенню до чутливого елемента перетворювача, то інтегральне за площею пластини значення індукції не буде рівне нулю, а складе деяку величину B_{AC} .

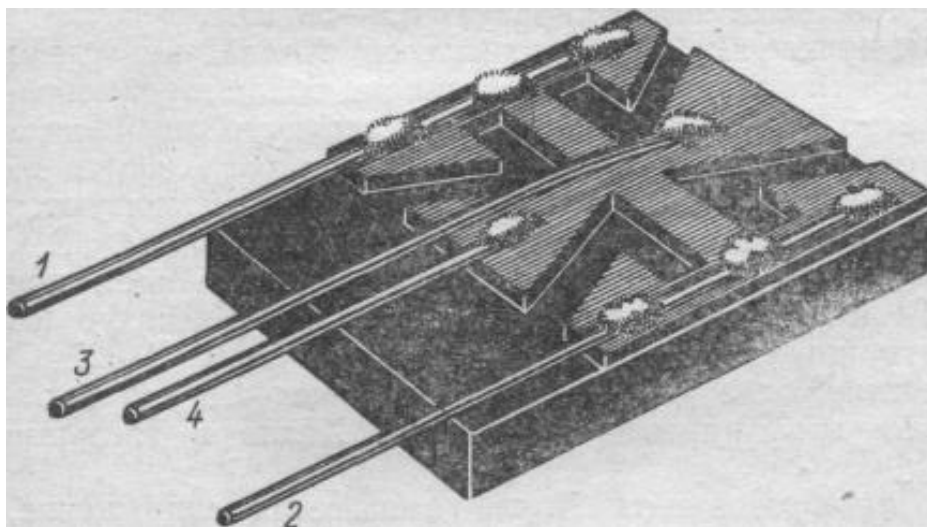


Рис. 4. Конструкція перетворювача Холла.

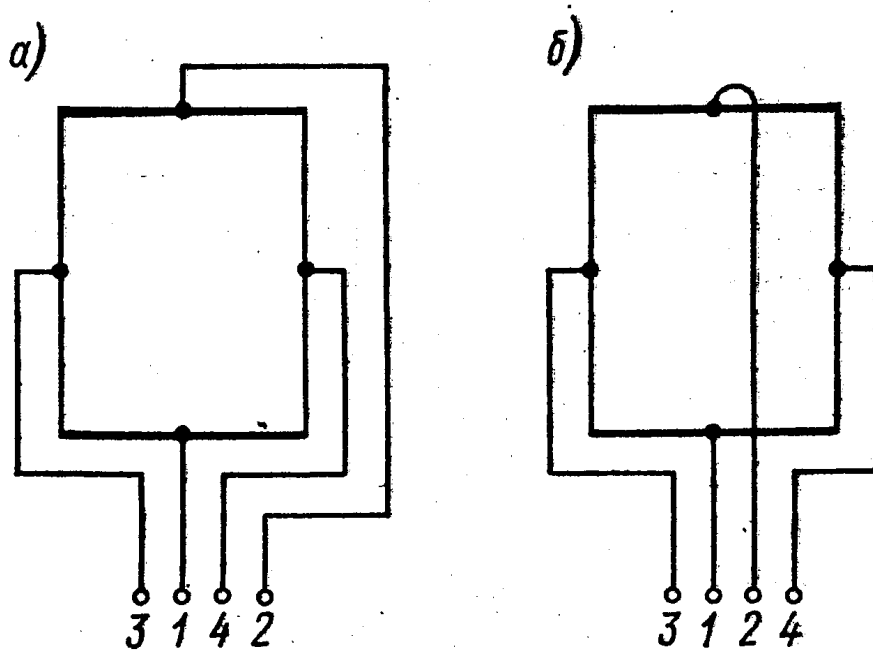


Рис. 5. Розміщення виводів у перетворювачах Холла.

Асиметрія поля може мати місце, якщо зворотний провід струмового виводу розташований поблизу перетворювача асиметрично по відношенню до нього (рис. 5, а). Додаткова ЕРС Холла, яка виникає внаслідок взаємодії індукції B_{AC} і струму I пропорційна квадрату струму I . Правильне розташування виводів показано на рис. 5, б. Якщо перетворювач знаходиться на значній відстані від феромагнітних деталей, то магнітна індукція власного поля перетворювача звичайно не перевищує $10^{-6} - 10^{-4}$ Тл. При розміщенні перетворювача поблизу полюсних наконечників індукція цього поля може досягати $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$ Тл, що приводить до істотної похибки. Основний шлях зменшення впливу власного магнітного поля – правильний монтаж перетворювача.

Найбільш широке застосування перетворювачі Холла одержали для вимірювань параметрів постійних, змінних та імпульсних магнітних полів і для визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Окрім цього, вони використовуються для вимірювань ряду інших фізичних величин, які легко перетворюються в зміну магнітної індукції (електричні струми, кутові і лінійні переміщення). Останнім часом розроблені інтегровані та інтелектуальні перетворювачі Холла, які

використовуються в спеціалізованих схемах автоматики і метрології.

Основні параметри перетворювачів Холла

Вхідний опір R_{BX} перетворювача Холла визначається як опір між струмовими електродами, а *вихідний опір* $R_{ВИХ}$ рівний опору між холловими електродами. У перетворювачів Холла, що випускаються серійно, R_{BX} і $R_{ВИХ}$ близькі по значенню і лежать в межах від 0,5 Ом до декількох кОм. Унаслідок магніторезистивного ефекту R_{BX} і $R_{ВИХ}$ збільшуються із зростанням магнітної індукції.

Гальваномагнітна чутливість перетворювача Холла при $\alpha=0$ визначається виразом

$$S_{BI} = U_X / BI = Rf(K, \theta) / d \quad (7)$$

і для різних типів перетворювачів складає 0,3-10 В/(А·Тл).

Чутливість до магнітної індукції S_B визначається при номінальному значенні вхідного струму $I_{НОМ} = const$ як $S_B = RI_{НОМ} f(K, \theta) / d$ і для перетворювачів, що серійно випускаються, складає 0,03-1 В/Тл.

Значення струму $I_{НОМ}$ обмежене допустимою температурою перегріву перетворювача. Для високоомних перетворювачів допустимі значення струмів складають 5 – 50 мА, для низькоомних 100 – 200 мА.

Гальваномагнітна чутливість S_{BI} і чутливість до магнітної індукції S_B в загальному випадку залежать від магнітної індукції B , оскільки $R = \varphi_1(B)$ і $f(K, \theta) = \varphi_2(B)$. Ці залежності головним чином визначають нелінійність характеристик перетворювачів Холла в сильних полях.

Чутливість до струму S_I визначається при постійному значенні магнітної індукції $B = const$ як $S_I = RB f(K, \theta) / d$. При індукції $B=1$ Тл чутливість до струму для різних типів перетворювачів лежить в межах 0,3 – 50 В/А.

Кращими метрологічними характеристиками володіють перетворювачі Холла на основі гетероепітаксціальних структур з антимоніду індію, які залежно від метрологічних характеристик поділяються на класи А, Б і В. Деякі різновиди цих

перетворювачів характеризуються дуже малим температурним коефіцієнтом чутливості $(5 - 10) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, малою залишковою напругою (10 – 70 мкВ), малою похибкою лінійності при магнітній індукції до 15 Тл і широким діапазоном робочих температур (від $-271,5$ до $+100$ °С). Для роботи при підвищених температурах (до 327 °С) найбільш придатні перетворювачі Холла з арсеніду галію, які мають відносно малі температурні коефіцієнти постійної Холла і питомі опори.

Залишковою напругою $U_{ЗАЛ}$ перетворювача Холла називається напруга, яка виникає між холлівськими електродами при проходженні через перетворювач струму у відсутності магнітного поля. Причиною залишкової напруги в першу чергу є розташування холлівських електродів в нееквіпотенціальних точках пластини.

За наявності температурного градієнта між холлівськими контактами, кожний з яких є з'єднанням мідного виводу з напівпровідниковим матеріалом в колі виникає термо-ЕРС. При різниці температур між контактами $0,1$ °С термо-ЕРС $\varepsilon_T = 100$ мкВ. Для зменшення градієнта температур перетворювач слід закріплювати на підкладці з матеріалу з хорошою теплопровідністю. Сумарна залишкова напруга $U_{ЗАЛ}$ може складати від одиниць мікрвольт до десятків мілівольт. У серійних перетворювачах значення $U_{ЗАЛ}/I$ лежать в межах 10^{-4} – $0,4$ Ом.

Похибка нуля, обумовлена дрейфом залишкової напруги, є однією з складових похибки перетворювачів Холла, що найбільш важко усуваються. Дрейф головним чином пов'язаний з коливаннями температури перетворювача і наявністю градієнта температур між його електродами. Однією з причин виникнення градієнта температур є ефект Пельтьє, який має місце при живленні перетворювача постійним струмом. Похибка нуля є основною характеристикою, що визначає застосовність перетворювачів Холла для вимірювання слабких магнітних полів.

Похибка лінійності у різних типів перетворювачів при зміні магнітної індукції від 0 до 10 Тл складає 1–10%. Хорошу лінійність характеристики мають перетворювачі Холла з антимоніду індію, у яких похибка лінійності складає 0,1–1% в

діапазоні $B = 0 - 0,2$ Тл і 1% при $B = 0,1 - 10$ Тл. Малу похибку лінійності (0,2%) при магнітній індукції до 1 Тл мають перетворювачі з арсеніду-фосфіду індію (InAsP).

Похибка направленості обумовлена залежністю вихідного сигналу перетворювача Холла від його просторового розташування по відношенню до вектора магнітної індукції. Напруга Холла має максимальне значення, коли вектор магнітної індукції направлений паралельно магнітній осі перетворювача, вказуючи напрям найбільшої чутливості. У ідеальному випадку магнітна вісь співпадає з нормаллю до площини перетворювача.

Істотний вплив на *стабільність* можуть мати механічні напруги, що виникають в процесі виготовлення чутливого елемента і при його монтажі в перетворювачі, а також температурні деформації. Перетворювачі без підкладки стабільніші, ніж наклеєні на підкладку. Температурна похибка перетворювачів Холла обумовлена залежністю від температури постійної Холла, опору перетворювача і залишкової напруги. Температурний коефіцієнт чутливості у кращих зразків складає $(5 - 10) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Малі значення температурної похибки характерні для перетворювачів на основі гетероепітаксціальних структур.

Якщо температурні коефіцієнти постійної Холла і опору мають однакові знаки і близькі за значеннями, корекцію температурної похибки можна здійснити при живленні перетворювача від джерела стабільної напруги. Такий режим живлення доцільно застосовувати для перетворювачів Холла з антимоніду індію. Однак, оскільки напруга Холла складним чином залежить від ряду температурно-залежних параметрів, здійснити точну корекцію температурної похибки практично неможливо, особливо для широкого діапазону робочих температур.

Динамічні характеристики перетворювачів Холла. Час встановлення ЕРС Холла характеризується часом релаксації $\tau = \varepsilon/\lambda$, де тут ε – діелектрична проникність, а λ – питома провідність матеріалу перетворювача. Для матеріалів, які використовуються для чутливих елементів $\tau = 10^{-11} - 10^{-12}$ с, тому постійна Холла частотно незалежна при частотах до 10^{11} Гц. Міжелектродні

ємності у перетворювачів Холла складають одиниці пікофарад, тому їх вплив позначається при частотах близько десятків і сотень мегагерц.

Динамічні властивості безпосередньо перетворювача Холла, здавалося б дозволяють використовувати його при вимірюваннях індукції в змінних магнітних полях дуже високої частоти. Проте при роботі в змінних магнітних полях виникають обмеження іншого роду. У змінному магнітному полі $B = B_m \sin \omega t$, у вихідному колі перетворювача з'являється додаткова ЕРС, індукована змінним магнітним полем, $\mathcal{E}_{\text{Инд}} = \omega B_m S \cos \omega t$, де ω - частота; B_m – амплітуда індукції магнітного поля і S - площа контура, що пронизується магнітним потоком. Індукована ЕРС зміщена по відношенню до ЕРС Холла на 90° . Зменшення індукованих ЕРС здійснюється раціональним розташуванням виводів перетворювача і включенням додаткових компенсаційних обмоток. Можливе також живлення перетворювача змінним струмом, частота якого значно більша частоти змінного магнітного поля, і використання вузько-смугових підсилювачів для підсилення вихідної напруги. Крім того, в змінному магнітному полі в пластині перетворювача виникають вихрові струми, магнітне поле яких змінює основне поле і тим самим ЕРС Холла. Вектор наведеної магнітної індукції зміщений щодо вектора індукції зовнішнього поля приблизно на 90° , і тому зміна ЕРС Холла відбувається не тільки за значенням, але і за фазою. Вихрові струми приводять також до додаткового розігрівання перетворювача.

При живленні перетворювачів струмом високої частоти має місце поверхневий ефект, який приводить до зменшення ефективної товщини перетворювача і до збільшення його чутливості. Для перетворювачів, що серійно випускаються, при частотах до 10^7 Гц поверхневий ефект слабкий. Для роботи при вищих частотах необхідно використовувати плівкові перетворювачі товщиною 5 – 10 мкм.

Аналіз основних метрологічних характеристик перетворювачів Холла показує, що основна похибка більшості приладів, в яких використовуються перетворювачі Холла, складає 0,5 – 1,0 % і більше. Тільки при застосуванні складних методів

корекції можна понизити похибку вимірювання до 0,1 % при роботі у вузькому діапазоні температур.

Методика проведення експерименту Опис схем вимірювання

Дослідження параметрів і характеристик перетворювача Холла проводиться за допомогою лабораторного стенда з магнітним колом та стандартних серійних електровимірних приладів. Магнітне коло представляє собою закріплений на лабораторному стенді електромагніт, що складається з котушки первинної обмотки трансформатора із сердечником, в якому зроблена невелика щілина шириною δ .

Магнітні кола широко використовують в сучасній електротехніці для створення магнітного поля потрібної величини і направленості. Загальні закони магнітного поля дозволяють обчислити магнітні потоки в будь-якому заданому магнітному колі. Проте, практично зручніше користуватися не безпосередньо цими законами, а спочатку вивести з них деякі загальні наслідки або закони магнітних кіл, і потім застосовувати ці більш частинні закони до розв'язку практичних задач.

Розглянемо просте або нерозгалужене магнітне коло (рис. 6). Вважатимемо, що воно складене з двох частин: ярма (сердечника) з матеріалу, магнітна проникність якого μ , а переріз – S , і щілини (наприклад, повітря), що має той же переріз і магнітну проникність рівну 1. Виділимо далі середню силову лінію індукції і застосуємо до неї теорему про циркуляцію вектора напруженості магнітного поля по замкнутому контуру

$$H_1 L + H_2 \delta = NI, \quad (8)$$

де H_1 – напруженість поля усередині ярма, H_2 – напруженість поля усередині щілини, L – довжина ярма, виміряна уздовж середньої лінії індукції, δ – довжина щілини, N – число витків обмотки, I – сила струму в ній.

Оскільки лінії індукції B неперервні, то значення магнітного потоку Φ усередині ярма і усередині щілини однакові. Далі, користуючись співвідношеннями $\Phi = BS$, $B = \mu_0 H$, напруженість поля можна виразити через потік

$$H_1 = \Phi / \mu_0 S, \quad H_2 = \Phi / \mu_0 S \quad (9)$$

Підставляючи ці вирази у формулу (8) знаходимо з неї потік Φ :

$$\Phi = \frac{NI}{L/\mu_0 S + \delta/\mu_0 S} \quad (10)$$

Одержана формула подібна до закону Ома для замкнутого електричного кола, при цьому величина NI грає роль електрорушійної сили, і тому вона, по аналогії, одержала назву магніторушійної сили. Одиниця магніторушійної сили в системі СІ є Ампер. Вираз

$$R_M = \frac{L}{\mu\mu_0 S} + \frac{\delta}{\mu_0 S} \quad (11)$$

входить у формулу (10) так само, як і повний опір електричного кола у закон Ома, і тому його називають повним магнітним опором кола. Величини

$$R_{1M} = L/\mu\mu_0 S, \quad R_{2M} = \delta/\mu_0 S \quad (12)$$

дають магнітні опори ділянок магнітного кола. Магнітний опір залежить від довжини магнітопроводу і його перерізу S так само, як і електричний опір, але роль питомої електричної провідності відіграє магнітна проникність $\mu\mu_0$

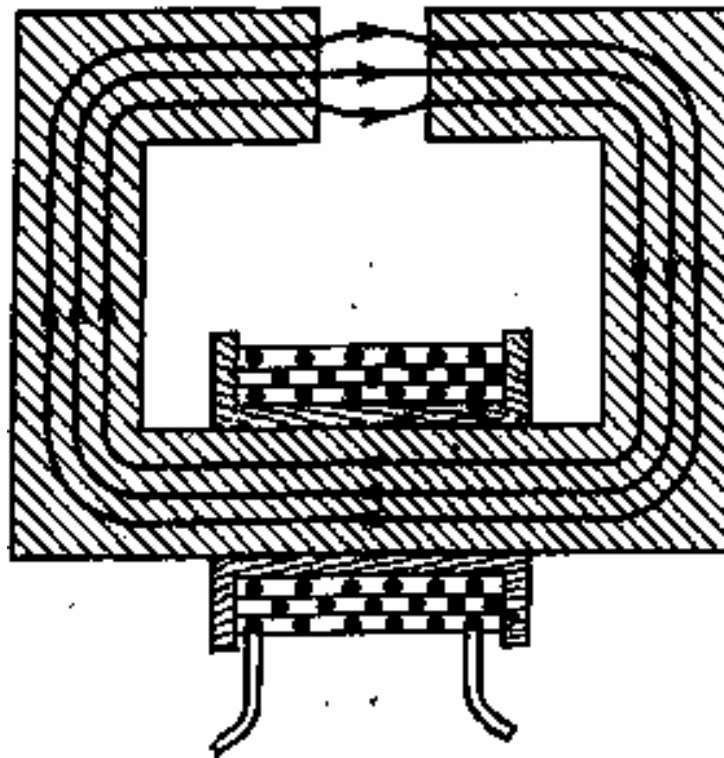


Рис. 6. Нерозгалужене магнітне коло.

Із формули (10) видно, що магнітний опір в системі СІ вимірюється в амперах на вебер (А/Вб). Порівнюючи (11) і (12), також бачимо, що повний опір кола рівний сумі опорів її частин. Цей результат, очевидно, справедливий і в тому випадку, якщо коло складене з якого завгодно числа частин, якщо магнітний потік проходить повністю тільки послідовно через ці частини, отже, при послідовному з'єднанні магнітопроводів їх магнітні опори додаються.

Нехтуючи розсіюванням магнітного поля у щілині, можна обчислити індукцію магнітного поля в ній із такого виразу

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L/\mu + \delta} \quad (13)$$

За формулою (13) із використанням параметрів, вказаних на лабораторному макеті, розраховується значення індукції магнітного поля B при різних значеннях струму через котушку електромагніта.

Параметри і характеристики перетворювача Холла досліджуються за допомогою схеми, зображеної на рис. 7. Вхідний та вихідний опори, ЕРС Холла, залишкова напруга вимірюються за допомогою мультиметра 2. Струм через перетворювач задається стабілізованим джерелом живлення 1 і вимірюється міліамперметром постійного струму. Живлення електромагніту здійснюється від окремого джерела 3, яке дає змогу пропускати через його котушку як постійний так і змінний струм частоти 50 Гц. Регулювання струму котушки здійснюється автотрансформатором шляхом зміни вхідної напруги джерела живлення 3.

Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Визначення параметрів перетворювача Холла.

1. За допомогою мультиметра виміряти значення вхідного $R_{ВХ}$ і вихідного $R_{ВИХ}$ опорів перетворювача. Враховуючи, що максимальна допустима розсіювана потужність перетворювача становить 0,1 Вт, визначити максимально допустимий струм через перетворювач.

2. Дослідити залежність залишкової напруги $U_{ЗАЛ}$ (напруги Холла у відсутності магнітного поля) від вхідного струму I ,

визначити параметр $U_{\text{ЗАЛ}}/I$ при кількох значеннях вхідного струму, знайти його середнє значення і середньоквадратичне відхилення.

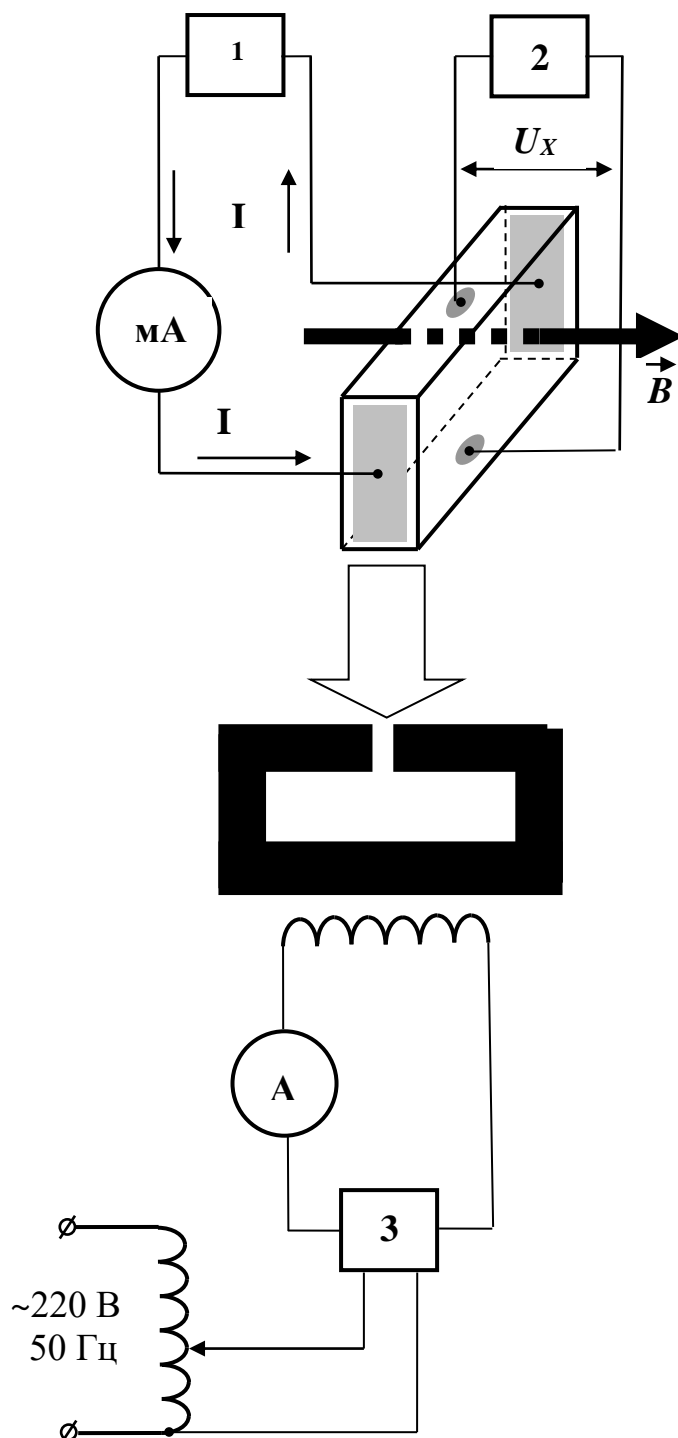


Рис. 7. Схема для дослідження параметрів і характеристик перетворювача Холла.

Завдання 2. Дослідження передавальної характеристики перетворювача Холла.

1. За допомогою штангенциркуля виміряти ширину щілини δ та довжину середньої лінії L магнітопроводу електромагніта. За формулою (13) із використанням параметрів, вказаних на лабораторному макеті, розрахувати значення індукції магнітного поля B у щілині при різних значеннях струму $I_{КОТ}$ через котушку електромагніта.

2. Під'єднати перетворювач Холла до вимірювальної схеми згідно рис. 7. При цьому котушку електромагніта підключити до вихідних клем постійного струму джерела живлення 3, а мультиметр (високоомний вольтметр) 2 встановити на вимірювання постійної напруги.

3. Дослідити передавальну характеристику перетворювача Холла, тобто залежність ЕРС Холла від індукції B магнітного поля при різних 5–7 значеннях вхідного струму I перетворювача. Побудувати графіки залежності U_X від B та U_X від I .

4. Визначити при 5–8 значеннях B та I гальваномагнітну чутливість S_{BI} , чутливість до магнітного поля S_B , чутливість до струму S_I , знайти їх середні значення та середньоквадратичні відхилення. Зробити висновки щодо лінійності передавальної характеристики.

Завдання 3. Дослідження орієнтаційної залежності вихідної напруги перетворювача Холла.

1. При кількох (3–5) різних значеннях індукції магнітного поля B і вхідного струму I зняти залежність вихідної напруги перетворювача Холла від його орієнтації у магнітному полі. Кут θ між вектором B і магнітною віссю перетворювача відраховувати по лімбу, жорстко зв'язаному з перетворювачем.

2. Побудувати графіки залежності U_X та S_{BI} від α у декартових та полярних координатах. Порівняти одержані результати із розрахованими згідно формули (6). Зробити висновки щодо параметрів перетворювача кутових переміщень на основі ефекту Холла.

Завдання 4. Дослідження характеристик перетворювача Холла в періодично змінних магнітних полях.

1. Під'єднати котушку електромагніта до вихідних клем змінного струму джерела живлення 3, а мультиметр (високоомний вольтметр) 2 встановити на вимірювання змінної напруги.

2. Виконати пункти 3 та 4 завдання 2 та пункти 1, 2 завдання 3. Порівняти одержані результати з параметрами і характеристиками, одержаними в постійному магнітному полі. Зробити відповідні висновки.

Лабораторна робота № 5

Вивчення роботи і дослідження характеристик сенсорів оптичного випромінювання

Мета роботи: дослідити характеристики та визначити параметри фоторезистора і фотодіода; вивчити схеми їх включення; дослідити характеристики та вибрати оптимальні умови роботи оптоволоконного перетворювача концентрації розчину.

Теоретичні відомості

При взаємодії електромагнітного випромінювання з твердими тілами в них виникає ряд фотоелектричних явищ, які покладені в основу функціонування фотоелектричних елементів та пристроїв електронної техніки. Прилади електронної техніки, які змінюють свої характеристики при оптичному опроміненні називаються фотоприймачами, а ті, які випромінюють світло – світлогенеруючими елементами.

Фоточутливі прилади є найважливішими елементами будь-якого оптоелектронного пристрою. Саме вони зв'язують оптичну і радіоелектронну системи в апаратурі, тому фоточутливі елементи вибирають з урахуванням вимог до всього виробу в цілому. Їх характеристики повинні відповідати якнайкращому узгодженню в тракці прийому оптичного випромінювання і обробки електричних сигналів. Складові діапазону оптичного випромінювання у шкалі електромагнітних хвиль приведені на рис. 1. Оптична область спектру електромагнітних хвиль включає хвилі з довжиною від 0,001 до 100 мкм. Вона включає три частини: ультрафіолетову, якій відповідають хвилі довжиною від 0,001 до 0,38 мкм, видиму – 0,38 – 0,78 мкм та інфрачервону область – 0,78 – 1000 мкм.

При попаданні оптичного випромінювання на фоточутливу поверхню приладу воно частково втрачається (відбивається, розсіюється), а решта частина поглинається цією поверхнею. Відбивання падаючого випромінювання впливає на ряд характеристик напівпровідникових фотоелектричних приладів,

зокрема, воно призводить до зменшення їх ефективності, до залежності їх чутливості від довжини хвилі випромінювання, а також до збільшення втрат у світловодах.

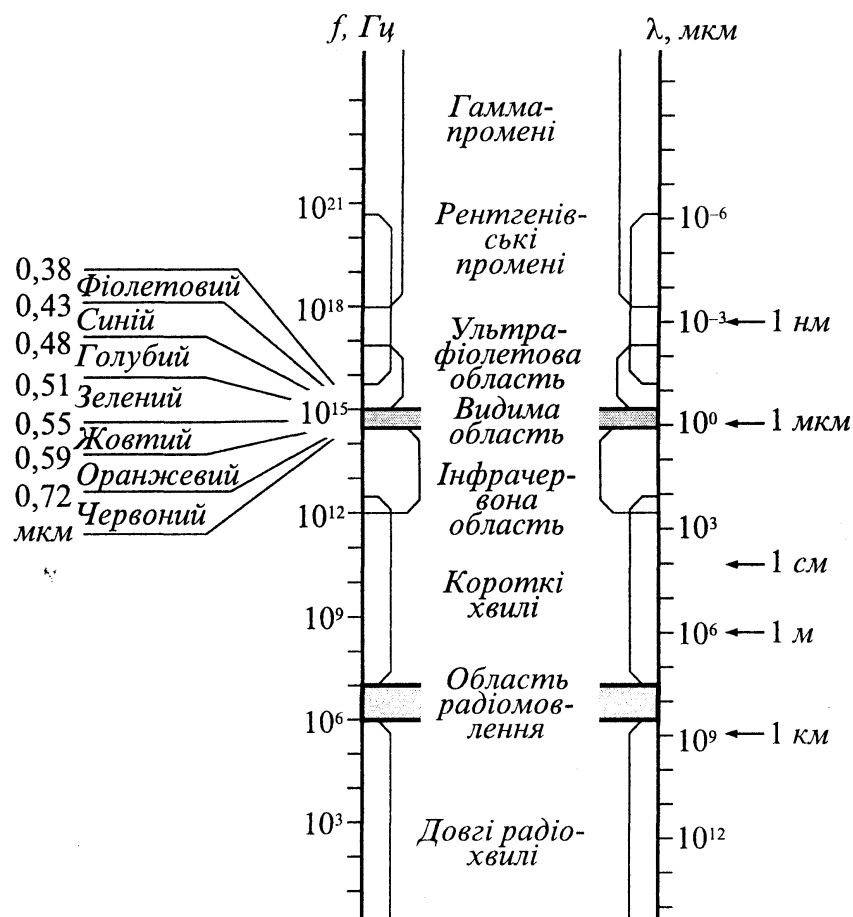


Рис. 1. Оптичний діапазон у шкалі електромагнітних хвиль.

Коефіцієнт відбивання R рівний відношенню інтенсивностей відбитого поверхнею світла до світла, що падає на неї. В загальному випадку коефіцієнт відбивання R є комплексною величиною і залежить від показників заломлення n і поглинання k , а отже від довжини хвилі λ (частоти ν) падаючого випромінювання. За відсутності поглинання

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}. \quad (1)$$

З формули (1) видно, що коефіцієнт відбивання (а отже, втрати енергії падаючого оптичного випромінювання, спричинені відбиванням), зростає із збільшенням показника заломлення. Для

зменшення цих втрат відбиваючу поверхню покривають просвітлюючим шаром. Використання просвітлюючих покриттів, особливо багат шарових дає змогу значно збільшити пропускання світла поверхнею fotocутливого матеріалу. Особливе значення це має для приймачів інфрачервоного випромінювання, оскільки n здебільше зростає із збільшенням λ . В якості матеріалів для просвітлюючих покриттів найбільш часто використовується сульфід цинку ZnS ($n=2,2$), моноокис кремнію SiO ($n=1,9$), фторид магнію MgF_2 ($n=1,3$), покриття з яких характеризується високою міцністю (адгезією) та твердістю.

Слід відмітити, що розсіювання світла визначається, в основному, якістю обробки поверхні.

При проходженні світла через речовину його інтенсивність зменшується. Частина енергії випромінювання поглинається і йде на підвищення енергії електронів або теплового руху атомів. На рис. 2, *a* наведено можливі переходи електронів у кристалах під дією світла.

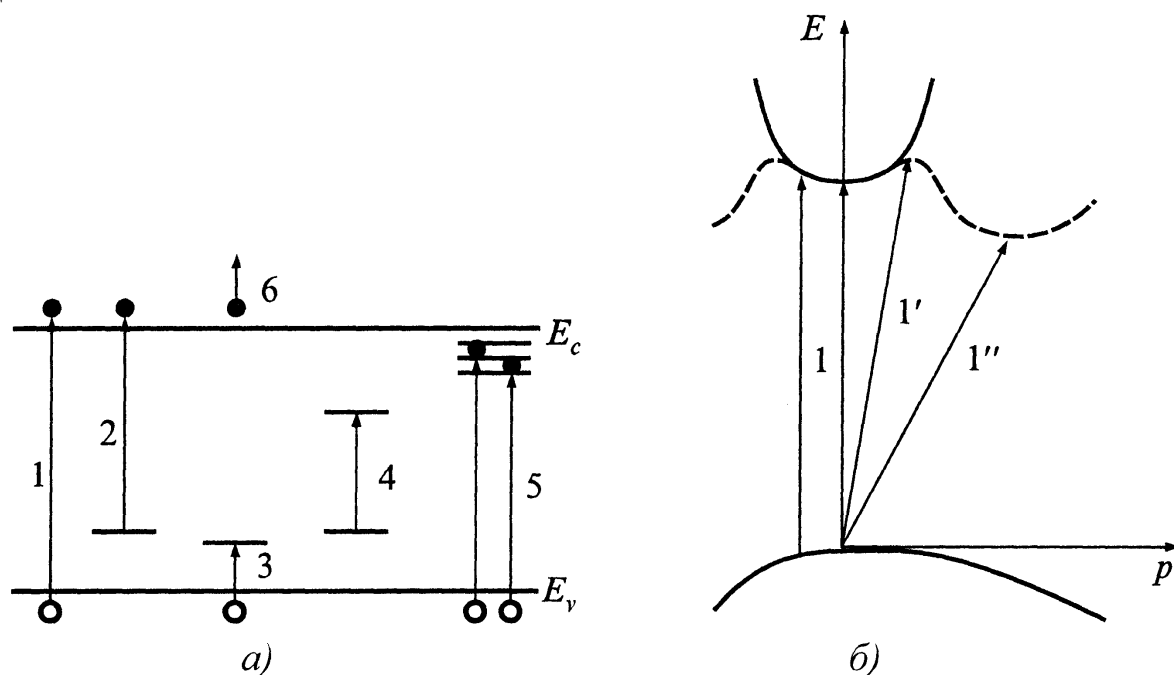


Рис. 2. Основні електронні переходи в кристалах при поглинанні світла (*a*), прямі і непрямі міжзонні переходи (*б*).

Перехід 1 призводить до появи електрона у зоні провідності і дірки у валентній зоні, він можливий при енергії фотонів

$h\nu > E_G = E_C - E_V$, тобто такої, яка більша від ширини забороненої зони E_G . За меншої енергії фотонів можуть відбуватись переходи електронів з локальних рівнів домішок або дефектів ґратки кристалів в зону провідності (перехід 2) або з валентної зони на ці рівні (перехід 3). У цьому випадку у дозволених зонах енергії з'являється тільки по одному типу носію заряду. Переходи 1, 2, 3 змінюють електропровідність твердих тіл, на цьому явищі внутрішнього фотоефекту базується робота більшості фотоприймачів.

При внутрішньоцентрових переходах 4 електрона поглинання світла не призводить до зміни електропровідності кристала. Те саме стосується екситонного поглинання (перехід 5) і поглинання вільними носіями заряду (перехід 6).

При поглинанні електроном фотона повинні виконуватись закони збереження енергії та імпульсу, тому повніше поглинання світла описується за допомогою діаграми, що враховує зміну енергії E та імпульсу p . На рис. 2, б наведено залежність від імпульсу p енергії електрона в зоні провідності (зверху) і дірки у валентній зоні (знизу). Суцільна лінія відповідає напівпровіднику, у якого мінімуми енергії електрона і енергії дірки припадають на одне і те саме значення імпульсу (так звані прямі зони). У найпростішому випадку кінетична енергія електрона зв'язана з імпульсом співвідношенням $W = p^2/2m$. Стрілки 1 зображують "прямі" переходи електрона, що відбуваються без зміни імпульсу. Імпульс фотона, що дорівнює $h\nu/c$ (де ν – частота), дуже малий, і тому відповідним приростом імпульсу електрона, що поглинув фотон, можна знехтувати. Перехід 1' є "непрямим" і відбувається зі зміною імпульсу електрона, тут у поглинанні фотона бере участь третя частинка – фонон. До речовин з цими переходами належать такі поширені в оптоелектроніці матеріали, як GaAs (ширина забороненої зони $E_G = 1,4$ eV), CdSe (1,8 eV), CdS (2,5 eV), ZnS (3,7 eV) тощо.

Можливий випадок, коли екстремуми енергій електронів і дірок на діаграмі $E(p)$ припадають на різні p (штрихова лінія на рис. 2, б). Тепер переходи за найменшої енергії фотонів можливі тільки непрямі (1"). При вищих енергіях фотонів виникає можливість прямих переходів (1). До матеріалів з непрямими

зонами належать, наприклад, Ge ($E_G = 0,7$ eВ), Si (1,1 eВ), AlAs (2,2 eВ), GaP (2,3 eВ) і SiC різних політипів (2,4 – 3,1 eВ).

Якщо під дією світла відбуваються переходи з участю домішкових рівнів (переходи 2, 3 на рис. 2, а), то третьою частинкою, що забезпечує виконання закону збереження імпульсу, може бути домішковий центр.

Кількісно поглинання світла можна описати таким чином. Припустимо, що на одиничну площадку під поверхнею всередині речовини падає потік випромінювання $\Phi(0)$, а на таку ж площадку на глибині x величина потоку становить $\Phi(x)$. В шарі завтовшки dx поглинається енергія $d\Phi$, яка пропорційна до падаючого потоку і товщини dx , тобто $-d\Phi(x) = \alpha\Phi(x)dx$, де α – коефіцієнт пропорційності. Інтегруючи, отримаємо

$$\Phi(x) = \Phi(0)\exp(-\alpha x). \quad (2)$$

Отже, потік випромінювання експоненціально зменшується при заглибленні у зразок. Величину α називають коефіцієнтом поглинання. Вона вимірюється в м^{-1} . Якщо $x = x^* = 1/\alpha$, маємо $\Phi(x) = \Phi(0)/e$, тобто коефіцієнт α – це величина, обернена до віддалі x^* , на якій потік зменшується в e разів. Величину x^* називають довжиною поглинання світла. Якщо при власному поглинанні $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$, то $x^* = 0,1$ мкм. Для домішкового поглинання світла α значно менше, оскільки концентрація домішкових електронів або акцепторних рівнів порівняно невелика (приблизно $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ проти $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ валентних електронів основної речовини). При концентрації домішки близько 10^{17} см^{-3} коефіцієнт домішкового поглинання $\alpha \sim 10 \text{ см}^{-1}$.

У кристалах з великою часткою іонного зв'язку можливе збудження коливань ґратки світловими хвилям, а поглинання світла вільними носіями заряду пропорційне до їх концентрації.

У фотоприймачах застосовують залежності x^* від енергії фотонів $h\nu$ в області власного поглинання кристалів. Домішкове поглинання використовують тільки в деяких випадках – для розширення спектральної характеристики у довгохвильову область.

Внаслідок відбивання, крізь поверхню проникає частина енергії випромінювання

$$\Phi(0) = \Phi_0(1-R) \quad (3)$$

З урахуванням (2) одержимо

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot (1-R) \cdot \exp(-a \cdot x) \quad (4)$$

Отже, інтенсивність випромінювання, яке проходить через тверде тіло, зменшується за експоненціальним законом. Зменшення інтенсивності може зумовлюватися розсіюванням фотонів або їх поглинанням.

Таким чином, з вищенаведеного слідує, що при взаємодії випромінювання з твердим тілом в залежності від енергії світлових квантів $h\nu$ спостерігаються різні механізми поглинання, які можна поділити на дві великі групи. До першої належать процеси, при яких енергія фотона перетворюється в інший вид енергії, однак при цьому не відбувається іонізації речовини, тобто не змінюється концентрація вільних носіїв. Наприклад, поглинання випромінювання з енергією $h\nu$ може призвести до утворення фотонів з меншою енергією $h\nu_1 < h\nu$, тобто до випромінювання світла меншої частоти ν_1 . Поглинання світла може призвести до утворення фононів. Тоді світлова енергія перетворюється в теплову. Випромінювання може поглинатися також вільними носіями заряду – в цьому випадку їх концентрація не змінюється, однак зростає їх кінетична енергія (електрони переходять на вищі енергетичні рівні). Зіштовхуючись з ґраткою, вони передають їй свою надлишкову енергію. У результаті енергія світлової хвилі перетворюється також в теплову енергію ґратки.

До другої групи належать види поглинання фотоелектричної природи, внаслідок яких зростає концентрація вільних носіїв заряду. Розглянемо коротко механізми поглинання, що визначають, в основному, роботу більшості фотоелектричних приладів. Якщо енергія світла, що падає на тверде тіло, достатня для того, щоб надати електрону можливість вільно переміщуватися в кристалі, говорять про внутрішній фотоефект. Залежно від того, взаємодіє фотон з атомом основної речовини чи з атомами домішок, утворюється або пара носіїв заряду, або вільний електрон чи дірка. У роботі більшості напівпровідникових фотоприймачів на основі внутрішнього фотоефекту, головну роль відіграє утворення пари електрон-дірка.

Оскільки мінімальна енергія, необхідна для переведення електрона з валентної зони в зону провідності, залежить від ширини забороненої зони $E_G = h\nu_0 = hc/\lambda_0$, то можна знайти максимальну довжину хвилі, при якій можливі міжзонні переходи: $\lambda_{max} = hc/E_G$. Величина λ_{max} визначає положення краю власного поглинання (рис. 3). Випромінювання з довжиною $\lambda > \lambda_{max}$, тобто з енергією, меншою від E_G , не буде поглинатися кристалом (якщо знехтувати іншими механізмами поглинання). Якщо ж енергія фотона буде більшою від E_G , тобто $\lambda < \lambda_{max}$, поглинання, як видно з рис. 3, різко зростає.

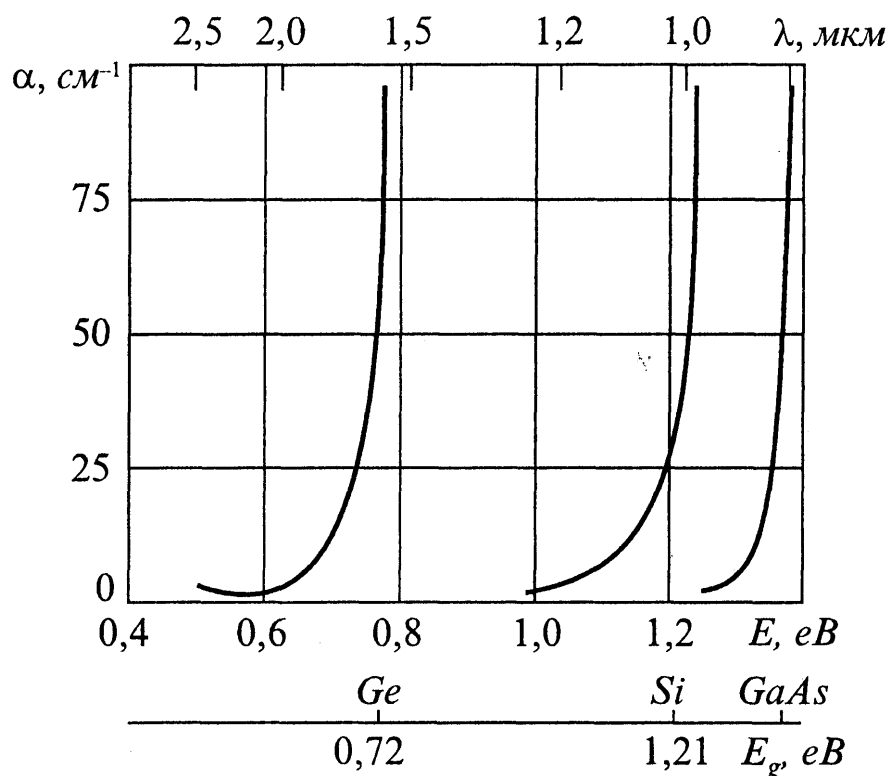


Рис. 3. Положення краю власного поглинання для германія, кремнія та арсеніду галія.

В області власного поглинання для більшості напівпровідників коефіцієнт поглинання дуже великий: $\alpha \sim 10^3 - 10^5 \text{ см}^{-1}$. З формули (4) видно, що в такому разі падаюче випромінювання практично загасає у поверхневому шарі завтовшки близько 1 мкм.

Оскільки ширина забороненої зони залежить від температури і тиску, положення краю власного поглинання також залежить від цих величин. Так, зі збільшенням температури край власного поглинання зміщується в область довших хвиль. Якщо енергія падаючого випромінювання менша від ширини забороненої зони, але достатня для іонізації домішки – поглинання домішкове, а мінімальна енергія фотонів повинна дорівнювати енергії іонізації домішок. Однак слід мати на увазі, що енергія активації багатьох домішок значно менша від середньої енергії теплових коливань ґратки за кімнатної температури. Тому для спостереження домішкового поглинання необхідно охолодити кристал до досить низьких температур. Величину $\alpha_{\text{дом}}$ при домішковому поглинанні можна наближено оцінити за співвідношенням $\alpha_{\text{дом}} \sim 10^{16} \cdot N_{\text{дом}} \text{см}^{-1}$, де $N_{\text{дом}}$ – числове значення концентрації домішки. Звичайно $N_{\text{дом}} = 10^{15} - 10^{18}$, отже, $\alpha_{\text{дом}} \sim 0,1 - 100 \text{ см}^{-1}$.

Таким чином:

– при поглинанні оптичного випромінювання у fotocутливому напівпровідниковому матеріалі виникають носії заряду – електрони і дірки, що обумовлюють надлишкову електропровідність. Електропровідність напівпровідникового матеріалу, що виникає при його оптичному опромінюванні, називають фотопровідністю. Ступінь фотопровідності залежить від коефіцієнта поглинання фотонів матеріалом, що визначає, зокрема, швидкість генерації носіїв, а також від квантового виходу фотоіонізації – числа носіїв заряду, що утворюються під впливом одного кванта випромінювання.

– фотопровідність виникає у випадку, якщо енергія фотонів перевищує деяке порогове значення. При власному поглинанні порогову енергію визначає ширина забороненої зони, а при домішковому – рівень енергії активації відповідного домішкового центру.

Види фотоприймачів та їх загальна характеристика

Ступінь зміни електричних характеристик фотоприймача при освітленні залежить від швидкості генерації фотоносіїв Γ , тобто від кількості носіїв, що виникають за одиницю часу в одиничному об'ємі речовини. Чутливість фотоприймача

визначається тим, наскільки сильно змінюються його електричні характеристики у разі опромінювання світлом. Якщо потік світла призводить до зростання струму в колі на I_Φ , то так звана струмова чутливість становить $S_I = I_\Phi/\Phi$. Якщо напруга на виході зростає на U_Φ то вольтова чутливість $S_V = U_\Phi/\Phi$. У загальному випадку залежності $I_\Phi(\Phi)$ і $U_\Phi(\Phi)$ є нелінійними функціями Φ .

Іншою важливою характеристикою приймача є квантовий вихід внутрішнього фотоефекту η , який рівний кількості нерівноважних носіїв (пар), що утворюються під дією одного фотона. Кількість поглинутих фотонів Q у світловому потоці з інтенсивністю Φ становить $Q = \alpha\Phi/h\nu$. Чутливість фотоприймача залежить від швидкості генерації носіїв заряду $\Gamma = \eta \cdot Q$, тобто

$$\Gamma(x) = \eta \cdot \alpha \Phi(x) / h\nu. \quad (5)$$

В області власного поглинання $\eta = 1$, тому при незмінній інтенсивності світла швидкість генерації, а отже фотострум і чутливість обернено пропорційний частоті падаючого випромінювання (рис. 5, а).

Концентрація фотоелектронів визначається швидкістю генерації і часу їх життя τ у зоні провідності: $n_\Phi = \Gamma \cdot \tau$. За допомогою виразу (5) одержимо, що в освітленій поверхні ($x = 0$) швидкість генерації

$$G(0) = \eta \cdot \alpha \Phi(0) / h\nu. \quad (6)$$

де $\Phi(0)$ - густина падаючого світлового потоку.

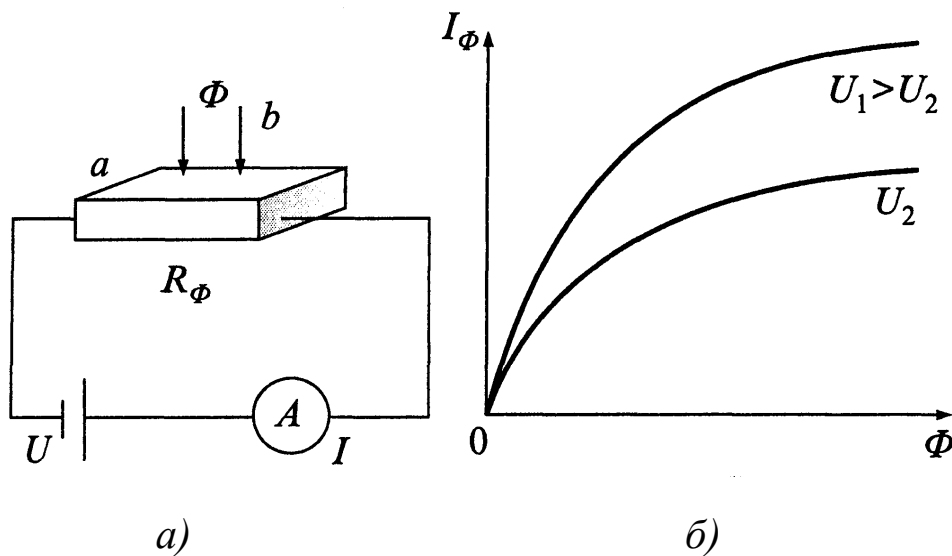


Рис. 4. Фотопровідність: а - схема спостереження; б - фотострум при різних світлових потоках Φ і напругах U .

З виразу (6) видно, що фотострум пропорційний до Φ . Експериментальні залежності $I_{\Phi}(\Phi)$ показують послаблення залежності $I_{\Phi}(\Phi)$ при великих світлових потоках (рис. 4). Це пов'язано з тим, що при великих Φ і відповідних n_{Φ} час життя електронів може зменшуватись, наприклад, через збільшення при освітленні концентрації носіїв протилежного знаку (наприклад дірок).

Перший тип фотоприймачів – це однорідний напівпровідник (без запірних шарів), у якому зовнішнє джерело напруг створює слабе однорідне поле ($E \sim 10^2$ В/см). У цьому випадку фотострум залежить від Γ , E і протяжності зразків вздовж поля.

Для другого типу – фотоприймачів із одним або кількома p - n -переходами важлива величина Γ і загальна кількість електронно-діркових пар, що виникають як в області самого переходу, в якій присутнє сильне електричне поле, що захоплює носії, так і в тонких шарах, що прилягають до переходу. Фотоелектрони і фотодірки, що виникають у цих шарах, після дифузії до переходу також підхоплюються електричним полем і створюють додатковий струм у колі. Таке походження фотоструму в фотодіодах з p - n -переходами, які найчастіше використовуються як фотоприймачі. Те саме відбувається у запірних шарах, які утворюються на контакті металу і напівпровідника. Максимальна напруженість неоднорідного поля в переходах становить близько 10^5 В/см. На струм деяких типів фотодіодів, у яких створюється поле напруженістю $E > 5 \cdot 10^5$ В/см, впливають як швидкість генерації носіїв світлом, так і напруженість електричного поля E (лавинні діоди).

В одних типах приймачів (звичайні фотодіоди) фотострум повністю визначається величиною $\Gamma(x)$ і об'ємом матеріалу, в якому відбувається поглинання світла, в інших (лавинний фотодіод, фоторезистор, фототранзистор) - величиною $\Gamma \cdot Z(E)$, де $Z(E)$ – коефіцієнт підсилення, що залежить від напруженості поля E . Значення Z , які впливають і на чутливість приладів, наведено в табл. 1.

Фотоприймачі не миттєво відгукуються на увімкнення і вимкнення світла (рис. 5, б). Подібна інерційність приймачів має різне походження, формально вона може бути охарактеризована

сталими часу наростання і спаду фотоструму. Для спаду струму стала часу τ_2 відповідає зменшенню струму в e разів. Передбачається, що фотострум зменшується за законом $I_\Phi = I_M \cdot \exp(-t/\tau_2)$. Якщо струм зростає за законом $I_\Phi = I_M \cdot (1 - \exp(-t/\tau_1))$, то τ_1 – стала часу наростання фотоструму. Для моменту $t = \tau_1$ маємо $I_\Phi = 0,63I_M$, де I_M – максимальне значення фотоструму. Сталі часу τ_1 і τ_2 можуть відрізнятись, але, як правило, одного порядку, їх типові значення наведено в табл. 1.

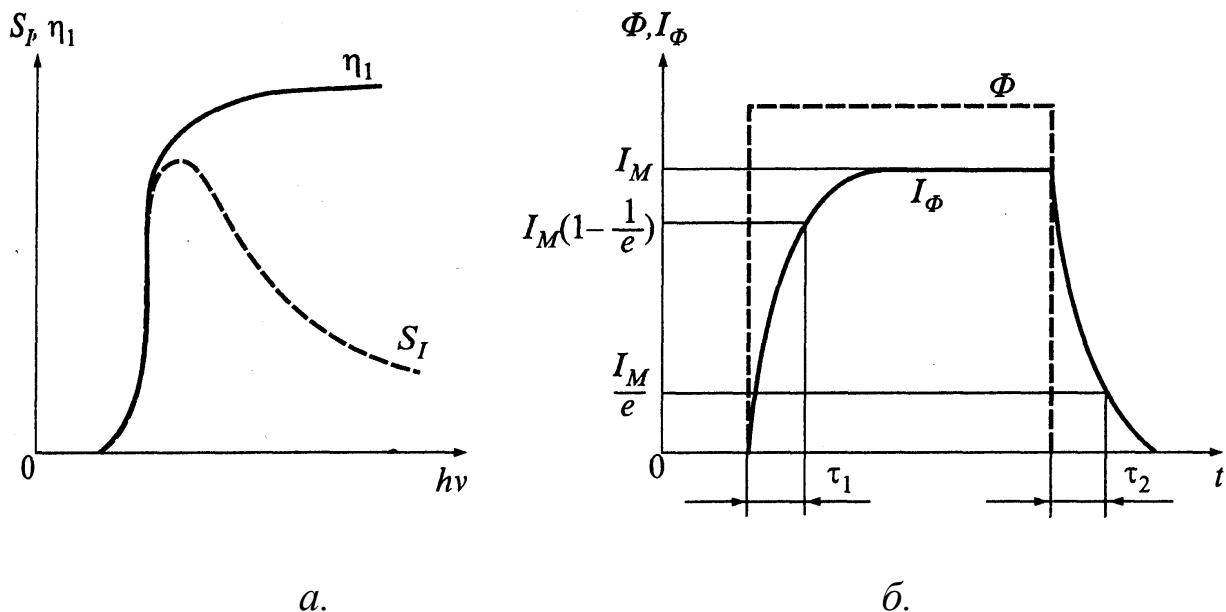


Рис. 5. Залежність квантового виходу η та чутливості S_I фотоприймача від енергії фотонів (а) при сталій інтенсивності світла Φ , зміна фотоструму I_Φ з часом (б).

Таблиця 1. Типові значення коефіцієнта підсилення і часу фотовідгуку

Фотоприймач	Коефіцієнт підсилення Z	Стала часу τ , с
Фоторезистор	$1 - 10^5$	$10^{-2} - 10^{-7}$
Фотодіод з р-п-переходом	1	$10^{-6} - 10^{-8}$
Діод з р-і-п переходом	1	$10^{-8} - 10^{-10}$
Діод з поверхневим бар'єром	1	10^{-10}
Лавинний фотодіод	$10^2 - 10^4$	10^{-9}
Фототранзистор	10^2	10^{-6}

Інерційність фоторезисторів визначається в значній мірі участю пасток. Електрони, потрапивши в зону провідності, можуть захоплюватись пустими рівнями домішок або дефектів ґратки, причому час перебування електронів на цих рівнях зростає зі збільшенням їх глибини і пониженням температури. Процеси захоплення носіїв пастками ("присипання" електронів і дірок) дуже затягує зростання фотоструму після вмикання світла і спад після його вимкнення. У результаті фоторезистори мають більшу, ніж інші фотоприймачі, інерційність (табл. 1). Ці обставини, а також температурна залежність параметрів фоторезисторів обмежують їх використання.

Струми I , що йдуть через фотоприймач у темноті і при освітленні, мають випадкові відхилення ΔI від середнього значення. Оскільки ці відхилення мають різні знаки, їх середнє значення $\langle \Delta I \rangle = 0$, а мірою випадкових відхилень (флуктуацій) є середнє значення квадрата відхилення $\langle \Delta I^2 \rangle$. Фотострум, що відповідає світловому сигналу, спостерігається на фоні цих коливань (шумів), які визначають і найменший світловий сигнал, що може бути зареєстрований.

Шуми можуть мати різне походження. Так званий тепловий шум пов'язаний з тим, що внаслідок хаотичності теплового руху вільних електронів їх концентрація в різних ділянках напівпровідника змінюється з часом. Пов'язані з цим коливання ЕРС і струму пропорційні температурі T :

$$\langle \Delta I^2 \rangle = kT\Delta f/r, \quad (6)$$

де k - стала Больцмана, r - опір зразка, Δf - смуга частот коливань (коливання довільної форми можуть бути наведені як результат додавання синусоїдальних коливань з різними частотами).

Дробовий шум викликаний коливанням числа електронів, що проходять через прилад при незмінній зовнішній напрузі. Ці коливання також пов'язані з флуктуаціями концентрації носіїв у тих областях приладу, які визначають значення сили струму. У цьому випадку

$$\langle \Delta I^2 \rangle = 2eI\Delta f \quad (7)$$

Шум такого типу може визначатись випадковим характером генерації, рекомбінації та дифузії електронів і дірок. Існують інші види шумів, що по-різному проявляються в різних пристроях.

Конструкції чутливих елементів фотодатчиків

Фоторезистори можуть мати як чутливий елемент – монокристал напівпровідника, плівку напівпровідника на діелектрику або таблетку пресованого порошкоподібного матеріалу. Останній спосіб застосовують, наприклад, при виготовленні промислових фоторезисторів із сульфїду або селенїду кадмїю. Фоторезистори на основі селенїду кадмїю мають темновий опір порядку 10^6 Ом, максимум спектральної характеристики в області $0,7$ мкм, працюють при напрузі 20 В і мають сталі часу зростання і спаду фотоструму відповідно $\tau_1 = 40$ мс і $\tau_2 = 20$ мс. Їх інтегральна чутливість при використанні випромінювання теплового джерела світла з температурою 2840 К становить $S_I = 600$ мА/лм (при освітленості 200 лк).

Фоторезистори на основі сульфїду свинцю є менш інерційними ($\tau_1 = 0,1$ мс) і мають високу виявлювальну здатність (див. нижче) $D^*(2,4\text{мкм}, 780 \text{ Гц}, 1 \text{ Гц}) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \text{ Вт}^{-1}$ при 295 К.

Фотодіоди здебільшого мають планарну конструкцію (світло падає перпендикулярно до площини p – n -переходу). Як приклад, на рис. 6. приведена конструкція p – i – n діода, який є одним із найбільш поширених фотодетекторів.

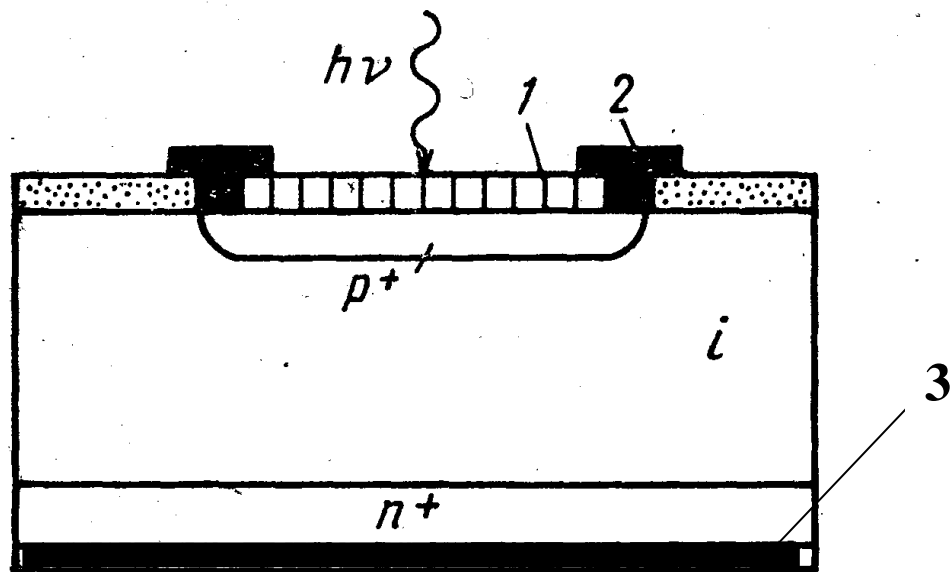


Рис. 6. Конструкція p – i – n фотодіода.

Для зменшення відбивання світла від поверхні діода її покривають антивідбивною плівкою 1. Виводи діода прикріплюються до металевих контактів 2 і 3. По периметру робочої поверхні іноді формують захисне кільце (на рис. 6 – не показане), яке дозволяє підвищити напругу пробою. Товщина i області складає приблизно 50 мкм, а шару p^+ всього 3 мкм. При освітленні такого діода світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,9$ мкм (що співпадає з максимумом випромінювання світлодіода на основі Ga-Se) $x^* = 30$ мкм і близько 80% світла поглинається в i -шарі. Оптимально вибрані параметри призводять до того, що практично всі фотоелектрони і дірки виникають у високоомній i -області і швидкодія діоду визначається часом прольоту носіїв через цю область. При напрузі порядку 100 В час прольоту становить 0,3 нс.

Основні характеристики і параметри фоточутливих приладів

Спектральна характеристика чутливості відображає реакцію фотоприладу на дію випромінювання з різною довжиною хвилі. Ця характеристика визначає спектральну область застосування приладу, його спектральну і інтегральну чутливість.

Енергетична (світлова) характеристика відображає залежність фотовідповіді приладу від інтенсивності збуджуючого потоку випромінювання (ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристики). Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної або спектральної чутливості приладу від інтенсивності опромінювання.

Порогові характеристики показують здатність фотоприладу реєструвати випромінювання малої інтенсивності. Ця здатність в основному залежить від рівня власних шумів приладу – флуктуацій струму, що протікає через нього у відсутності опромінювання або при немодульованому світловому потоці.

Вольт-амперна характеристика відображає залежність струму фотоприймача від прикладеної до нього напруги; світловий (загальний) струм $I = I_T + I_\Phi$, де I_T – струм за відсутності освітлення (темнової струм), I_Φ – фотострум.

Частотні характеристики описують залежність чутливості від частоти модуляції випромінювання або тривалості імпульсів і характеризують інерційність приладу.

Температурні характеристики визначають залежність параметрів приладу (темновий струм, темновий опір, чутливість і т. п.) від температури навколишнього середовища. Робочий температурний інтервал указують в паспорті приладу. При цьому вказують значення основних параметрів в крайніх точках інтервалу при робочій напрузі приладу.

Робоча напруга U_P – постійна напруга, прикладена до приладу, за якої забезпечені номінальні параметри при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах. Звичайно її встановлюють із запасом по відношенню до пробивної напруги.

Максимально допустима, напруга U_{MAX} – значення постійної напруги, при якій відхилення параметрів приладу не перевищують встановлених меж.

Потужність розсіювання – потужність, що виділяється при проходженні фотоструму; вона визначає розігрів приладу. Перевищення максимально допустимої потужності розсіювання $R_{ДОП}$ приводить до пошкодження приладу. Значення $R_{ДОП}$ залежить від інтенсивності відведення тепла.

Темновий опір R_T – опір приладу за відсутності падаючого на нього випромінювання в межах його спектральної чутливості.

Диференціальний опір R_D – відношення малих приростів напруги на приладі і струму через нього.

Темновий струм I_T – струм, що проходить через прилад при вказаній напрузі за відсутності потоку випромінювання в межах спектральної чутливості.

Короткохвильова (довгохвильова) межа спектральної чутливості – найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якій монохроматична чутливість приладу рівна 0,1 від її максимального значення.

Динамічний діапазон лінійності (у децибелах) характеризує область значень променевого потоку Φ (від $\Phi_{МИН}$ до $\Phi_{МАКС}$), в якій енергетична (світлова) характеристика лінійна:

$$\delta = 10 \lg (\Phi_{МАКС} / \Phi_{МИН})$$

Максимум спектральної чутливості – довжина хвилі, яка

відповідає максимуму чутливості приладу.

Струмова чутливість S_I (А/лм або А/Вт) визначає значення фотоструму, створюваного одиничним потоком випромінювання. Іноді замість потоку випромінювання, падаючого на прилад, задають густину падаючого потоку, вимірювану у Вт/см².

Вольтова чутливість S_U характеризує значення сигналу у вольтах, віднесене до одиниці падаючого потоку випромінювання.

Струмову і вольтову чутливість називають *інтегральною*, якщо вона характеризує чутливість до інтегрального потоку випромінювання і *монохроматичною* у разі монохроматичного випромінювання.

Інтегральну струмову і вольтову чутливість обчислюють за формулами:

$$S_I = (I - I_T)/\Phi, \quad S_U = (U - U_T)/\Phi,$$

де I , U , I_T , U_T – загальні і темнові струм і напруга приладу відповідно.

Порогова чутливість фотоприймача характеризується рівнем світлового потоку Φ_{II} , при якому сигнал дорівнює шуму, тобто $I_\Phi = (\langle \Delta I^2 \rangle)^{0,5}$. Оскільки Φ_{II} може залежати від площі S приймача і смуги частот Δf , при оцінюванні здатності фотоприймача реєструвати слабкі світлові потоки використовується приведений пороговий потік $\Phi^*_{II} = \Phi_{II}/(S \cdot \Delta f)^{0,5}$, а також так звана *виявлювальна здатність* $D^* = 1/\Phi^*_{II}$. Значення D^* відносять до довжини хвилі λ_M , що відповідає максимуму спектральної чутливості приймача, до визначеної частоти модуляції світлового потоку і смуги Δf , яка містить f . Отже, D^* має розмірність [Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см]. Зазвичай $\Delta f = 1$ Гц.

Питома виявлювальна здатність D^* характеризує можливість використання приладу для виявлення гранично малих сигналів

$$D^* = \frac{U_\Phi \sqrt{\Delta f \cdot S}}{U_{III} \cdot \Phi},$$

де U_Φ – напруга фотосигналу; U_{III} – напруга шуму приладу, Δf – частотна смуга пропускання; S – площа чутливої площадки.

Порогова чутливість $P_{\text{ПОР}}$ визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал рівний шуму. Порогова чутливість і виявлювальна здатність зв'язані співвідношенням

$$P_{\text{ПОР}} = \frac{\sqrt{S}}{D^*} .$$

Інерційність приладу характеризують *постійні часу* наростання τ_1 та спаду τ_2 фотовідгуку при імпульсі випромінювання. Вони визначають граничне значення робочої частоти модуляції світлового потоку, при яких ще не помітно зменшення фотовідгуку. Звичайно $\tau_1 < \tau_2$. При синусоїдальній модуляції світлового потоку швидкодію приладів характеризують граничною частотою, на якій фотовідгук зменшується до рівня 0,7 стаціонарного значення.

Методика проведення експерименту Опис схем вимірювання

Для дослідження вольтамперних та динамічних характеристик фоторезистора при різних рівнях освітлення використовується схема, зображена на рис. 7.

Від джерела живлення через подільник R на фоторезистор R_x подається напруга, яка вимірюється цифровим вольтметром 2а. Послідовно з фоторезистором включені амперметр А та резистор опором R_0 , причому в процесі вимірювань завжди має виконуватись умова $R_x \gg R_0$. В цьому випадку можна вважати, що вся напруга U_0 падає на фоторезисторі. Спад напруги U_1 на резисторі R_0 , який вимірюється вольтметром 2б, пропорційний струмові через послідовно з'єднані R_x та R_0 , отже

$$I = \frac{U_0}{R_x} = \frac{U_1}{R_0} \quad \text{і} \quad R_x = \frac{U_0}{I} = \frac{U_0}{U_1} R_0. \quad (9)$$

Біля фоторезистора розташований первинний перетворювач люкметра. Освітленість можна змінювати нейтральними світлофільтрами, або перекриваючи світловий потік цупким папером. Для дослідження динамічних характеристик фоторезистора використовується механічний модулятор світлового потоку М та електронний осцилограф 5, який під'єднується до

резистора R_0 і, отже, реєструє сигнал пропорційний струму через фоторезистор.

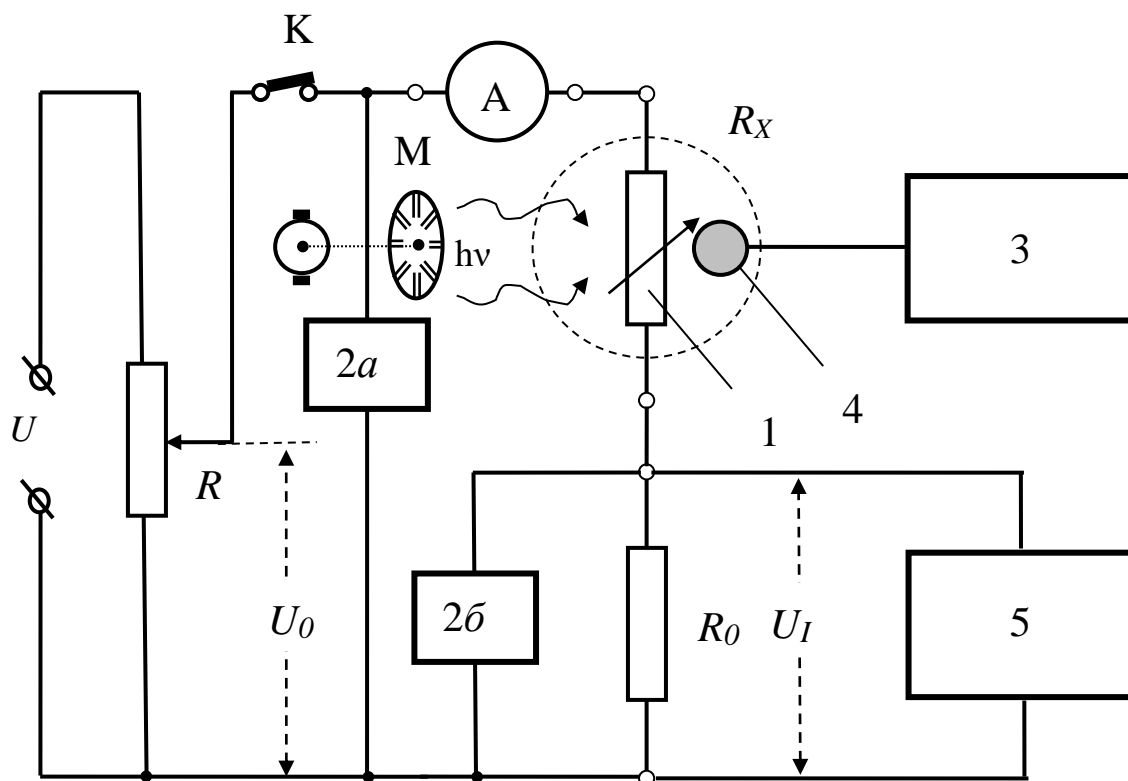


Рис. 7. Схема для дослідження параметрів фоторезистора: 1 – фоторезистор, 2 – мультиметри (цифрові вольтметри), 3 – люксметр з виносним первинним перетворювачем 4, 5 – осцилограф, М – механічний модулятор світла, А – амперметр.

Дослідження параметрів фотодіода проводиться за допомогою подібної схеми (рис. 8) в двох режимах – фотодіодному (ключ К замкнутий) та фотовольтаїчному, тобто вентильному (ключ К розімкнутий). У фотодіодному режимі коло містить джерело живлення, яке створює зворотне зміщення $p-n$ -переходу фотодіода. При освітленні фотодіода в області $p-n$ -переходу виникають надлишкові носії заряду, які приводять до зростання зворотного струму фотодіода на величину фотоструму. Фотострум в широкому інтервалі лінійно залежить від інтенсивності падаючого випромінювання і практично не залежить від величини зворотної напруги. У вентильному режимі

фотодіод використовується як фотоелемент для одержання фотоЕРС.

Для дослідження спектральних характеристик використовується призмовий монохроматор УМ-2, світло із вихідної щілини якого попадає на приймальну площадку фоторезистора або фотодіода (рис. 9).

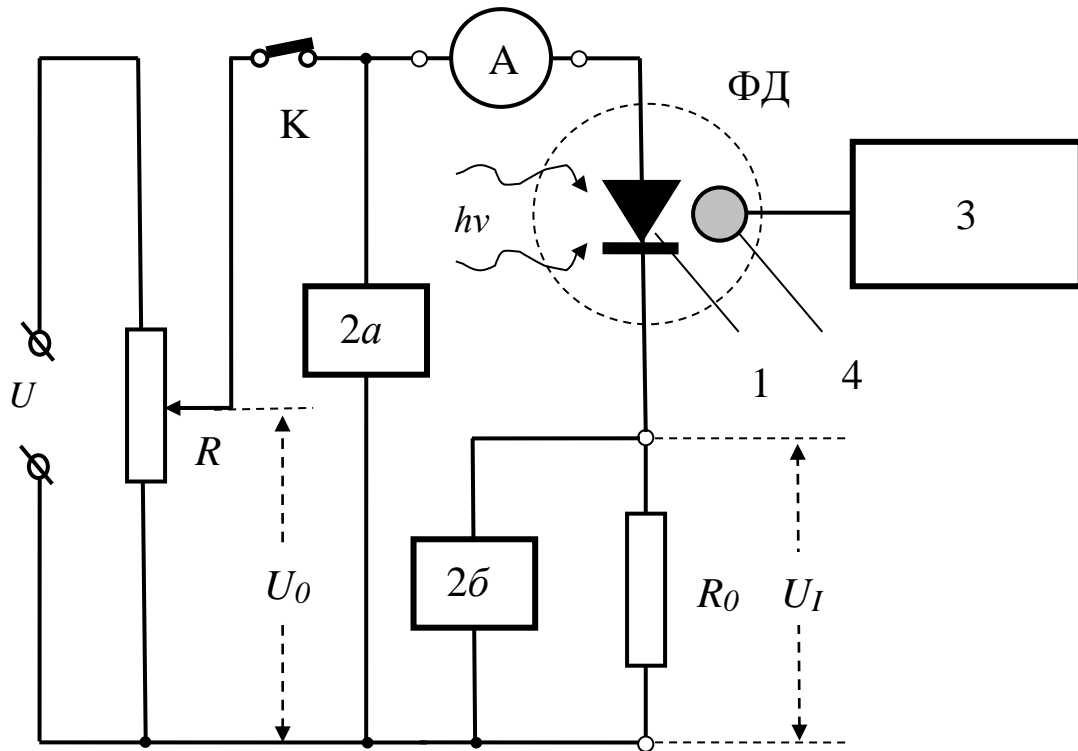


Рис. 8. Схеми для дослідження параметрів фотодіода (позначення аналогічні до рис. 7).

Довжина світлової хвилі на вихідній щілині змінюється поворотом барабана 4 монохроматора 3. При цьому для встановлення відповідності між кутом повороту барабана і довжиною хвилі на вихідній щілині використовується індивідуальна крива градуювання монохроматора. На вхідну щілину монохроматора падає світловий потік від спектральної лампи розжарення 5, яка живиться від спеціального блоку 6 і має калібровану спектральну густину випромінювання. Для лампи із вольфрамовою ниткою розжарення, температура якої 2850К, спектральна густина випромінювання приведена на рис.10

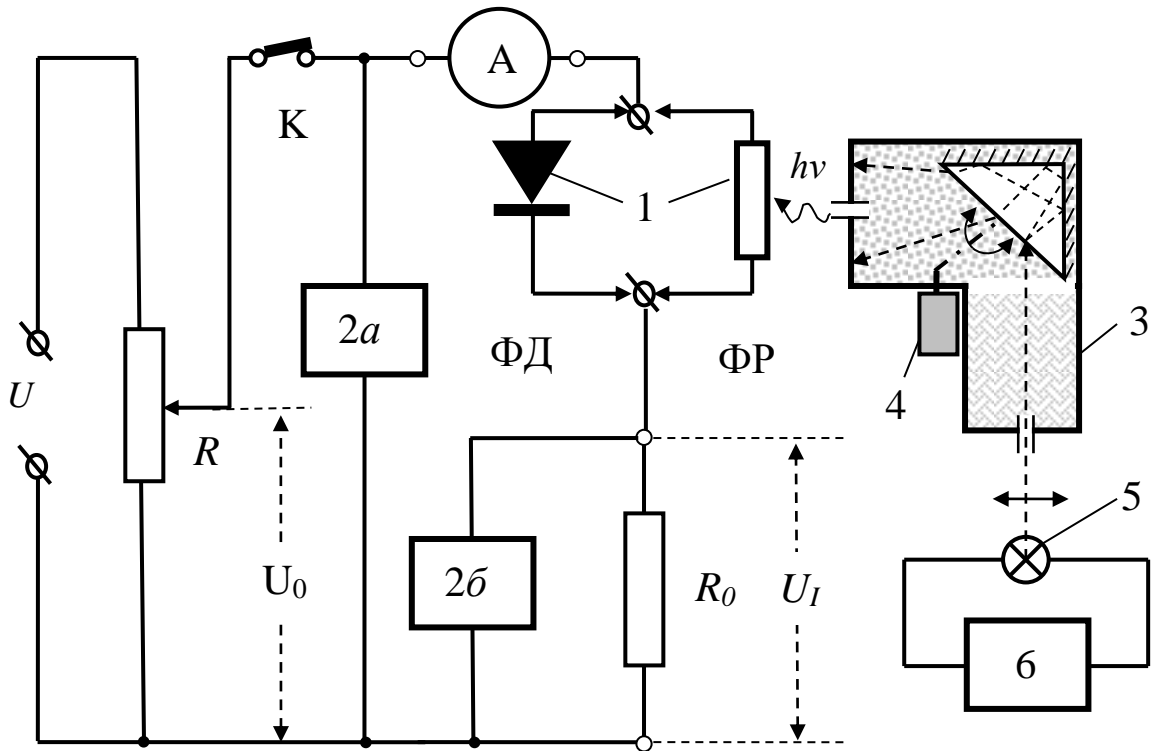


Рис. 9. Схема для дослідження спектральних характеристик фоторезистора і фотодіода: 3 – монохроматор, 5 – лампа розжарення з блоком живлення 6. (Інші позначення аналогічні до рис.7)

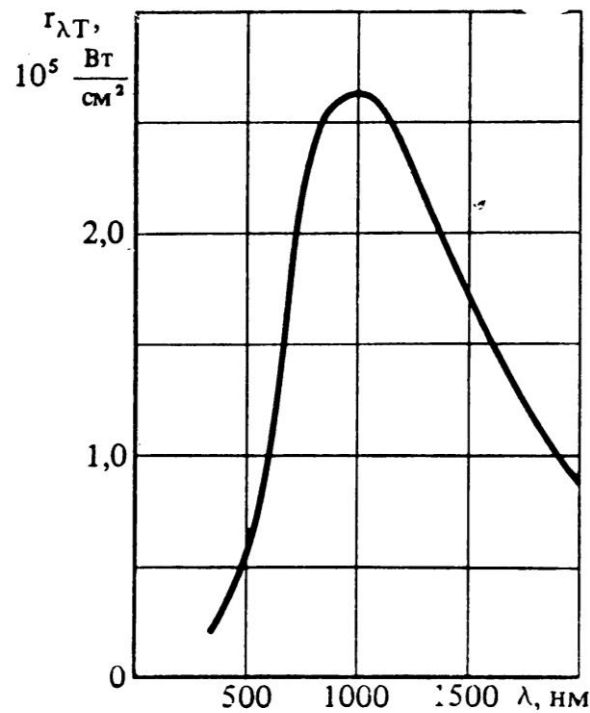


Рис. 10. Спектральна густина випромінювання для лампи із вольфрамовою ниткою розжарення, температура якої 2850 К.

Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Дослідження вольтамперних характеристик фоторезистора.

1. Підключити фоторезистор до схеми, яка зображена на рис. 7. Резистор R_0 підібрати таким чином, щоб $R_0 \ll R_X$, однак спад напруги на ньому повинен бути достатнім для надійної реєстрації. Включити блок живлення та мультиметри. На блоці живлення виставити напругу, яка максимально допустима для досліджуваного фоторезистора (згідно його паспорта або за даними довідника).

2. Переміщаючи повзунок резистора R , зняти вольтамперну характеристику (ВАХ) фоторезистора у відсутності його освітлення. За тангенсом кута нахилу одержаної ВАХ визначити темновий опір фоторезистора R_T .

3. Виконати пункт 2 цього завдання при різних рівнях освітлення фоторезистора, в тому числі і при 200 лк, визначити опір фоторезистора при різній освітленості та коефіцієнт кратності зміни опору R_T/R_{200} .

4. При кількох значеннях напруги U_0 на фоторезисторі дослідити його енергетичну характеристику, тобто залежність фотоструму від освітленості. Побудувати залежність опору фоторезистора та його провідності від освітлення. Визначити інтегральну чутливість фоторезистора, зробити висновки.

Завдання 2. Дослідження динамічних характеристик фоторезистора.

1. Задати напругу живлення U_0 в межах 60 – 80 % від максимально допустимої для досліджуваного фоторезистора. Включити механічний модулятор інтенсивності світлового потоку.

2. Подати напругу U_1 на вхід осцилографа та добитись чіткої синхронізації імпульсів фотоструму. Зарисувати одержані осцилограми та визначити, як показано на рис. 5, б, час наростання τ_1 та спаду τ_2 фотоструму.

3. Виконати пункт 2 цього завдання при різних рівнях освітлення фоторезистора.

Завдання 3. Дослідження характеристик фотодіода.

1. Зібрати схему, показану на рис. 8. Ключ К встановити у розімкнуте положення. Змінюючи рівень освітлення фотодіода, дослідити залежність фото-ЕРС від освітленості приймальної площадки фотодіода.

2. Замкнути ключ К та зняти вольтамперну характеристику фотодіода при різних рівнях освітлення. При кількох значеннях зворотної напруги дослідити залежність зворотного струму від рівня освітлення.

3. Побудувати графіки залежності фото-ЕРС у вентильному режимі від рівня освітлення, вольтамперні характеристики діода при різних рівнях освітлення та залежність зворотного струму фотодіода від освітленості. Визначити інтегральну чутливість фотодіода у вентильному та фотодіодному режимах.

Завдання 4. Дослідження спектральних характеристик фоторезистора та фотодіода.

1. Перед початком роботи впевнитися, що вхідна щілина монохроматора закрита. Включити джерело світла – еталонну лампу з відомою температурою розжарення вольфрамової нитки 2850 К. За допомогою лінз добитися рівномірного освітлення вхідної щілини монохроматора. Включити живлення фотоприймача.

2. Підібрати робочу ширину щілин. Для цього розкрити вхідну та вихідну щілини до ширини 1 мм. Повертаючи барабан 4 монохроматора у всьому інтервалі його ходу провести спостереження за струмом фотоприймача. Якщо струм фотоприймача, визначений за допомогою мікроамперметра або за формулою 9 з використанням мультиметра 2б, більший його допустимого значення, зменшити ширину щілин до однакового значення. Знайти положення барабана монохроматора, яке відповідає максимальному струму фотоприймача. Підібрати ширину вхідної і вихідної щілин монохроматора такими, щоб максимальний струм фотоприймача становив не менше $2/3$ діапазону вимірювань.

3. Встановити область чутливості фотоприймача. Для цього повертаючи барабан монохроматора в одну і другу сторону від положення, яке відповідає максимальному струму фото-

приймача, відмітити положення барабана, де струм зменшується в межах точності до значення темного струму (значення останнього визначається при перекриванні світлового потоку від лампи розжарення).

4. В області чутливості фотоприймача виділити 20 – 25 точок (за шкалою барабана монохроматора), в кожній із яких виміряти струм фотоприймача. За графіками градування монохроматора $N = f_1(\lambda)$ та $D = f_2(\lambda)$, які приведені в інструкції до монохроматора, поставити у відповідність кожній поділці N барабана довжину хвилі світла λ та лінійну дисперсію D монохроматора. Результати оформити у вигляді таблиці.

5. Для кожної довжини хвилі λ , визначеної в п.4 цього завдання, розрахувати енергію (в еВ) кванту світла $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$. Використовуючи співвідношення для лінійної дисперсії $D = \Delta l / \Delta \lambda$, визначити інтервал довжин хвиль $\Delta \lambda = \Delta l \cdot D$, який відповідає ширині вихідної щілини Δl в кожній точці спостереження. Використовуючи спектральну енергетичну світність $r_{\lambda T}$ розжареної вольфрамової нитки (рис. 10), за формулою $\Delta W = r_{\lambda T} \cdot \Delta \lambda$ визначити спектральну густину потоку випромінювання – енергію яка випромінюється за 1с з 1 см² розжареного вольфраму в інтервалі $\Delta \lambda$ (Вт/см²). Визначити число квантів світла $N = \Delta W / \varepsilon$ та відносне число квантів N/N_{MAX} для кожної із вибраних точок спостереження (N_{MAX} відповідає довжині хвилі для максимального значення фотоструму).

6. Визначити спектральний розподіл фотоструму віднесений до рівного числа падаючих на приймальну поверхню фотоприймача квантів світла $i_{\Phi} = I_{\Phi} / (N/N_{MAX}) = (I - I_T) / (N/N_{MAX})$. Розрахувати відносну спектральну чутливість $S_{ВІДН} = i_{\Phi} / i_{\Phi MAX}$. Побудувати графік $S_{ВІДН} = f(\varepsilon)$. Оцінити ширину забороненої зони напівпровідникового матеріалу фотоприймача.

Завдання 5. Дослідження волоконнооптичного сенсора концентрації розчину.

Вивчення поведінки і властивостей різноманітних багатокомпонентних розчинів, зокрема їх густини і концентрації, є актуальною задачею особливо при необхідності неперервного контролю характеристик. Одним із оптичних параметрів

середовища, який містить інформацію про його густину є показник заломлення. В даній лабораторній роботі визначення концентрації засноване на зміні коефіцієнту відбивання на межі двох середовищ, одним із яких є оптичне волокно, а іншим – досліджуваний розчин. Для збільшення чутливості використано явище повного внутрішнього відбивання. Схема волоконно-оптичного сенсора представлена на рис. 11.

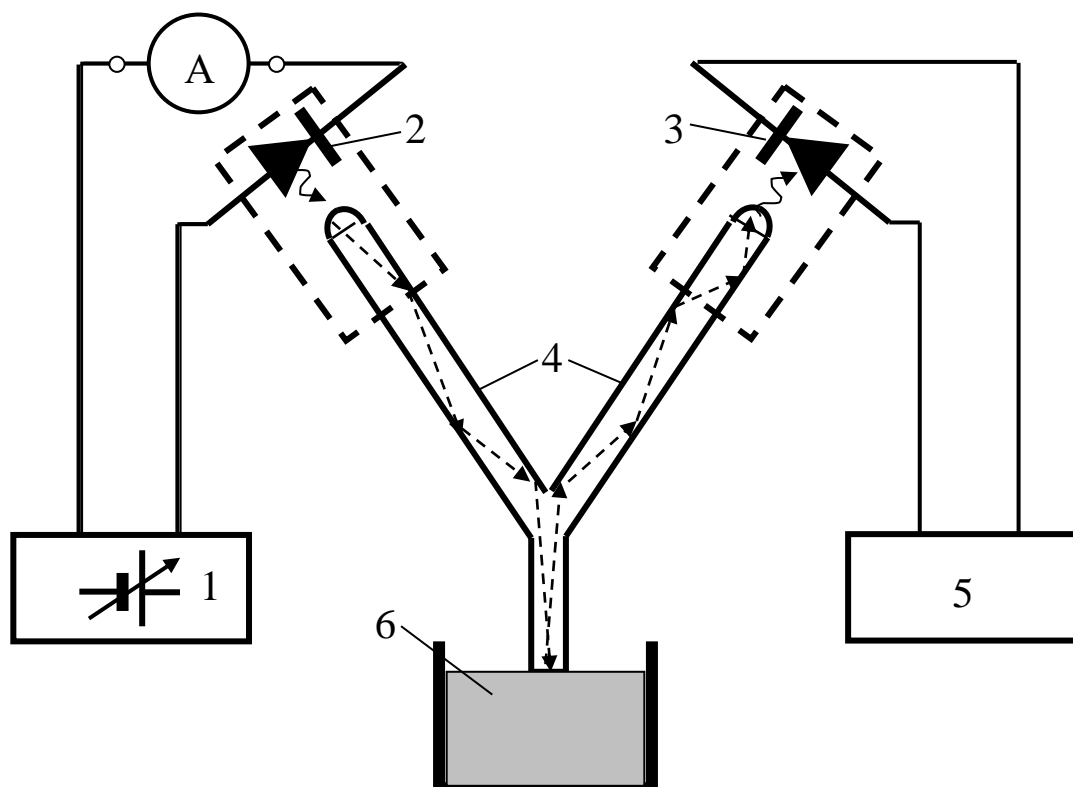


Рис. 11. Схема волоконно-оптичного сенсора концентрації розчину: 1 – джерело живлення, 2 – світлодіод, 3 – фотодіод, 4 – оптичне волокно, 5 – мілівольтметр, 6 – кювета з розчином.

Джерелом світла служить світлодіод 2, струм через який вимірюється міліамперметром А і може змінюватись за допомогою джерела напруги 1. Світлова хвиля, зазнаючи повного внутрішнього відбивання поширюється вздовж оптического волокна 4 спеціальної форми (Y-розгалужувач), відбивається від його торця і попадає на фотодіод 3. Фото-ЕРС, яка виникає у фотодіоді, вимірюється мілівольтметром 5. Торць оптического волокна дотикається до поверхні досліджуваного розчину,

налитого у кювету 6. При цьому коефіцієнт відбивання на межі оптичне волокно – розчин визначається формулою (1), де під n слід розуміти відносний показник заломлення розчину та матеріалу оптичного волокна $n = n_p/n_B$, де n_p – показник заломлення розчину, який є функцією його концентрації, n_B – показник заломлення матеріалу оптичного волокна. Як слідує з (1) при зміні n_p буде змінюватись інтенсивність світла, а отже, і фото-ЕРС діода 3.

Дослідження волоконнооптичного сенсора концентрації розчину проводиться згідно таких пунктів:

1. Виготовити концентрації розчинів кухонної солі, цукру або іншої речовини, розрахувавши масові долі розчинника і розчиненої речовини для одержання заданих викладачем молярної та об'ємної концентрації розчину.

2. Зняти залежність вихідної напруги (фото-ЕРС) волоконно-оптичного сенсора від концентрації розчину при різних значеннях струму через світлодіод. Визначити чутливість сенсора.

3. Визначити залежність відносної зміни вихідної напруги сенсора від концентрації розчину при різних струмах живлення світлодіода, побудувати відповідні графіки.

4. Вибрати оптимальний режим роботи сенсора, зробити висновки.

Лабораторна робота № 6

Вивчення роботи і дослідження характеристик напівпровідникового сенсора токсичних газів

Мета роботи: Дослідити роботу та визначити характеристики сенсора газоподібного аміаку (NH_3) при різних режимах роботи.

Теоретичні відомості

В останні роки велика увага приділяється захисту населення від техногенних катастроф, зокрема від витоку паливних газів, які є джерелом вибуху, а також появи токсичних газів у закритих приміщеннях, що може призвести до смертельних випадків.

Елементною базою сигналізаторів наявності таких газів є напівпровідникові газові сенсори, які перетворюють значення концентрації газу в оточуючому середовищі безпосередньо у вихідний електричний сигнал.

Відомо, що різні хімічно невзаємодіючі гази можуть змішуватись у довільних відношеннях і представляють собою гомогенні суміші. Для їх характеристики використовують вагову, молярну та об'ємну концентрації.

Ваговою або масовою концентрацією i -го газу n_{Mi} , що входить до складу суміші, називається відношення його маси M_i до маси всієї суміші M :

$$n_{Mi} = \frac{M_i}{M} = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^N M_j}, \quad (1)$$

де N – загальна кількість типів газів, що утворюють суміш.

Молярною концентрацією i -того газу $n_{\mu i}$ називається відношення кількості молей цього газу до кількості молей всіх газів у суміші:

$$n_{\mu i} = \frac{v_i}{v} = \frac{\frac{M_i}{\mu_i}}{\sum_{j=1}^N \frac{M_j}{\mu_j}}, \quad (2)$$

де M_i – маса, μ_i – молекулярна вага i – го газу.

Часто для характеристики суміші газів використовується вимірювання їх концентрація у відсотках або в мільйонних частках (міжнародне позначення – ppm): $1 \text{ ppm} = 10^{-6} = 10^{-4} \%$.

Вимірювання концентрації газів у суміші ґрунтується на понятті парціального тиску. Парціальним тиском i -того газу p_i в суміші називається тиск, під який чинив би цей газ, якби з суміші були вилучені всі інші гази, а об'єм та температура залишилися сталими:

$$p_i = \frac{M_i RT}{\mu_i V}, \quad (3)$$

де V та T – відповідно, об'єм та температура суміші; R – універсальна газова стала. Парціальним об'ємом V_i i -того газу в суміші називають об'єм, який мав би цей газ, якщо всі інші гази вилучити, а тиск p та температуру T залишити сталими. Відповідно об'ємна концентрація газу

$$n_V = \frac{V_i}{V}. \quad (4)$$

Функціонування сенсорів газу ґрунтується на електрохімічних, термохімічних, калориметричних, спектроскопічних та інших методах контролю. Для їх виготовлення найчастіше використовуються напівпровідникові матеріали.

Сенсори газу можуть бути побудовані на основі як традиційних напівпровідникових елементів (резисторів, діодів, МДН-пристроїв), так і нетрадиційних – у вигляді первинних перетворювачів у складі гібридних структур (пристрої на поверхневих акустичних хвилях, оптичні сенсори), їх можна класифікувати, наприклад, за характером зміни поверхневих або об'ємних властивостей меж розділу середовище-напівпровідник, середовище-діелектрик і середовище-метал в залежності від

концентрації аналізованої компоненти. Однак, така класифікація не охоплює всієї різноманітності газових сенсорів, зокрема тих, в яких не використовуються напівпровідникові матеріали. Другий підхід, який розглядає сенсори як низку компонентів (резистор, конденсатор, діод, транзистор, оптрон тощо), дає змогу систематизувати не тільки власне сенсори, але й схеми первинної обробки сигналу, що особливо важливо при створенні багатофункціональних приладів. Доцільніше проводити класифікацію відповідно до фізико-хімічної природи процесів, які спостерігаються в структурі сенсора. Найбільш поширеними є сенсори резистивного типу. Для таких сенсорів як чутливий матеріал застосовують SnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , WO_3 , Co_3O_4 , тобто оксиди металів. На поверхні цих напівпровідників при хемосорбції кисню виникає локальний заряд, утворений захопленими електронами, що призводить до збіднення або збагачення носіями заряду приповерхневої області напівпровідника. Відповідно, його повна провідність, в якій домінуючу роль відіграє поверхнева компонента, суттєво змінюється. Коли ж сорбується другий аналізований газ, який каталітично взаємодіє з хемосорбованим киснем або витісняє його, то провідність приповерхневої області напівпровідника збільшується або зменшується в залежності від типу напівпровідника і природи адсорбованих газів. Швидкість цих процесів та їх зворотність залежать від температури, яка, як правило, становить близько кількох сотень градусів.

Існують різні точки зору на механізм провідності напівпровідникових матеріалів при адсорбції газів на їх поверхні, але більшість вчених притримуються думки про те, що найбільш ймовірним є механізми, пов'язані з хімічними і фазовими змінами на поверхні розділу – міжфазних і внутрішньофазних границях. Вибір у якості об'єкту досліджень омічної провідності обумовлений перш за все традиційністю експериментального методу досліджень адсорбційно-каталітичних процесів шляхом аналізу відповідних змін електропровідності напівпровідникового матеріалу.

Нагадаємо, що адсорбція – це процес, в якому частинки однієї речовини зв'язуються на поверхні іншої речовини,

причому речовина, яка зв'язується на межі фаз, називається адсорбатом, а поверхня речовини, на якій відбувається цей процес – адсорбентом. Явище адсорбції відбувається в результаті існування незрівноважених сил на поверхні адсорбенту, що з'являються в результаті недонасичення зв'язків у кристалічній ґратці. Розрізняють два типи адсорбції – фізичну і хімічну. Відмінність між ними пояснюється типом зв'язків між реагуючими речовинами. Якщо в результаті реакції з'являються хімічні зв'язки, то маємо справу з хемосорбцією, в протилежному випадку – якщо зв'язок на поверхні адсорбенту є типу Ван-дер-Ваальса – спостерігається фізична адсорбція.

Адсорбція продовжується доти, поки між поверхнею і газовою фазою не встановиться рівновага. У загальному вигляді взаємодію газу з поверхнею напівпровідника можна поділити на такі, пов'язані між собою, стадії:

- фізичної адсорбції, зумовленої силами електростатичного походження. Енергія зв'язку адсорбованої молекули з поверхнею твердого тіла становить 0,01– 0,1 еВ;

- хімічної адсорбції (хемосорбції), зумовленої ковалентними силами, що призводять до хімічного зв'язку молекули з твердим тілом. Енергія зв'язку при цьому досягає декількох еВ;

- зміні внаслідок цих процесів поверхневих та (або) об'ємних електрофізичних властивостей напівпровідника (потенціального бар'єра, контактної різниці потенціалів, роботи виходу, поверхневої та об'ємної електропровідності тощо).

Адсорбція значною мірою залежить від температури, тому для отримання якісної картини явища адсорбції слід вивчити такі характеристики:

- кількість речовини, адсорбованої в стані рівноваги;
- температурні залежності процесу адсорбції;
- кінетику процесу адсорбції.

Розглянемо схематично процес роботи сенсора на основі напівпровідника *n* типу (рис. 1, рис. 2). При внесенні напівпровідника з атомарно чистою поверхнею (рис. 1, *a*) в атмосферу повітря на першому етапі проходить адсорбція кисню, із яким зв'язуються електрони. Негативні поверхневі заряди, які виникають при цьому, викликають у зонній моделі вигин зон доверху, що викликає збіднення приповерхневої області

рухомими носіями заряду (рис. 1, б) і, відповідно, збільшення поверхневого опору (рис. 2, ділянка 1–2). Далі може відбуватись деяке зменшення опору поверхневого шару за рахунок адсорбції молекул води (рис. 2, ділянка 2–3) або його зростання (рис. 2, ділянка 3–4), пов'язане з наявністю у суміші домішкових газів. В решті-решт наступить стійкий стан (рис. 2, ділянка 4), при якому поверхня напівпровідника знаходиться в стані динамічної рівноваги (рис. 1, в) із атмосферою, що її оточує.

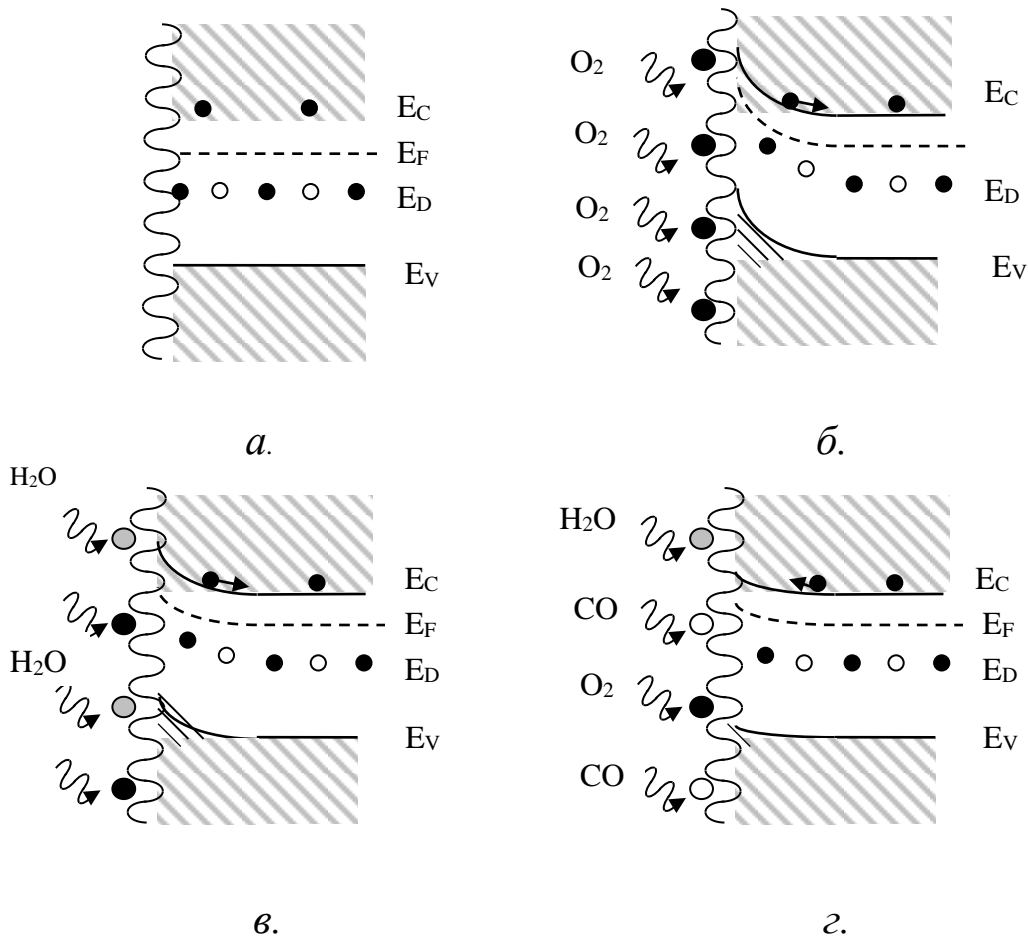


Рис. 1. Адсорбція газів на поверхні напівпровідника *n*-типу.

Поява в газовій суміші нового газу, наприклад газу-відновника CO , призводить до часткового витіснення адсорбованого поверхнею кисню, а отже і зменшення негативного поверхневого заряду і, як наслідок, зменшення вигину зон напівпровідника (рис. 1, г). Це в свою чергу сприятиме притоку вільних носіїв заряду до поверхні, і, отже, до зменшення поверхневого опору (рис. 2, ділянка б). У випадку адсорбції акцепторного газу вигин зон збільшиться і, відповідно, опір

поверхні напівпровідника зростатиме (рис. 2, ділянка 5).

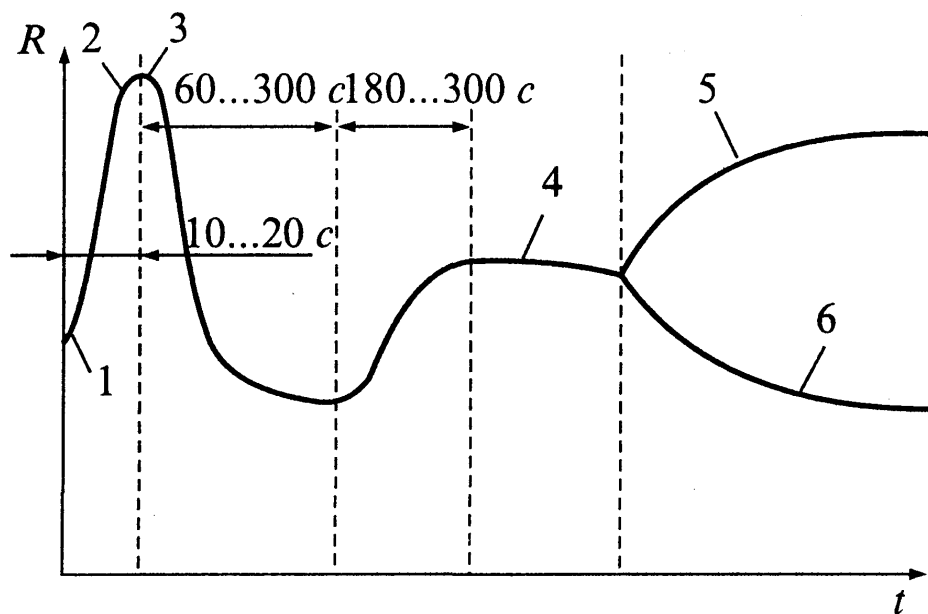


Рис. 2. Зміна опору поверхневого шару напівпровідника при адсорбції.

Об'єктом багатьох наукових досліджень в галузі напівпровідникових газових сенсорів є полікристалічний двоокис олова, який є основним матеріалом газочутливого шару сенсора практично у всіх провідних фірмах. Технологічні дослідження в області SnO_2 -сенсорів пов'язані, в основному, з дослідженням формування структури чутливого елемента при різних режимах його отримання і впливу отриманих характеристик на метрологію сенсора. Залежно від того, за якою технологією виготовлений полікристалічний SnO_2 , можливі як різні механізми його електропровідності, так і, природно, різні механізми й закономірності адсорбції газів на його поверхні. Особливості кожної з цих технологій дають змогу отримувати газочутливі шари SnO_2 з різними характеристиками за опорами і за чутливостями до різних газів.

Спечені полікристалічні напівпровідники, які використовуються в якості газочутливого шару, можна умовно розбити на дві групи, які відрізняються за властивостями контактів між монокристалами. До першої групи відносяться ті полікристалічні адсорбенти, в яких контакти між кристалами можуть бути

представленні у вигляді подвійного бар'єру Шоткі або, у більш загальному випадку, ізотипного гетеропереходу (рис. 3, а). Такі контакти властиві насипним, спресованим або намазаним полікристалічним адсорбентам, які не підлягали високо-температурній обробці, а також у певній мірі й полікристалам, спеченим в окислювальному середовищі. До другої групи відносяться полікристалічні напівпровідники, в яких контакти між окремими кристалами характеризуються наявністю тонких з'єднувальних мостиків (рис. 3, б). Залежно від таких параметрів, як товщина мостика, ступінь легування матеріалу, а точніше, концентрація дефектів у мостиках, величина поверхневого заряду, локалізованого на поверхневих рівнях, вказані мостики можуть бути або не бути бар'єрами для руху носіїв струму у напівпровіднику.

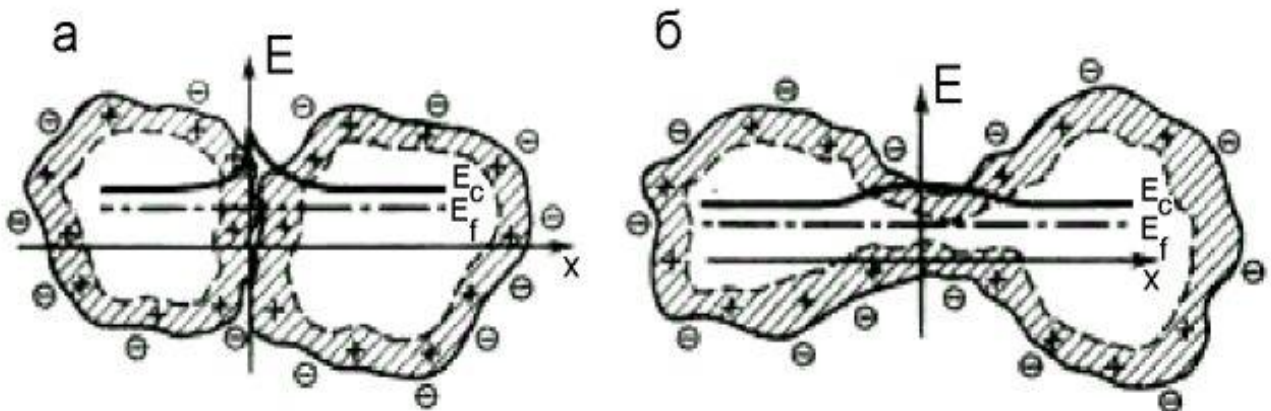


Рис. 3. Міжкристалітні контакти бар'єрного (а) та місткового (б) типів.

Обидві ці ситуації проілюстровані на рисунку 4. Перший випадок, який характеризується наявністю високого енергетичного бар'єру, пов'язаний з перекриттям областей збіднення, що обумовлено малою товщиною мостика ($h < 2L_D$, L_D – довжина екранування) і значною величиною поверхневого заряду. У другому випадку такого перекриття нема, і бар'єр для протікання струму не виникає. Мостики, які характеризуються наявністю енергетичного бар'єру, вищого за теплову енергію

носіїв kT , називаються мостиками закритого типу, а ті, які не мають бар'єру, – мостиками відкритого типу.

На рис. 5 представлено запропоноване Хатсоном зображення поперечного перерізу фрагменту спеченого зразка. Заштрихована область представляє собою область просторового заряду (ОПЗ).

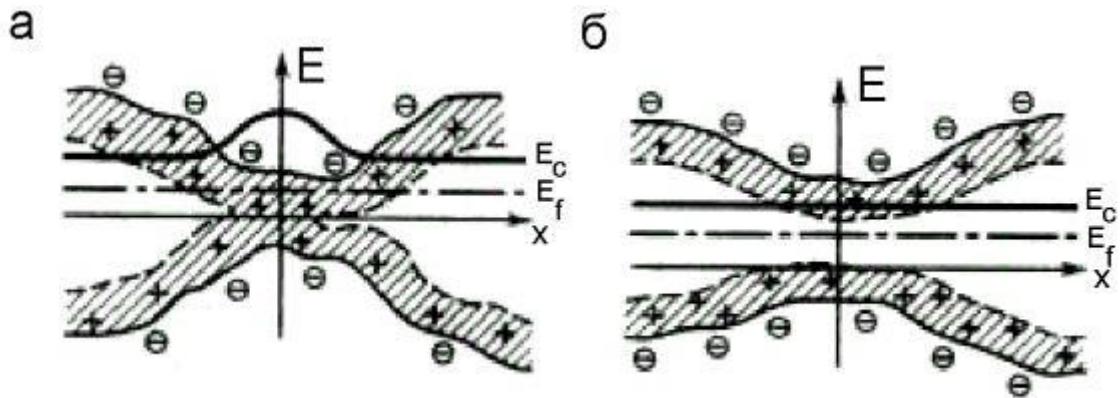


Рис. 4. Мостики закритого (а) та відкритого (б) типів.

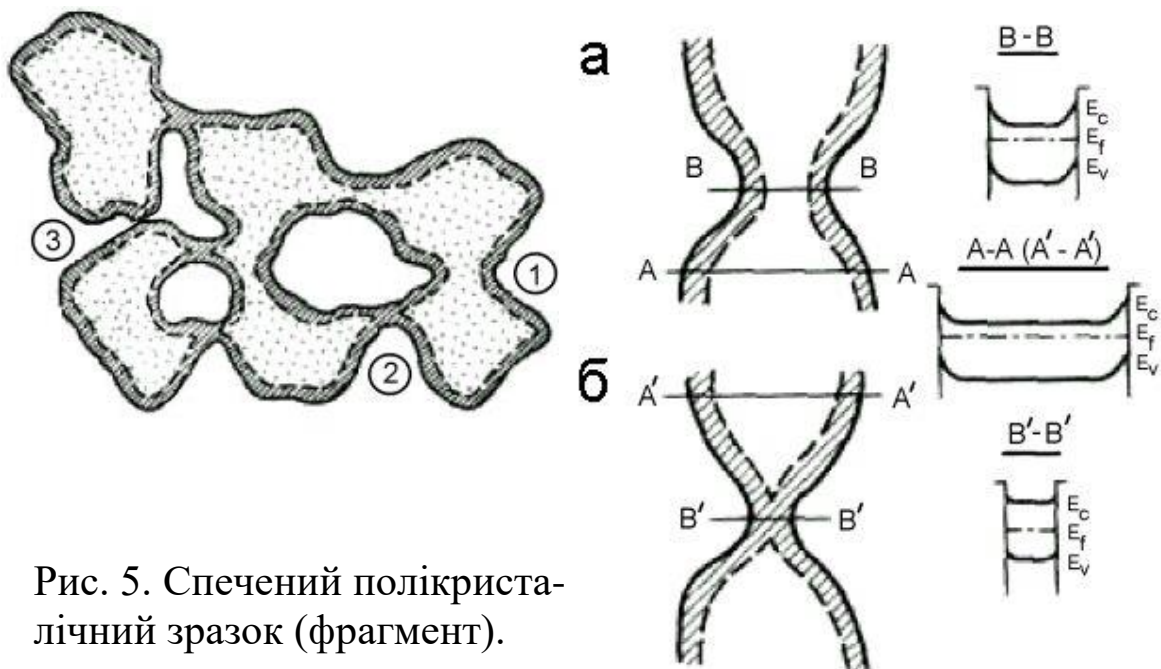


Рис. 5. Спечений полікристалічний зразок (фрагмент).

Рис. 6. Енергетична діаграма мостиків відкритого (а) та закритого (б) типів.

Як видно з рисунку, окремі мікрочастинки або з'єднані тонкими мостиками, які утворюються в результаті спікання (контакти 1 і 2), або просто торкаються один одного (контакт 3). На рисунку 6 представлені можливі типи вказаних мостиків у збільшеному вигляді та зображені зонні діаграми для поперечних перерізів. При цьому припускається існування апріорної приповерхневої області збідненої основними носіями заряду – електронами провідності для напівпровідника *n*-типу. Цілком очевидно, що мостик, зображений на рис. 6, а, є мостиком відкритого типу, а зображений на рис. 6, б – закритого типу. Енергетична діаграма перерізу В'-В' для мостика закритого типу ілюструє ефект утворення плоских зон, які властиві найбільш тонким мостикам і які обумовлюють існування високого енергетичного бар'єру по всій товщині мостика для переносу електронів провідності між сусідніми мікрочастинками (рис. 4, а).

У тому випадку, коли у матеріалі переважають мостики закритого типу, саме вони і визначають опір усього зразка, і практично все падіння зовнішньої напруги, що прикладається до зразка, відбувається на цих мостиках. Оскільки положення рівня Фермі відносно дна зони провідності у мостикі закритого типу визначається головним чином величиною поверхневого заряду, то і зміна електропровідності такого матеріалу, що спостерігається при змінах зовнішніх умов (адсорбції, зміні температури, тощо), цілком визначається зміною величини поверхневого заряду. Енергію активації провідності такого матеріалу зазвичай зіставляють з теплотою адсорбції частинок, які відповідальні за величину поверхневого заряду, а саму провідність такого типу називають електропровідністю, обмеженою поверхневими станами.

У випадку, коли у матеріалі переважають мостики відкритого типу, а точніше, є достатня кількість неперервних шляхів, що пронизують весь зразок, енергія активації провідності пов'язується з енергією іонізації об'ємної донорної домішки, а сама провідність називається електропровідністю, обмеженою об'ємними пастками. Провідність окремого мостика у цьому випадку пропорційна товщині провідного каналу $h - 2L^*$ де h – товщина містка, яка складає величину порядку 10% від розміру

мікрокристала, L^* – ширина області просторового заряду сумірного з довжиною екранування L_D . Вплив адсорбції та інших зовнішніх факторів, які приводять до зміни величини поверхневого заряду, змінює й ширину області збіднення, що безпосередньо відображається на ширині провідного каналу i , отже, на величині опору мостика.

Контакти третього типу (рис. 5), які представляють собою місця дотику окремих мікрокристалів, еквівалентні подвійним бар'ерам Шоткі або, що більш правильно, ізотипним гетеропереходам. Енергія активації електропровідності матеріалу з переважаючою долею контактів такого типу визначається висотами міжкристалітних бар'ерів, а зміна електропровідності під дією різних зовнішніх впливів, зокрема адсорбції, пов'язана зі зміною висоти цих бар'ерів.

У реальних полікристалічних матеріалах наявні всі три вказані типи контактів. Переважання того чи іншого типу контактів пов'язане з технологією приготування зразка і з наступною його обробкою. Більше того, існують різні технологічні прийоми, що дозволяють переводити зразки одного типу, тобто зразки з переважанням певного сорту контактів, в інший тип.

Залежно від того, за якою технологією виготовлений полікристалічний напівпровідник, можливі як різні механізми його електропровідності, так і, природно, різні механізми й закономірності адсорбційної зміни величини його електропровідності.

При адсорбції на поверхні оксидів металів з електронною провідністю, таких як SnO_2 , ZnO , TiO_2 , акцепторних частинок (O_2 , Cl_2 , Br_2) електропровідність їх різко зменшується, а при адсорбції донорних частинок (H_2 , CO , NH_3) – значно збільшується. Вплив адсорбції на електропровідність напівпровідникових оксидів з дірковою провідністю, таких як NiO , Cu_2O , In_2O_3 , має протилежний характер.

У випадку частково відновленого оксиду, який характеризується значною нестехіометричністю складу і відсутністю енергетичних бар'ерів у більшій частині місць

контактів мікрокристалів, електропровідність обумовлена іонізацією об'ємних донорів – надстехіометричного металу (міжвузільних атомів металу або кисневих вакансій). Ефект адсорбційної зміни електропровідності таких напівпровідників може бути обумовлений або зарядженням поверхні, що приводить до зміни ширини провідного каналу, або зміною концентрації електрично активних дефектів, які відповідають за домішкову електропровідність, або одночасним проявленням цих механізмів.

У випадку окисленого при високій температурі полікристалічного напівпровідника, який характеризується практично стехіометричним складом поверхні, електропровідність пов'язана з подоланням носіями струму високих міжкристалітних бар'єрів. Вплив адсорбції на електропровідність такого роду напівпровідників проявляється головним чином через зміну висот міжкристалітних бар'єрів, які визначаються величиною поверхневого заряду.

Оксиди різних металів, які використовуються в якості робочих елементів газових сенсорів, зазвичай представляють собою полікристалічні матеріали, які мають аномально високу чутливість електропровідності до адсорбції різних газів, яка в більшості випадків викликає зміну висоти міжгранульних бар'єрів за рахунок хемосорбційної зміни величини поверхневого заряду мікрокристалів.

Однак не менш важливу роль у цих процесах відіграє наявність у реальних полікристалічних оксидів широкого розкиду висот цих бар'єрів, обумовленого варіаціями розмірів і форм мікрокристалів, випадковими законами розподілу дефектів і домішок на поверхнях і в об'ємах мікрокристалів і, нарешті, випадковою кристалографічною орієнтацією граней у місцях контактів кристалів.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що розробка кожного нового типу газового сенсора (навіть при уніфікованості конструкції) потребує проведення великого комплексу робіт не тільки по вибору оптимального основного матеріалу та домішок, але й по відпрацюванню технологічних

прийомів виготовлення саме газочутливого матеріалу, структура якого визначає параметри сенсора і формується режимом та послідовністю технологічних операцій, способами одержання вихідних матеріалів, дисперсністю порошкової суміші та багатьма іншими факторами.

Конструкція адсорбційно-чутливого елементу

Для дослідження газового сенсора використано адсорбційно-чутливий елемент (АЧЕ), газочутливий шар якого виготовлений з полікристалічного SnO_2 з добавкою 2% Pd. Дослідні зразки АЧЕ були одержані в лабораторії № 2 СКБ Засобів Аналітичної Техніки м. Ужгорода.

Конструктивно досліджуваний АЧЕ складається із діелектричної підкладки, нагрівника, газочутливого елементу і електродів (рис. 7).

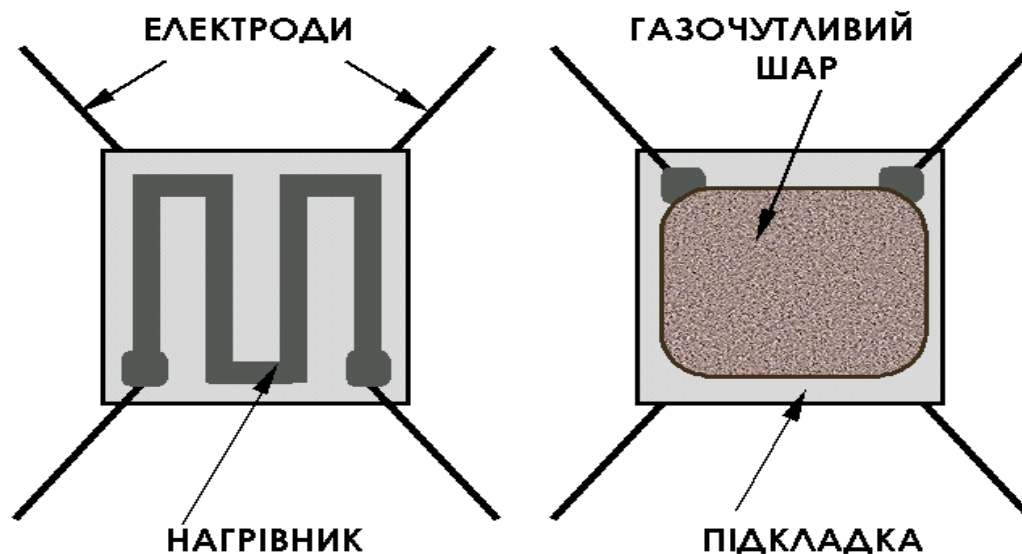


Рис. 7. Конструкція адсорбційно-чутливого елементу.

На підкладці з окису алюмінію розмірами 1,5x1,5x0,3 мм методом товстоплівкової технології виготовлені платинові електроди та платиновий нагрівник, опір якого при кімнатній температурі становить (10 ± 1) Ом. На протилежній до нагрівника стороні підкладки сформовано газочутливий шар.

До контактних площадок приклеєні виводи з платиного дроту діаметром 0,03 мм. Елемент поміщено в стандартний корпус АЧЕ (рис. 8).

Характеристики АЧЕ, як відзначалось вище, залежать не стільки від матеріалу газочутливого шару та каталітичної добавки, які є практично однаковими у всіх серійних газових сенсорів, скільки від структури газочутливого шару, яка визначається режимом і послідовністю технологічних операцій, способами одержання вихідних матеріалів, дисперсністю порошку та багатьма іншими факторами, які складають ноу-хау кожного виробника.

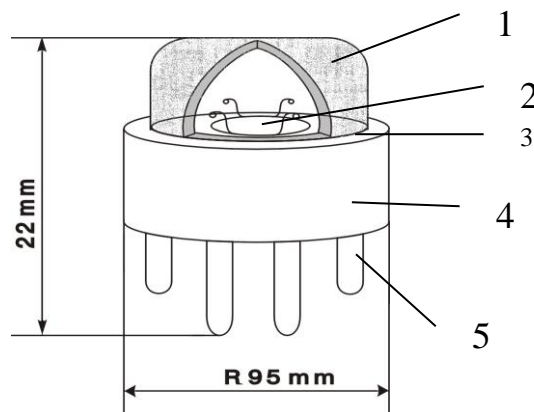


Рис. 8. Конструкція та габаритні розміри газочутливого сенсора :
1 – подвійна сітка, 2 – чутливий елемент, 3 – поліамідна основа, 4 – охоронне кільце, 5 – виводи з нікелю.

Основними технічними параметрами і характеристиками адсорбційних газочутливих сенсорів є

- *хімічний склад газу*, до зміни якого чутливий сенсор;
- *номінальний опір* в робочих умовах R_H , тобто допустимий діапазон опору чутливого шару в атмосфері повітря (або іншого газу) при оптимальній температурі чутливого елемента;
- *діапазон зміни концентрації газу* – зазвичай гранично допустима концентрація токсичного газу;
- *кратність зміни опору*, або *відносна зміна опору* чутливого

елементу в допустимому діапазоні зміни концентрації досліджуваного газу;

– *номінальна статична характеристика*, тобто залежність опору сенсора або його відносної зміни від концентрації газу;

– *опір нагрівника*;

– *напруга, або струм нагрівання*;

– *споживана потужність*;

– *час прогрівання* до початку роботи, тобто час виходу на робочий режим експлуатації, після якого встановлюються відтворювані зміни опору сенсора при зміні концентрації газу;

– *стала часу* – час за який відбувається 63% зростання (спадання) від повної зміни опору.

Методика проведення експерименту

Опис схем вимірювання

Для дослідження характеристик газочутливих резистивних сенсорів використовуються схеми зображені на рис. 9.

Опір чутливого елемента сенсора 1 вимірюється цифровим омметром 2 (рис. 9, а). Для вибору температурного режиму роботи (найбільшої чутливості до певного газу) нагрівний елемент сенсора під'єднується до джерела стабілізованої напруги 3.

Газочутливий сенсор поміщається у герметичні колби, в яких знаходиться розчин аміаку різної концентрації. У вільній від розчину частині колби буде знаходитись повітря, насичена водяна пара та молекули аміаку, концентрація яких у газоподібному стані буде визначатись концентрацією розчину.

Дослідження динамічних характеристик сенсора проводиться за допомогою схеми зображеної на рис. 9, б. При цьому чутливий елемент сенсора з'єднується послідовно з опором R_0 , напруга на якому вимірюється мілівольтметром, або реєструється самописцем. Спад напруги на R_0 пропорційний струму в колі, а отже, оскільки $R_0 \ll R_T$, провідності газочутливого елемента.

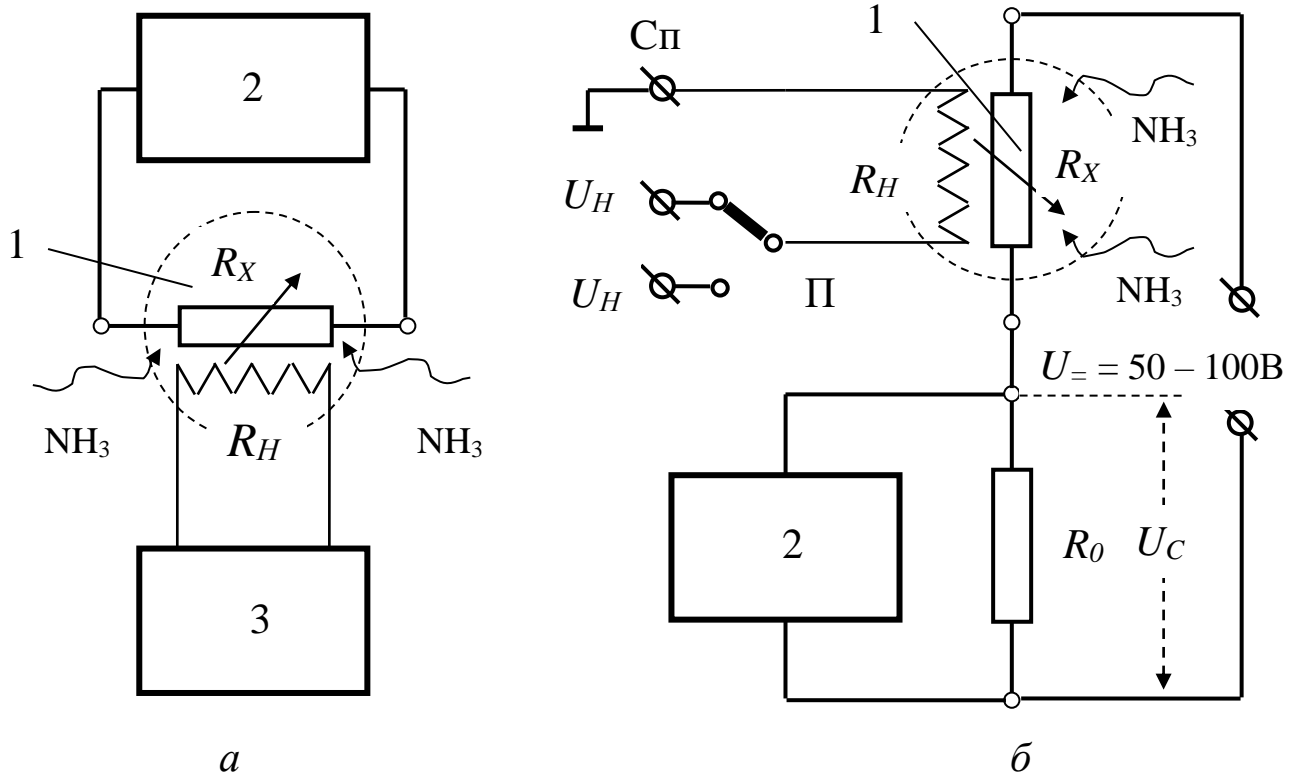


Рис. 9. Схеми для дослідження резистивних сенсорів токсичних газів.

Найбільш поширеною є робота газового сенсора в режимі періодичної зміни струму підігріву чутливого елемента, при якому робоча температура змінюється періодично між двома специфічними станами: високою температурою (В) – для очищення поверхні напівпровідника і низькою температурою (Н) – для детектування.

Детектування, як правило, здійснюється безпосередньо перед циклом термоочистки. При використанні цього режиму роботи можна досягнути високої чутливості до адсорбованих газів з хорошою селективністю і відтворюваністю сигналу завдяки тому, що поверхня напівпровідника очищується при високій температурі в кожному циклі. Принцип роботи такого сенсора для детектування, наприклад, CO показаний на рис. 10.

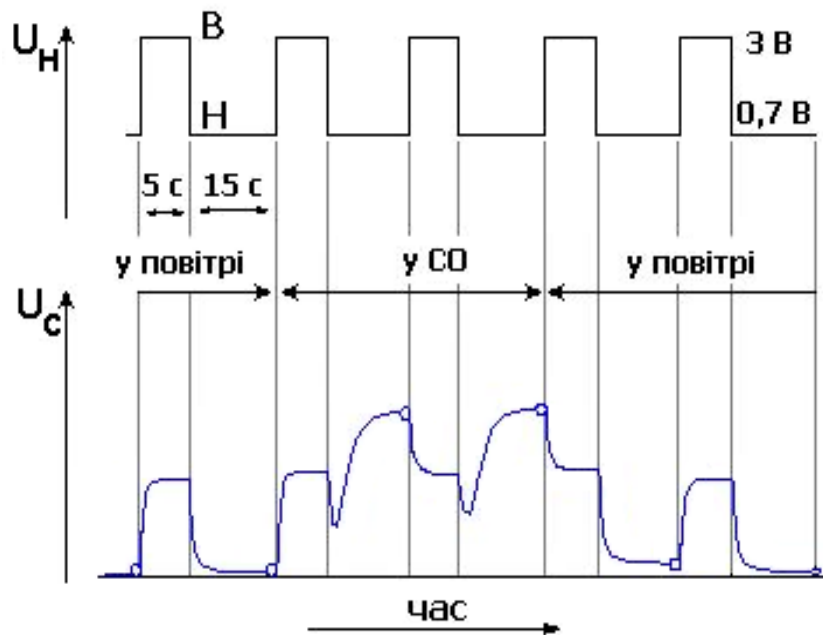


Рис. 10. Принцип роботи сенсора СО в режимі періодичної зміни температури (U_H – напруга на нагрівнику, U_C – вихідний сигнал сенсора).

Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Дослідження статичної передавальної характеристики сенсора.

1. Підключити газовий датчик до схеми, що зображена на рис. 9, а. Включити блок живлення та омметр. На блоці живлення виставити напругу 4 В для нагріву АЧЕ.

2. Опустити сенсор у суміш молекул повітря та насиченої пари дистильованої води і після стабілізації опору АЧЕ зняти покази омметра.

3. Помістити сенсор у колбу з газом, який містить аміак (NH_3) з найменшою об'ємною концентрацією і після стабілізації опору АЧЕ записати його значення.

4. Повернути сенсор у колбу з молекулами повітря та насиченої пари дистильованої води (для десорбції NH_3).

5. Виконати пункти 3–4 для інших значень концентрації NH_3 .

6. Побудувати графік залежності статичного значення опору датчика від концентрації аміаку $R=f(C)$. Повторити виконання пунктів 2 – 6 для значення напруги нагріву 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 В. Вибрати оптимальний режим роботи сенсора.

Завдання 2. Дослідження динамічних характеристик сенсора.

1. Задати напругу нагріву АЧЕ в межах 4 – 6 В. Помістити сенсор в газове середовище з насиченою водяною парою і після стабілізації опору АЧЕ записати його значення.

2. Перенести сенсор у колбу з найменшою концентрацією NH_3 . зафіксувати значення опору датчика через кожні 10 сек. впродовж 200 секунд.

3. Помістити сенсор в колбу з насиченою водяною парою і зняти залежність опору сенсора від часу через кожні 10 сек. впродовж 200 секунд.

4. Виконати пункти 2 – 3 для газових середовищ із різним вмістом NH_3 .

5. Пункти 1 – 4 цього завдання виконати при різних струмах (напругах) підігріву. Побудувати часові залежності опору сенсора для різних концентрацій NH_3 та режимів роботи. Визначити тип перехідної характеристики та її параметри.

Завдання 3. Дослідження роботи сенсора в режимі періодичної зміни температури.

1. Зібрати схему, показану на рис. 9, б, підключивши до резистора R_0 самописець або мілівольтметр. Резистор R_0 підібрати таким чином, щоб $R_0 \ll R_x$, однак спад напруги на ньому повинен бути достатнім для надійної реєстрації.

2. Використовуючи результати, одержані при виконання завдання 1 вибрати значення напруг підігріву АЧЕ U_{H1} та U_{H2} таким чином, щоб при одній досягти хорошої чутливості до NH_3 , а при іншій очищення (десорбцію) АЧЕ.

3. Дослідити зміну вихідного сигналу схеми при поміщенні сенсора у насичені пари води та контрольоване газове середовище з молекулами NH_3 при періодичній зміні температури АЧЕ (подібно до приведених на рис. 10).

4. Варіюючи параметри експерименту (значення U_{H1} та U_{H2} , тривалості процесу очищення і вимірювання) встановити оптимальні режими роботи сенсора, зробити відповідні висновки.

Рекомендована література

1. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. –М. Техносфера, 2005. –592 с.
2. Б. Эггинс. Химические и биологические сенсоры. –М. Техносфера, 2005. –336 с.
3. Метрологія та вимірювальна техніка. Підручник/ Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та інші. За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескід-Біт. 2003. –544 с.
4. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. Підручник. – Львів: Львівська політехніка. 2000. – 360 с.
5. Васюра А.С., Кривогубченко С.Г., Кулик А.Я., Компанець М. Елементи локальних систем автоматики/ Навчальний посібник. – Вінниця: ІЗМН – ВДТУ, 1998. – 103 с.
6. R.W. Cateral. Chemical Sensors. Oxford, UK. Oxford University Press. 1997.
7. Головка Д.Б., Рего К.Г., Скрипник Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. –К.: Либідь, 1997.–232 с.
8. Готра З.Ю., Ильницький Л.Я., Полтщук Е.С. и др. Датчики: Справочник/ Под ред. З.Ю.Готры и О.И. Чайковского. – Львов: Каменяр. 1995. –312 с.
9. L. Ristic. Sensor Technologies and Devices. Artech House. Boston, London. 1994.
10. M. Prudenziati. Thic Film Sensors. Elsevier. Amsterdam. 1994.
11. D.G. Buerk. Biosensors. Theory and Application. Technomic. Lancaster, Basel. 1993.
12. Аш Ж. И др. Датчики измерительных систем: В 2–х т. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
13. Боднер В.А. Приборы первичной информации. – М.: Машиностроение, 1991. – 344 с.
14. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. –М. Энергоатомиздат, 1991. 144с.: ил.
15. Измерения в промышленности: Справ. изд. в 3–х т. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990.

16. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов/ Н. Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский, В. Н. Скугоров; Под общ. ред. Н. Н. Евтихьева. –М.: Энергоатомиздат, 1990. -352 с.: ил.
17. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
18. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учебн. пособие для вузов. -Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. –320 с.: ил.
19. Куликовский К. Л., Купер В. Я. Методы и средства измерений: Учебн. пособие для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1986. –448. с.: ил.
20. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учебн. пособие для вузов. –Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. –320 с.: ил.
21. Васюра А.С. Физические основы построения первичных измерительных преобразователей // Приборы и системы управления. – 1983. – №8.
22. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы. М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.

Зміст

Передмова	3
Лабораторна робота №1	
Вивчення роботи та дослідження характеристик тензорезисторів	5
Лабораторна робота №2	
Вивчення роботи та дослідження характеристик сенсорів переміщення.....	23
Лабораторна робота №3	
Вивчення методів вимірювання температури	37
Лабораторна робота №4	
Вивчення роботи та дослідження характеристик перетворювача Холла	60
Лабораторна робота №5	
Вивчення роботи та дослідження характеристик сенсорів оптичного випромінювання	76
Лабораторна робота №6	
Вивчення роботи та дослідження характеристик напівпровідникового сенсора токсичних газів	101
Рекомендована література	118

ББК В 3в614 я73

УДК 53.084.2 (075.8)

Г – 67

Фізичні основи сенсорики. Навчальний посібник / Горват А.А.,
Височанський Ю.М. Ужгород, УжНУ, 2007 - 120 с.

ISBN 966-7400-80-8

©2007. Горват А.А., Височанський Ю.М.